

Hybrid Active-Passive Shielding of Magnetic Field of Overhead Power Lines with Triangular Phase Conductors Arrangements

Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdui I.V., Chunikhin K.V.,
Dobrodeyev P.N.

Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kharkiv, Ukraine

Abstract. The aim of the work is to design a robust hybrid active-passive magnetic field shielding system created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires, designed to increase the shielding efficiency of the initial magnetic field in residential premises to the level of sanitary standards and reduce the system's sensitivity to changes in system parameters. To achieve this goal, the following tasks were solved: the structure of a hybrid system of active-passive shielding was developed, and the synthesis of a system consisting of a double-circuit active and multi-circuit passive parts was performed. The synthesis of the system is reduced to solving a vector game, in which the vector payoff is calculated based on the solutions of the Maxwell equations in the quasi-stationary approximation using the COMSOL Multiphysics software. The solution of a multicriteria game is found on the basis of algorithms for optimizing a multi-swarm of particles from Pareto optimal solutions, taking into account binary preference relations. The most important results are theoretical and experimental studies of the effectiveness of the synthesized hybrid active-passive shielding system for the magnetic field created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires in the shielding zone. The significance of the results obtained lies in the fact that in the course of designing a hybrid active and multiloop passive screens, the parameters of passive and active screens were calculated; as well as practical recommendations are given on the reasonable choice of the spatial arrangement of a multi-loop passive shield and two shielding windings of a robust system of hybrid shielding of the magnetic field created by overhead power lines with a triangular arrangement of phase wires.

Keywords: overhead power lines, triangular arrangement of phase conductors, magnetic field, robust hybrid active-passive shielding system, theoretical and experimental studies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.01>

UDC: 621.3.013

Ecranarea hibridă activ-pasivă a câmpului magnetic al liniilor electrice aeriene cu un aranjament triunghiular de fire de fază

Kuznețov B.I., Kuțenko A.S., Nikitina T.B., Bovdui I.V., Ciunihin K.V., Dobrodeev P.N.

Institutul pentru Probleme de Inginerie Mecanică A.N. Podgorny Academia Națională de Științe din Ucraina,
Harkiv, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a proiecta un sistem robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic, creat de linii electrice aeriene cu dispunerea triunghiulară a firelor de fază, conceput pentru a crește eficiența de ecranare a câmpului magnetic inițial din spațiile rezidențiale până la nivelul sanitar și reduce sensibilitatea sistemului la modificările parametrilor sistemului. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: a fost dezvoltată structura unui sistem hibrid activ-pasiv de ecranare și a fost realizată sinteza unui sistem format dintr-o parte activă cu două circuite și partea pasivă cu mai multe bucle. Soluția jocului multicriterial se bazează pe algoritmi de optimizare a unui multi-roii de particule din soluții optime Pareto, ținând cont de relațiile binare de preferință. Cele mai importante rezultate sunt studiile teoretice și experimentale ale eficacității sistemului robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic creat de liniile electrice aeriene cu o dispoziție triunghiulară a firelor de fază în zona de ecranare. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că, în cursul proiectării unui ecran hibrid activ și pasiv cu mai multe bucle, au fost calculate coordonatele aranjamentului spațial a 16 circuite de ecrane pasive și două înfășurări compensatoare, precum și curenții și fazele din aceste înfășurări ale ecranului activ, la fel sunt propuse recomandări practice cu privire la alegerea rezonabilă a aranjamentului spațial a unui ecran pasiv cu mai multe bucle și a două înfășurări de ecranare a unui sistem robust de ecranare hibridă a câmpului magnetic creat de liniile electrice aeriene cu un aranjament

triunghiular de fire de fază. Se arată posibilitatea reducerii inducției câmpului magnetic inițial la nivelul standardelor sanitare.

Cuvinte-cheie: linii electrice aeriene, aranjarea triunghiulară a firelor de fază, câmp magnetic, sistem robust hibrid activ-pasiv de ecranare a câmpului magnetic, studii teoretice și experimentale.

Гибридное активно-пассивное экранирование магнитного поля воздушных линий электропередачи с треугольным расположением фазных проводов

Кузнецов Б.И., Куценко А.С., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Чунихин К.В., Добродеев П.Н.
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного национальной академии наук Украины
Харьков, Украина

Аннотация. Целью работы является проектирование робастной гибридной активно-пассивной системы экранирования магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов, предназначенной для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля в жилых помещениях до уровня санитарных норм и уменьшения чувствительности системы к изменениям параметров системы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработана структура гибридной системы активно-пассивного экранирования, и выполнен синтез системы, состоящей из двухконтурной активной и многоконтурной пассивной частей. Синтез системы сводится к решению векторной игры, в которой векторный выигрыш вычисляется на основании решений уравнений Максвелла в квазистационарном приближении с помощью программных средств COMSOL Multiphysics. Решение многокритериальной игры находится на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из Парето оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения. Наиболее важными результатами являются теоретические и экспериментальные исследования эффективности синтезированной гибридной активно-пассивной системы экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в зоне экранирования. Значимость полученных результатов состоит в том, что в ходе проектирования гибридного активного и многоконтурного пассивного экранов вычислены координаты пространственного расположения 16 контуров пассивного экрана и двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана; а также приводятся практические рекомендации по обоснованному выбору пространственного расположения многоконтурного пассивного экрана и двух экранирующих обмоток робастной системы гибридного экранирования магнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов. Показана возможность снижения индукции исходного магнитного поля до уровня санитарных норм.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, треугольное расположение фазных проводов, магнитное поле, робастная система гибридного активно-пассивного экранирования, теоретические и экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы защиты здоровья населения от биологического воздействия техногенного электромагнитного поля объектов электроэнергетики имеет высокую социальную значимость и является чрезвычайно актуальной и важной задачей в улучшении качества и продолжительности жизни населения. Приоритетность для человечества проблемы уменьшения влияния техногенного электромагнитного поля подтверждена Всемирной организацией здравоохранения, которая в числе многих всемирных проектов (наряду с изменениями климата, ионизирующей радиацией, химической безопасностью и COVID-19), открыла и с 1996 года реализует в настоящее время постоянно действующий Международный проект по электромагнитному полю, направленный на изучение влияния электромагнитного поля на

организм человека [1]. Значительное место в указанных исследованиях помимо высокочастотного излучения от станций сотовой связи, занимает электромагнитное поле промышленной частоты, создаваемое линиями электропередачи ЛЭП (МП).

Высоковольтные воздушные ЛЭП, расположенные в зонах жилой застройки, являются основными источниками магнитного поля промышленной частоты, что негативно действует на население жилых домов, которые расположены вдоль трасс ЛЭП. Основой для обоснования этих выводов стало выявление в конце XX-го столетия канцерогенных свойств воздействия МП при его слабом, но долго-временном воздействии на человека [2]–[3] и разработка экспертами ВОЗ рекомендаций по максимально возможному уменьшению уровня индукции МП в расположенных близи ЛЭП жилых домах, для уменьшения вероят-

ности возникновения раковых заболеваний у населения.

Выявление канцерогенных свойств и смертельной опасности действия слабого МП с индукцией меньше 1 мкТл при его длительном воздействии на людей, привело к постепенному введению с начала XX-го столетия, и к настоящему времени, жестких санитарных норм по уровню индукции магнитного поля и постоянного ужесточения этих норм по граничным уровням индукции магнитного поля с частотой $50\div 60 \text{ Гц}$, до рекомендованного ВОЗ уровня $0,2\div 0,6 \text{ мкТл}$ [4]–[6].

Многие жилые здания и сооружения расположены в непосредственной близости от высоковольтных линий электропередачи, так, что уровень индукции магнитного поля внутри этих сооружений существенно превышает современные санитарные нормы. Так, например, как это показано на рис. 1, на улице с символическим названием «Высоковольтная», жилые дома расположены в непосредственной близости от магистральной двухцепной ЛЭП 330 кВ с расщепленными проводами по 2 кА в каждой цепи.



Рис.1. Жилые дома, расположенные в непосредственной близости от магистральной двухцепной ЛЭП.¹

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показывают [7]–[10], что предельно допустимый уровень индукции МП ($0,5 \text{ мкТл}$) может превышать на порядок, и более, что создает угрозу здоровью сотен тысяч граждан, проживающих ближе 100 м от воздушных ЛЭП. Кроме того,

в связи с постоянным подорожанием земельных участков для застройки, продолжается строительство жилых, административных и других общественных зданий, и сооружений в местах прохождения существующих высоковольтных ЛЭП. Так, например, на улице «Астрономическая» современный двухэтажный коттедж построен в непосредственной близости от опоры одноцепной ЛЭП 110 кВ 500 А , как это показано на рис. 2.



Рис.2. Современный жилой коттедж, расположенный вблизи опоры ЛЭП.²

Такое состояние характерно для многих ведущих стран мира – США, Израиля, Италии, Испании и многих других и требует принятия срочных мер по снижению в $3\div 5$ раз МП действующих ЛЭП. Поэтому во многих ведущих странах мира интенсивно ведутся разработки методов и средств нормализации магнитного поля в энергетической инфраструктуре, общественных сооружениях, и в жилых домах, а также проводится их широкое внедрение данных средств [11]–[15].

Наиболее эффективной технологией является реконструкция ЛЭП путем ее перемещения на безопасное расстояние от жилых домов, или замена воздушной ЛЭП на кабельную линию. Однако, подобная реконструкция требует огромных материальных средств. Поэтому более приемлемы менее дорогостоящие методы экранирования магнитного поля действующих ЛЭП, из которых наиболее универсальны и относительно легко реализуемы,

^{1,2} Appendix 1

методы активного контурного экранирования магнитного поля, и при этом данные методы обеспечивают необходимую эффективность. В настоящее время во всем мире интенсивно

В жилых домах старой застройки часто в непосредственной близости проходят воздушные линии электропередачи с "треугольным" расположением фазных проводов, которое является одним из наиболее опасных вариантов расположения проводов для источников МП. Магнитное поле, создаваемое воздушными линиями электропередачи с "треугольным" расположением фазных проводов, имеет пространственно-временную характеристику МП в форме окружности [9]. Для активного экранирования магнитного поля с такой пространственно-временной характеристикой, необходимо, не менее двух компенсационных обмоток в составе САЭ.

Активное экранирование требует использования внешних источников питания для формирования токов соответствующей величины и фазы в компенсирующих обмотках, для создания магнитного поля направленного противоположно исходному магнитному полю ЛЭП, что необходимо для реализации желаемого эффекта экранирования. Таким образом, системы активного экранирования способны обеспечить сильное ослабление исходного магнитного поля ЛЭП [16]–[18], однако, для этого требуется достаточно сложная система автоматического управления, в которой, помимо датчиков магнитного поля, необходимо установить дорогостоящее оборудование большой мощности, такое как – источники питания, силовые преобразователи и система управления, формирующая подаваемые в компенсирующие обмотки токи, для достижения требуемого подавления исходного магнитного поля. Именно по этим причинам, данное решение является значительно более дорогим в разработке, чем пассивные методы [7]–[10].

При пассивном экранировании ослабление исходного магнитного поля достигается за счет генерирования согласно закону Фарадея компенсирующего поля с помощью пассивного экрана. Для повышения эффективности экранирования исходного магнитного поля часто применяют многоконтурные пассивные экраны [8]. Однако, пассивные экраны имеют значительно меньший коэффициент экранирования, чем активные "экраны", поэтому пассивные экраны часто используются в качестве дополнения к САЭ, так, что гибридные

проводятся исследования и внедряются различные системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты (САЭ) [16]–[18].

активно-пассивные экраны одновременно используют как систему активного экранирования, так и пассивные экраны различной конструкции [19].

Целью работы является синтез робастной гибридной активно-пассивной системы, состоящей из активной и многоконтурной пассивной части, которая обеспечит повышение эффективности экранирования магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки, при одновременном снижении чувствительности системы к изменениям параметров системы.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ ГИБРИДНОЙ АКТИВНО-ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Магнитное поле, создаваемое линией электропередач необходимо уменьшить до безопасного уровня. При гибридном активно-пассивном экранировании с помощью многоконтурных обмоток пассивного экрана и компенсационных обмоток активного экрана необходимо создать магнитное поле, направленное против исходного магнитного поля, создаваемого ЛЭП. Задачей проектирования системы гибридного активно-пассивного экранирования является расчет координат пространственного расположения многоконтурных обмоток пассивного экрана и компенсационных обмоток активного экрана, а также величин токов, и их фаз, в компенсирующих обмотках.

При проектировании гибридной системы активно-пассивного экранирования, в первую очередь, спроектируем программный регулятор в виде разомкнутого контура грубого управления на основе квазистатической математической модели магнитного поля [20]–[22]. Затем спроектируем стабилизирующий точный регулятор в виде замкнутого контура управления, основанного на уравнениях динамики замкнутой системы с учетом моделей исполнительных и измерительных устройств, возмущений и шумов измерений и предназначенного для повышения точности управления по сравнению с разомкнутым управле-

нием, основанным на квазистатической математической модели магнитного поля.

Рассмотрим квазистатическую модель МП, создаваемое воздушными ЛЭП. Математическое моделирование электромагнитного поля в общем случае сводится к решению краевой задачи для системы уравнений Максвелла в частных производных [10]–[11].

$$\operatorname{rot} H = j + \partial_t D + j_{ex} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\partial_t B \quad (2)$$

здесь: E – напряженность электрического поля, H – напряженность магнитного поля, D и B – векторы электрической и магнитной индукции, j – плотность тока проводимости, j_{ex} – плотность сторонних токов, создаваемых источниками вне рассматриваемой области.

Первое уравнение (1) является обобщенным законом Ампера – полная плотность тока представляет собой вихрь напряженности магнитного поля. Второе уравнение (2) является дифференциальной формулировкой закона Фарадея, что изменение во времени магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле.

В частности, индукция магнитного поля в непосредственной близости от проводов зависит от двух пространственных переменных и изменяется по гармоническому закону во времени и, следовательно, удовлетворяет эллиптическому уравнению второго порядка

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial y} \right) - (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)B = 0 \quad (3)$$

Промежуточное положение между постоянным полем и быстро меняющимся полем занимает так называемое квазистационарное поле – такое электромагнитное поле, при исследовании которого токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости. Для квазистационарного поля уравнения Максвелла имеют вид

$$\operatorname{rot} H = j + j_{ex} \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} E = -\partial_t B. \quad (5)$$

Из первого уравнения (4) этого приближения следует, что квазистационарное магнитное поле в каждый данный момент времени

полностью определяется распределением электрических токов в этот же момент времени и может быть найдено из этого распределения точно так же, как это делается в магнитостатике. Для оценки воздействия магнитного поля ЛЭП на окружающую среду, большинство расчетов [13]–[15] выполняется на основе закона Био-Савара-Лапласа для элементарного тока

$$dH(t) = \frac{I(t)}{4\pi R^3} (dl \times R) \quad (6)$$

Здесь вектор R направлен от элементарного отрезка dl с полным током $I(t)$ к точке наблюдения Q . Тогда вектор суммарной напряженности поля равен:

$$H(Q, t) = \frac{I(t)}{4\pi} \int_L \frac{(dl \times R)}{R^3}. \quad (7)$$

Эта формула широко используется для расчета магнитного поля воздушных линий электропередач вместо системы уравнений Максвелла (4) – (5).

Таким образом, зависимость величины индукции магнитного поля от тока является статической и описывается уравнением (7).

В заключение, приведем еще одну форму записи квазистационарной модели электромагнитного поля, изменяющегося во времени по синусоидальному закону

$$H(Q, t) = A(Q) \exp j(\omega t), \quad (8)$$

где $A(Q)$ – амплитуда напряженности магнитного поля.

Рассмотрим построение математической модели исходного магнитного поля, создаваемого линией электропередачи. Зададим амплитуды A_i и фазы φ_i токов проводов промышленной частоты ω линии электропередачи. Запишем выражения для токов $I_i(t)$ в проводах ЛЭП в комплексной форме

$$I_i(t) = A_i \exp j(\omega t + \varphi_i) \quad (9)$$

В работах [12]–[15] параметры токов ЛЭП (9) считаются известными и не меняются со временем. Однако величины токов ЛЭП имеют суточные, недельные и сезонные изменения. Поэтому, в отличие от работ [12]–[15], введем вектор параметров

исходных неопределенностей δ задачи проектирования гибридной активно-пассивной системы экранирования, компонентами которого являются неопределенности значения токов и фаз в проводах ЛЭП, а также другие параметры неопределенностей электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, которые, во-первых, изначально известны неточно, и, во-вторых, могут меняться в процессе эксплуатации системы [23]–[25].

Тогда вектор $B_L(Q_i, \delta, t)$ индукции исходного магнитного поля может быть рассчитан по закону Био-Савара на основании (7) в виде суммы векторов $B_{Li}(Q_i, \delta, t)$ индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводами ЛЭП в точке Q_i пространства экранирования [9]

$$B_L(Q_i, \delta, t) = \sum B_{Li}(Q_i, \delta, t) \quad (10)$$

Рассмотрим построение математической модели магнитного поля, создаваемого компенсационными обмотками активной части гибридного экрана. Зададим вектор X_a пространственного расположения и геометрических размеров компенсационных обмоток активной части гибридного экрана, а также амплитуды A_{ai} и фазы φ_{ai} токов в компенсационных обмотках [26]–[28]. Запишем выражения для токов в проводах компенсационных обмотках в комплексной форме

$$I_{ai}(t) = A_{ai} \exp j(\omega t + \varphi_{wi}) \quad (11)$$

Тогда вектор $B_a(Q_i, X_a, t)$ индукции магнитного поля, создаваемое всеми проводами компенсирующих обмоток активной части гибридного экрана $B_{ai}(Q_i, X_a, t)$ в точке Q_i пространства экранирования также может быть рассчитан на основании (7), по закону Био-Савара [6]

$$B_a(Q_i, X_a, t) = \sum B_{ai}(Q_i, X_a, t) \quad (12)$$

Тогда вектор $B_{Ra}(Q_i, X_a, \delta, t)$ результирующего магнитного поля, создаваемое всеми проводами линии электропередачи и всеми обмотками активной части гибридного экрана вычисляется в виде к суммы

$$B_{Ra}(Q_i, X_a, \delta, t) = B_L(Q_i, \delta, t) + B_a(Q_i, X_a, t) \quad (13)$$

Рассмотрим построение математической модели магнитного поля, создаваемого многоконтурным пассивным экраном, являющегося частью гибридного активно-пассивного экрана [19]. В работах [13]–[15] параметры пассивного экрана считаются заданными. Фактически эти параметры необходимо вычислить в ходе проектирования системы активно-пассивного экранирования. Поэтому, в отличие от работ [13]–[15], зададим вектор X_p начальных значений геометрических размеров, толщины и материала многоконтурного пассивного экрана. Тогда для заданного вектора $B_{Ra}(Q_i, X_a, \delta, t)$ индукции результирующего магнитного поля, создаваемое линией электропередач и только обмотками активной части гибридного активно-пассивного экрана, а также значений вектора X_p геометрических размеров пассивного контурного экрана может быть вычислен магнитный поток $\Phi_l(X_a, X_p, \delta, t)$, пронизывающий l -тый контур многоконтурного пассивного экрана

$$\Phi_l(X_a, X_p, \delta, t) = \int_S B_{Ra}(X_a, \delta, t) dS \quad (14)$$

Ток $I_{pl}(X_a, X_p, \delta, t)$ в комплексной форме, индуцируемый в l -том контуре многоконтурного пассивного экрана, вычисляется по закону Ома и интегральной форме закона Фарадея [9]:

$$I_{pl}(X_a, X_p, \delta, t) = -j\omega \Phi(X_a, X_p, \delta, t) / \dots \dots / (R_l(X_p) + j\omega L_l(X_p)) \quad (15)$$

Здесь активное сопротивление $R_l(X_p)$ и индуктивность $L_l(X_p)$ l -того контура многоконтурного пассивного экрана вычисляется для значений вектора X_p геометрических размеров пассивного контурного экрана.

Тогда для вычисленных значений токов $I_{pl}(X_a, X_p, \delta, t)$ в l -тых контурах многоконтурного пассивного экрана [13]–[15] и значений вектора X_p геометрических размеров пассивного контурного экрана по закону Био-Савара может быть вычислен на основании (7) вектор $B_p(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ индукции магнитного поля, создаваемое всеми l – контурами многоконтурного пассивного экрана.

Естественно, что на основании закона Фарадея, вектор $B_p(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ индукции этого поля пассивного экрана направлен противоположно исходному полю, генерируемому линией электропередач и только обмотками активной части гибридного активно-пассивного экрана. Следовательно, с помощью пассивной части гибридного активно-пассивного экрана экранируется результирующее магнитное поле, оставшееся некомпенсированным после работы только активной части гибридного активно-пассивного экрана.

Тогда может быть вычислен вектор $B_R(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ индукции результирующего магнитного поля в виде суммы вектора $B_L(Q_i, \delta, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами линии электропередачи, вектор $B_a(Q_i, X_a, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми проводами компенсирующих обмоток активной части гибридного экрана, и вектор $B_p(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ индукции магнитного поля, создаваемого всеми контурами пассивной части гибридного экрана в точке Q_i , пространства экранирования

$$B_R(Q_i, X_a, X_p, \delta, t) = B_L(Q_i, \delta, t) + \dots + B_a(Q_i, X_a, t) + B_p(Q_i, X_a, X_p, \delta, t) \quad (14)$$

II. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Введем вектор X искомым параметров задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования, компонентами которого являются вектор X_a значений геометрических размеров компенсационных обмоток, а также амплитуд A_{wi} и фаз φ_{wi} токов в компенсационных обмотках активной части гибридной системы активно-пассивного экранирования, а также вектор X_p геометрических размеров, толщины и материала экрана пассивной части гибридной системы активно-пассивного экранирования [29]–[30].

Тогда для заданных начальных значений вектора X искомым параметров и вектора δ параметров неопределенностей гибридной системы активно-пассивного экранирования по вектору $B_R(Q_i, X_a, X_p, \delta, t)$ мгновенного значения индукции результирующего магнитного поля может быть вычислено в программной среде COMSOL Multiphysics эф-

фективное значение $B_R(X, \delta, P_i)$ вектора индукции результирующего магнитного поля в точке пространства экранирования Q_i .

В работах [16]–[18] задача проектирования системы экранирования магнитного поля сводится к задаче оптимизации одного скалярного критерия, который вычисляется в виде линейной свертки значений индукции в различных точках пространства экранирования. Однако, задача корректного вычисления весовых множителей, с помощью которых формируется скалярный критерий оптимизации в общем виде является некорректно поставленной задачей и ее решение требует специальных подходов [26]–[30]. Кроме того, в постановках задачи проектирования системы экранирования магнитного поля вообще не учитывались неопределенности моделей исходного магнитного поля и параметров системы управления. Поэтому, в отличие от работ [16]–[18] задачу проектирования гибридной системы робастного активно-пассивного экранирования сведем к вычислению решения векторной игры [31]–[32]

$$B_R(X, \delta) = \langle B_R(X, \delta, Q_i) \rangle \quad (17)$$

В этой векторной игре необходимо найти минимум вектора выигрыша игры (17) по вектору X искомым параметров задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования, но максимум этого же вектора выигрыша игры (17) по вектору δ параметров неопределенностей гибридной системы активно-пассивного экранирования.

Компонентами вектора игры (17) являются эффективные значения $B_R(X, \delta, Q_i)$ индукции результирующего магнитного поля во всех рассматриваемых точках Q_i пространства экранирования.

При этом, естественно, необходимо учитывать ограничения [33]–[35] на вектор X искомым параметров и вектор δ параметров неопределенностей задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования в виде векторного неравенства и, возможно, векторного равенства

$$G(X, \delta) \leq G_{\max}, \quad H(X, \delta) = 0 \quad (18)$$

Заметим, что компоненты векторной игры (17) и векторных ограничений (18) являются нелинейными функциями вектора X

искомых параметров и вектора δ параметров неопределенностей задачи проектирования гибридной системы активно-пассивного экранирования [19] и рассчитываются в программной среде COMSOL Multiphysics.

III. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим алгоритм вычисления решения векторной игры (17) с ограничениями (18). В работах [31]–[32] рассматриваются различные подходы к вычислению решений векторных игр на основе различных эвристических подходов. В отличие от работ [31]–[32] в данной работе для нахождения единственного решения векторной игры из множества Парето-оптимальных решений помимо векторного выигрыша (17) и ограничений (18) будем также использовать информацию о бинарных отношениях предпочтения локальных решений друг относительно друга [29]–[30].

Для нахождения такого единственного оптимального решения необходимо сначала разработать алгоритм построения всей области Парето-оптимальных решений. Затем на основе анализа всего множества возможных оптимальных решений исходной векторной игры сузить область рассматриваемых решений и, следовательно, уменьшить трудоемкость лица, принимающего решение в выборе единственного варианта оптимального решения.

Особенностью рассматриваемой задачи нахождения решения является многоэкстремальность векторного выигрыша (17), так что рассматриваемая область возможных решений содержит локальные минимумы и максимумы. Это связано с тем, что при минимизации уровня индукции результирующего магнитного поля в одной точке пространства экранирования уровень индукция в другой точке этого пространства увеличивается за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля. Поэтому для вычисления решения рассматриваемой векторной игры целесообразно использовать алгоритмы стохастической мультиагентной оптимизации [31]–[32].

Рассмотрим один из возможных алгоритмов нахождения множества Парето-оптимальных решений векторной игры на основе стохастической мультиагентной оптимизации – алгоритм PSO, основанный на идее коллективного разума роя частиц для нахождения глобально оптимального значе-

ние $y_j^*(t)$ – gbest PSO, найденное всеми частицами роя, и локально оптимального значения $y_{ij}(t)$ – lbest PSO, найденного одной частицей роя [33]–[34].

Для вычисления решений векторных игр использование стохастических мультиагентных эвристических методов оптимизации вызывает определенные трудности, однако это направление продолжает интенсивно развиваться с использованием различных эвристических приемов. Рассмотрим стохастический мультиагентный алгоритм оптимизации для вычисления решения исходной векторной игры (17) с ограничениями (18) на основе множества роев частиц, количество которых равно количеству компонент векторного выигрыша (17).

В простейшем алгоритме расчета оптимального положения $x_{ij}(t)$ и скорости $v_{ij}(t)$ движения частицы i роя j скорости движения вычисляются по линейным законам [31]–[32]. В отличие от этих алгоритмов, в данной работе для повышения скорости нахождения глобального решения используется специальный нелинейный алгоритм стохастической мультиагентной оптимизации [35]–[36]. В этом алгоритме для переключения движения частицы соответственно с локального оптимума $y_{ij}(t)$ на глобальный $y_j^*(t)$ используется функция Хевисайда H . Движение частицы i роя j в этом нелинейном алгоритме описывается следующими выражениями

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + \dots + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) * \dots * [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \dots \quad (19)$$

$$\dots + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) * \dots * [y_j^*(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (20)$$

где c_1, c_2 – положительные константы, определяющие веса когнитивной и социальной составляющих скорости движения частицы; $r_{1j}(t), r_{2j}(t)$ — случайные числа из диапазона $[0, 1]$, определяющие стохастическую составляющую скорости частицы. Параметры переключения когнитивной p_{1j} и социальной p_{2j} составляющих скорости движения частиц в соответствии с локальным и гло-

бальным оптимумом; случайные чисел $\varepsilon_{1j}(t)$ и $\varepsilon_{2j}(t)$ определить параметры переключения движения частицы по локальному и глобальному оптимумам. Если $p_{1j} < \varepsilon_{1j}(t)$ и $p_{2j} < \varepsilon_{2j}(t)$, то скорость движения частицы i роя j на шаге не меняется и частица движется в том же направлении, что и на предыдущем шаге оптимизации.

При вычислении одного единственного глобального решения векторной игры (17) с ограничениями (18) с помощью отдельных роев вычисляются решения скалярных игр, являющихся компонентами вектора игры (17). Для вычисления одного единственного глобального решения векторной игры (17) с ограничениями (18) отдельные рои обмениваются информацией друг с другом в ходе вычисления оптимальных решений локальных игр. Информация о глобальном оптимуме, полученном частицами другого роя, используется для вычисления скорости движения частиц другого роя, что и позволяет вычислить все потенциальные Парето-оптимальные решения.

При этом, в отличие от работ [36]–[37], на каждом шаге t движения частицы i роя j используются функции бинарного предпочтения локального решения $y_{ij}(t)$, полученного одной частицей роя и глобального решения y_j^* , полученных всеми роями. Решение $X_j^*(t)$, полученное при оптимизации решения игры $B(X(t), P_j)$ с помощью роя j лучше, чем решение $X_k^*(t)$, полученное при оптимизации решения игры $B(X(t), P_k)$ с использованием роя k , т. е. $X_j^*(t) > X_k^*(t)$ если выполняется условие

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, X_k^*(t)) \quad (21)$$

Глобальное решение $X_k^*(t)$, полученное роем k используется как глобальное оптимальное решение $X_j^*(t)$ роя j , которое является лучшим по отношению к глобальному решению $X_k^*(t)$ роя k на основе отношения предпочтения (21).

Основная идея последовательного сужения области компромиссов Парето-оптимальных решений состоит в том, что все,

что не может быть выбрано в соответствии с имеющейся информацией об отношениях бинарных предпочтениях, последовательно удаляется из начального множества возможных решений на основе информации об относительной важности локальных решений. Удаление выполняется до тех пор, пока не будет получено глобально-оптимальное решение [33]–[34].

На основании бинарных отношений предпочтений (21) при минимизации уровня индукции результирующего магнитного поля в одной точке пространства экранирования и увеличении уровня индукция в другой точке этого пространства за счет недокомпенсации или перекомпенсации исходного магнитного поля можно выбрать такое решение, при котором минимизируется максимальное значение уровня индукции по всем рассматриваемым точкам пространства экранирования.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе разработки гибридного экрана, были вычислены координаты пространственного расположения 16 проводников многоконтурного пассивного экрана. Кроме того, были так же вычислены координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также, токи и фазы в этих обмотках системы активного экранирования.

В отличие от работ [13]–[15], в настоящей работе координаты пространственного расположения контуров многоконтурного пассивного экрана вычислены в ходе решения многокритериальной антагонистической игры (17) с ограничениями (18) и для экранирования исходного магнитного поля используется электромагнитный гибридный активно-пассивный экран.

Схема расположения ЛЭП, компенсирующих обмоток активного экрана и проводников многоконтурного пассивного экрана показана на рис. 1.

На рис. 4 показано результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана.

Уровень магнитного поля в центральной части пространства экранирования составляет 1,1 мкТл, в то время как уровень индукции исходного магнитного поля в центральной части пространства экранирования составляет 1,7 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части про-

пространства экранирования составляет 1,54 единицы.

При работе только многоконтурного пассивного экрана наблюдаются характерные петлевого пассивного экрана, рассчитанных в процессе проектирования экрана.

На рис. 5 показано результирующее магнитное поле при работе только активного экрана. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,2 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 8,5 единицы.

На рис. 6 показано результирующее магнитное поле при работе гибридного активно-пассивного экрана. Уровень МП в центральной части пространства экранирования составляет 0,17 мкТл. Расчетное значение фактора экранирования в центральной части пространства экранирования составляет 10 единицы. Применение гибридного экрана позволяет снизить уровень исходного магнитного поля в существенно большей области пространства экранирования по сравнению с использованием только активного экрана.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим теперь результаты экспериментальных исследований электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана.

На рис. 7 показаны компенсационная обмотка и многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки.

На рис. 8 показан многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки

области концентрации напряжений в 16 точках расположения проводников много-

гибридного активно-пассивного экранирования.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований гибридной системы активно-пассивного экранирования.

На рис. 9 вместе с расчетными значениями показаны и экспериментально измеренные значения индукции магнитного поля, создаваемое ЛЭП, и индукции результирующего магнитного поля при включенной системе активно-пассивного экранирования.

Экспериментально измеренное минимальное значение индукции в малой зоне экранирования при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования составляет 0.1 мкТл. Индукция исходного магнитного поля в рассматриваемом пространстве составляет 2 мкТл, а при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования уровень магнитного поля во всей зоне экранирования не превышает 0.28 мкТл.

Сравнение результатов расчетных и экспериментально измеренных значений индукции исходного и результирующего магнитного поля с включенной гибридной системой активно-пассивного экранирования, показанных на рис. 9, отличаются не более чем на 20 %.

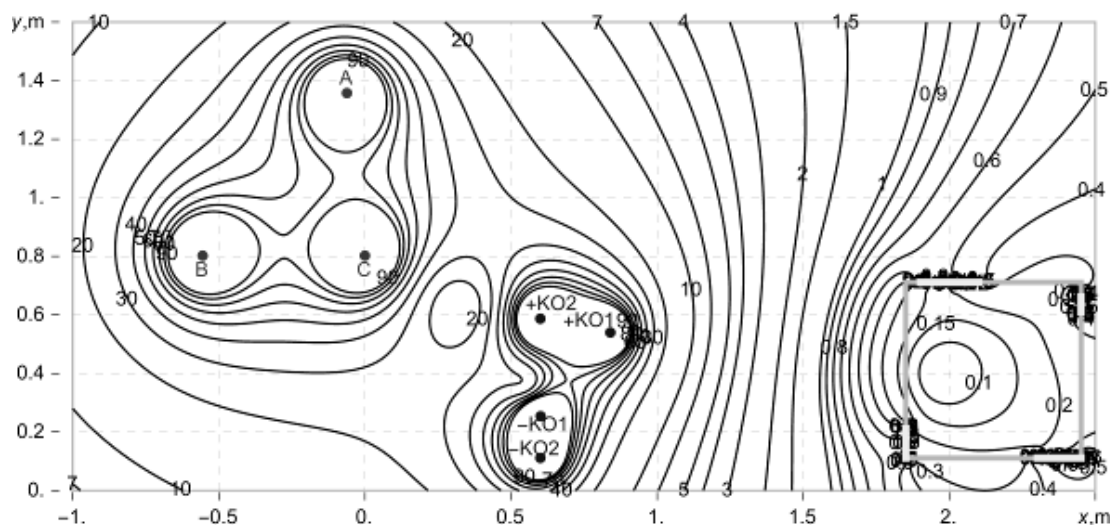


Рис.3. Схема расположения ЛЭП, обмоток активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.³

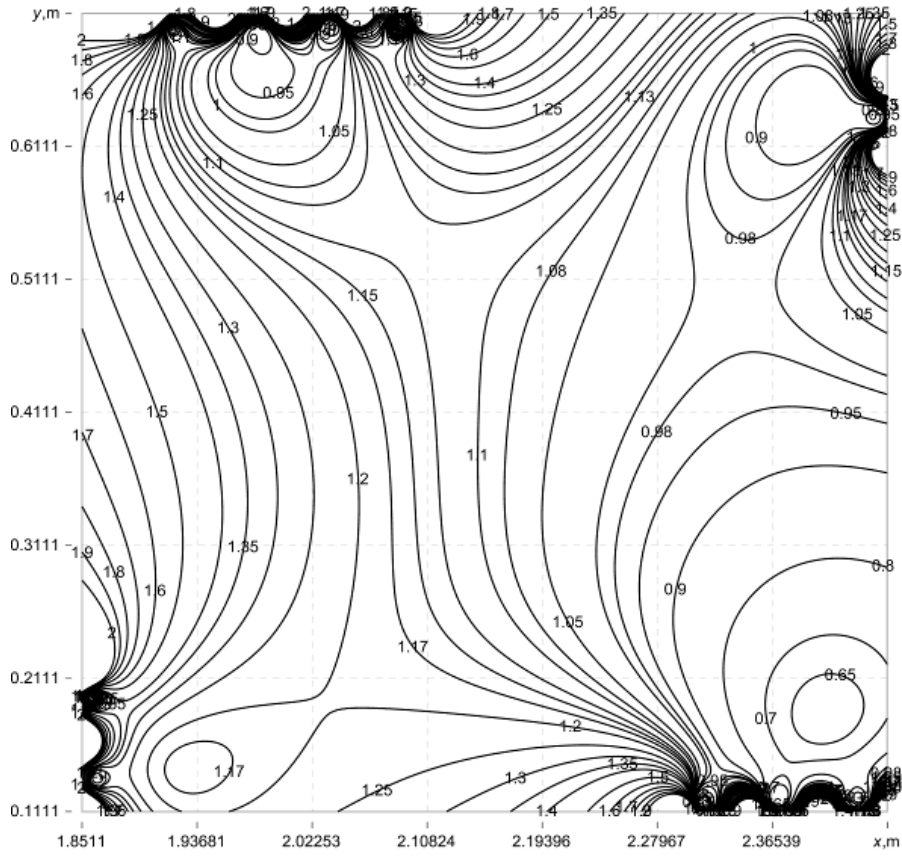


Рис.4. Результирующее магнитное поле при работе только многоконтурного пассивного экрана. ⁴

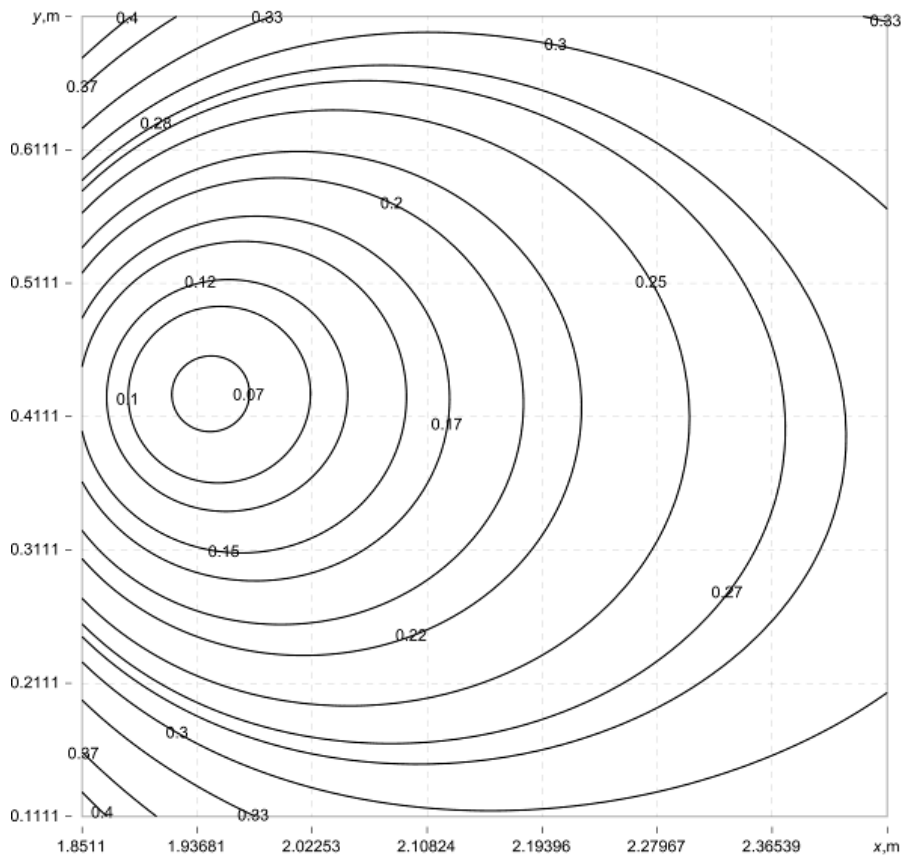


Рис.5. Результирующее магнитное поле при работе только активного экрана. ⁵

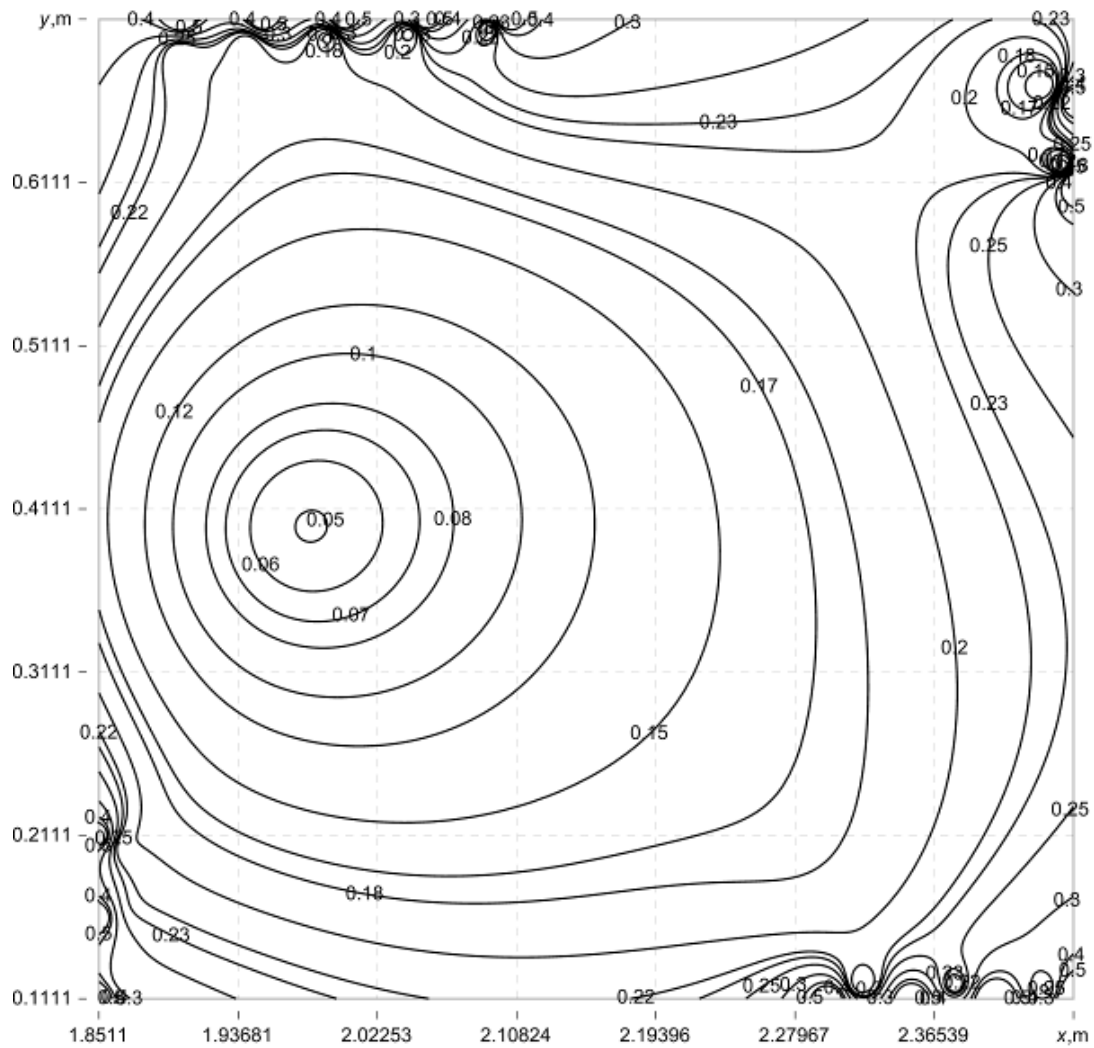


Рис.6. Результирующее магнитное поле при работе гибридного активно пассивного экрана.⁶



Рис.7. Схема расположения обмотки активного экрана и многоконтурного пассивного экрана.⁷



Рис.8. Многоконтурный пассивный экран экспериментальной установки гибридного активно- пассивного экранирования.⁸

^{6,7,8} Appendix 1

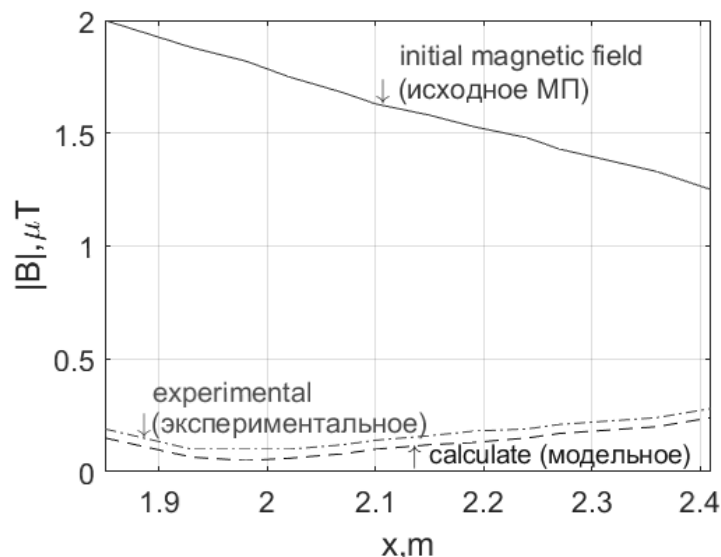


Рис. 9. Сравнение индукции исходного магнитного поля и магнитного поля при включенной гибридной системе активно-пассивного экранирования.⁹

Основное преимущество использования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана заключается в том, что с его помощью можно снизить уровень исходного магнитного поля на значительно большей площади экранирующего пространства по сравнению с использованием только активного экрана.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной частей, который характеризуется повышенной эффективностью снижения магнитного поля промышленной частоты, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки.

2. Задача проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана сведена к решению векторной игры, в которой вектор выигрышей вычисляется с помощью программных средств системы COMSOL Multiphysics. Решение этой игры вычисляется на основе алгоритмов мультиролевой мультиагентной стохастической оптимизации из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтений решений локальных игр.

3. В ходе проектирования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана для снижения магнитного поля промышлен-

ной частоты, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки, вычислены координаты пространственного расположения 16 контурных пассивных экранов и координаты пространственного расположения двух компенсационных обмоток, а также токи и фазы в этих обмотках активного экрана.

4. Основным преимуществом использования электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана, состоящего из активной и многоконтурной пассивной частей, является возможность снижения уровня начальной индукции магнитного поля в значительно большей области пространства экранирования по сравнению с использованием только активного экрана.

5. Практическое использование разработанного электромагнитного гибридного активно-пассивного экрана позволит снизить уровень магнитного поля, создаваемое воздушными линиями электропередачи с треугольным расположением фазных проводов в жилых домах старой застройки до безопасного уровня 0,5 мкТл для населения, проживающего вблизи ЛЭП.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. An example of residential buildings located in close proximity to the main double-circuit power transmission line.

²Fig. 2. A modern residential cottage located near a power line pylon.

³Fig. 3. The relative position of the 110 kV overhead power transmission line with a triangular arrangement of phase wires, two compensation windings and a shielding space.

⁴Fig. 4. The resulting magnetic field when multi-loop passive shield only.

⁵Fig. 5. The resulting magnetic field when active shield only.

⁶Fig. 6. The resulting magnetic field during operation of the hybrid active-passive shield.

⁷Fig. 7. The layout of the winding of the active shield and multiloop passive shield.

⁸Fig. 8. Multiloop passive shield of the experimental installation of hybrid active-passive shielding.

⁹Fig. 9. Comparison of the induction of the initial magnetic field and the magnetic field with the hybrid active-passive shielding system switched on.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] *The World Health Organization, "The International EMF Project" / Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization // Geneva, Switzerland. – 1996. – 2 p. Available at: <http://www.who.int/emf/> (accessed 23.06.2023))**Global Cancer Statistics: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. Enhanced Reader (2020).* (accessed 28-02-2023).
- [2] *International Agency for Research on Cancer. IARC Classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as Possibly Carcinogenic to Humans; Press Release No 2008; International Agency for Research on Cancer: Lyon, France, 2011.*
- [3] *Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields), Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>. (accessed 23.06.2023).*
- [4] *IEEE Standards Coordinating Committee 28. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz. New York, NY, IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002 (IEEE Std C95.6-2002).*
- [5] Grellier James, Ravazzani Paolo, Cardis Elisabeth. Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe, *Environment International*, Volume 62, January 2014, Pages 55–63, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.017>. (accessed 23.06.2023).
- [6] Salceanu A., Paulet M., Alistar B.D., Asimincesei O. Upon the Contribution of Image Currents on the Magnetic Fields Generated by Overhead Power Lines. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. 2019. doi: 10.1109/sielmen.2019.8905880. (accessed 23.06.2023).
- [7] Del-Pino-López J., Cruz Romero P. Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 4, pp. 2659–2667. doi: 10.1109/tpwrd.2011.2158593. (accessed 23.06.2023).
- [8] Ghanim Thiab Hasan, Kamil Jadu Ali, Ali Hlal Mutlaq. The Influence of the Mixed Electric Line Poles on the Distribution of Magnetic Field. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. Vol. 10, No. 2, June 2022, pp. 292–301. ISSN: 2089-3272, doi: 10.52549/ije.i.v10i2.3572. (accessed 23.06.2023).
- [9] Mary S. Victoria, Sugumaran C. Pugazhendhi. Investigation on magneto-thermal-structural coupled field effect of nano coated 230 kV busbar. 2020, IOP Publishing Ltd., *Physica Scripta*, Volume 95, Number 4. doi: 10.1088/1402-4896/ab6524. (accessed 23.06.2023).
- [10] Working group C4.204, Int. Council Lucio Ippolito, Pierluigi Siano. Using multi-objective optimal power flow for reducing magnetic fields from power lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 68 (2004) pp. 93–101.
- [11] Barsali S., Giglioli R., Poli D. Active shielding of overhead line magnetic field: Design and applications. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 110, pp. 55–63. doi: 10.1016/j.epsr.2014.01.005. (accessed 23.06.2023).
- [12] Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 2009–2016.
- [13] Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9 CHLIE)*, Marbella (Málaga, Spain), 2005, pp. 84–99.
- [14] Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*, 2019, vol.12, no.7, pp. 1332–1332. doi: 10.3390/en12071332. (accessed 23.06.2023).
- [15] Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 1–4. doi:

- 10.1109/tmag.2014.2354515. (accessed 23.06.2023).
- [16] Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, vol. 56, pp. 97–106. doi: 10.3233/jae-172286. (accessed 23.06.2023).
- [17] Canova Aldo, Giaccone Luca. High performance magnetic shielding solution for elf sources. *24th International Conference On Electricity Distribution Glasgow, 12-15 June 2017*. Paper 1029. pp. 1–5.
- [18] Canova Aldo, Giaccone Luca, Cirimele Vincenzo. Active and passive shield for aerial power lines. *25th International Conference on Electricity Distribution*. Madrid, 3–6 June 2019. Paper n°1096, pp.1–5.
- [19] Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Proc. IEEE Int. Symp. On Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, USA, 2002. – pp. 222–226.
- [20] Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2–7. doi: 10.1049/ip-smt:20040002. (accessed 23.06.2023).
- [21] Celozzi S., Garzia F. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques. *Environmental Risk 2003*, WIT Press, Southampton (UK). – 2003. – pp. 64–73.
- [22] Popov, E. Tserne, S. Zhyla, V. Volosyuk, V. Pavlikov, and N. Ruzhentsev. “Invariant polarization signatures for recognition of hydrometeors by airborne weather radars,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13956, 2023, Springer, Cham, pp. 1–14.
- [23] Sushchenko O. “Algorithms for Design of Robust Stabilization Systems,” in. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol.13375, 2022, Springer, Cham, pp. 198–213. doi: 10.1007/978-3-031-10522-7_15. (accessed 23.06.2023).
- [24] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Practical imaging algorithms in ultra-wideband radar systems using active aperture synthesis and stochastic probing signals,” in *Radioelectronic and computer systems*, vol.105, issue 1, 2023, pp. 55–73. doi: 10.32620/reks.2023.1.05. (accessed 23.06.2023).
- [25] Havrylenko O., Dergachov K., Pavlikov V., Zhyla S., Shmatko O. “Decision Support System Based on the ELECTRE Method,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 295–304. doi: 10.1007/978-981-19-2211-4_26. (accessed 23.06.2023).
- [26] Solomentsev O. “Method of Optimal Threshold Calculation in Case of Radio Equipment Maintenance,” in *Data Science and Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 462, 2022, Springer, Singapore, pp. 69–79. doi: 10.1007/978-981-19-2211-4_6. (accessed 23.06.2023).
- [27] Shmatko O., Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E.. “Synthesis of the optimal algorithm and structure of contactless optical device for estimating the parameters of statistically uneven surfaces,” in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 4, 2021, pp. 199–213. doi: 10.32620/reks.2021.4.16. (accessed 23.06.2023).
- [28] Volosyuk V., Zhyla S., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Optimal Method for Polarization Selection of Stationary Objects Against the Background of the Earth’s Surface,” in *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 68, issue. 1, 2022, pp. 83–89. doi: 10.24425/ijet.2022.139852. (accessed 23.06.2023).
- [29] Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Volosyuk V., Tserne E., Popov A.. “Radio-Heat Contrasts of UAVs and Their Weather Variability at 12 GHz, 20 GHz, 34 GHz, and 94 GHz Frequencies,” in *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol 20, issue 2, 2022, pp. 163–173. doi: 10.37936/ecti-eec.2022202.246878. (accessed 23.06.2023).
- [30] Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam University Press, 2010. 174 p.
- [31] Ray T., Liew K.M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization. *Engineering Optimization*, 2002, vol. 34, no. 2, pp. 141–153. doi: 10.1080/03052150210915. (accessed 23.06.2023).
- [32] Xiaohui Hu., Eberhart R.C., Yuhui Shi. Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS’03* (Cat. No. 03EX706). doi: 10.1109/sis.2003.1202267. (accessed 23.06.2023).
- [33] Dergachov K., Havrylenko O., Pavlikov V., Popov A., Zhyla S. “GPS Usage Analysis for Angular Orientation Practical Tasks Solving,” *2022 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications*. Science and Technology, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1–6.
- [34] Zhyla S., Volosyuk V., Pavlikov V., Ruzhentsev N., Tserne E., Popov A. “Statistical synthesis of aerospace radars structure with optimal spatio-temporal signal processing, extended observation area and high spatial resolution,” in *Radioelectronic and computer systems*, issue. 1,

2022, pp. 178–194.
doi: 10.32620/reks.2022.1.14. (accessed 23.06.2023).

- [35] Hashim F.A., Hussain K., Houssein E.H., Mabrouk M.S., and Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 2021, vol. 51, pp. 1531–1551. doi: 10.1007/s10489-020-01893-z. (accessed 23.06.2023).

- [36] Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*. Cambridge University Press, 2009. 504 p.

- [37] Zilzter Eckart. *Evolutionary algorithms for multiobjective optimizations: methods and applications*. Ph. D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. 114 p.

Сведения об авторах.



Кузнецов Борис Иванович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез электродинамических систем автоматического управления высокой точности, системы активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0002-1100-095X
E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com



Куценко Александр Сергеевич
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез автоматизированных систем управления высокой точности.
ORCID: 0000-0001-6059-3694
E-mail: oleksandr.kutsenko@khpi.edu.ua



Никитина Татьяна Борисовна
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, область научных интересов: синтез систем автоматического управления повышенной точности.
ORCID: 0000-0002-0185-3078
E-mail: tatjana55555@gmail.com



Бовдуй Игорь Валентинович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез систем автоматического управления высокой точности, системы активного компенсирования МП промышленной частоты.
ORCID: 0000-0003-3508-9781
E-mail: ibovduj@gmail.com



Чунихин Константин Вадимович
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, область научных интересов: моделирование электромагнитных процессов, синтез систем активного компенсирования МП промышленной частоты.
ORCID: 0000-0001-9822-5870
E-mail: kvchunikhin@gmail.com



Добродеев Павел Николаевич
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного Национальной академии наук Украины, кандидат технических наук, с.и., область научных интересов: синтез систем активного компенсирования магнитного поля промышленной частоты.
ORCID: 0000-0002-2648-0319
E-mail: Dobrodeyev@nas.gov.ua

Intelligent System of Relay Protection of Electrical Network 6-10 kV with the Implementation of Automatic Correction of the Operation Set Point

Shilin A.A., Dement'ev S.S., Dikarev P.V.
 Volgograd State Technical University
 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to develop the architecture and working algorithm of intelligent relay protection of an electrical network with an isolated neutral. "Intellectualization" of relay protection is necessary to increase its sensitivity and reliability. This problem is relevant due to the accident rate of overhead power lines and incorrect operation of traditional relays. This is due to the fact that the set point is not adjusted according to the deviation of the line parameters with changing environmental and load conditions. The purpose of the study is achieved by solving the following problems: the concept of supplementing an electronic relay with a mechanism for correcting the operation set point is proposed. The use of the digital shadow of the electrical network is substantiated. The digital shadow interrogates the sensor system. The advantage of using a digital shadow as part of relay protection has been proven. This allows emulating faults and estimating currents to correct the setpoint. The most significant result of the study is an example of the implementation of intelligent relay protection using a digital shadow in the form of an artificial neural network. The application of a neural network for approximating the current function of a two-phase short circuit is demonstrated. The significance of the results lies in the improvement of the sensitivity and selectivity of current protection due to the digital shadow for working out emergency modes. The convenience of operating and reproducing a digital shadow in the form of a neural network is noted.

Keywords: power supply reliability, relay protection and automation, digital shadows, artificial neural networks, adaptive systems, smart grid.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.02>

UDC: 621.315.17

Sistem inteligent de protecție cu relee a rețelei electrice 6-10 kV cu implementarea corectării automate a setării de preluare

Șilin A.A., Dementiev S.S., Dikarev P.V.
 Universitatea tehnică de Stat din Volgograd
 Volgograd, Federația Rusă

Rezumat. Scopul studiului este de a elabora arhitectura și algoritmul de lucru al unui sistem inteligent de protecție cu relee ale rețelei electrice cu neutru izolat. „Intellectualizarea” protecției cu relee este necesară pentru a crește sensibilitatea și fiabilitatea acesteia. Această problemă este relevantă din cauza ratei de accidentare a liniilor electrice aeriene și a funcționării incorecte a releelor tradiționale. Acest lucru se întâmplă din cauza incapacității de a regla curentul de setare a releului în conformitate cu abaterea parametrilor primari ai liniei de alimentare atunci când se schimbă condițiile de mediu și puterea transmisă. Scopul studiului se realizează prin rezolvarea următoarelor probleme: se propune conceptul de completare a protecției clasice de curent, realizată pe baza unui releu electronic, cu un mecanism de corectare adaptivă a punctului de referință de declanșare. Este fundamentată utilizarea umbrei digitale a rețelei electrice. Umbra digitală interoghează sistemul de senzori. Avantajul utilizării unei umbre digitale ca parte a protecției releului a fost dovedit. Acest lucru permite emularea defecțiunilor și estimarea curenților pentru a corecta valoarea de referință. Cel mai semnificativ rezultat al studiului este un exemplu de implementare a protecției releului inteligent folosind o umbră digitală sub forma unei rețele neuronale artificiale. Este demonstrată aplicarea unei rețele neuronale pentru aproximarea funcției curente a unui scurtcircuit bifazat. Semnificația rezultatelor constă în îmbunătățirea sensibilității și selectivității protecției curentului datorită umbrei digitale pentru elaborarea modurilor de urgență. Se remarcă comoditatea operațiunii și reproducerii unei umbre digitale sub forma unei rețele neuronale.

Cuvinte-cheie: fiabilitatea sursei de alimentare, protecția și automatizarea cu relee, umbre digitale, rețele neuronale artificiale, sisteme adaptive, rețele activ-adaptative.

Интеллектуальная система релейной защиты электрической сети 6-10 кВ с реализацией автоматической коррекции уставки срабатывания

Шилин А.А., Дементьев С. С., Дикарев П.В.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке архитектуры и алгоритма функционирования интеллектуальной системы релейной защиты электрической сети с изолированной нейтралью. Важность «интеллектуализации» релейной защиты объясняется необходимостью повышения её чувствительности и надёжности срабатывания. Данная проблема не теряет свою актуальность ввиду высокой аварийности воздушных линий электропередачи и частых случаев некорректной работы релейной защиты традиционной конфигурации. Это происходит ввиду отсутствия возможности настройки тока уставки реле в соответствии с отклонением первичных параметров линии электропередачи при изменении условий окружающей среды и передаваемой мощности. Поставленная цель исследования достигается решением следующих задач: в статье предложена концепция дополнения классической токовой защиты, выполненной на основе электронного реле, механизмом адаптивной коррекции уставки срабатывания. Для реализации данного механизма обосновано применение цифровой тени электрической сети, «следующей» за ней исходя из результатов опроса распределённой системы датчиков. Доказано преимущество использования цифровой тени в составе структуры релейной защиты, что позволяет эмулировать любые виды переходных процессов с учётом текущих параметров сети и оценивать токи короткого замыкания для отстройки срабатывания реле. Наиболее существенным результатом исследования является пример технической реализации интеллектуальной системы релейной защиты, использующей цифровую тень электрической сети в виде искусственной нейронной сети. При помощи нейросимулятора продемонстрированы все этапы применения нейронной сети: выбор количества нейронов в скрытом слое персептрона, подготовка данных для обучения, процесс обучения нейронной сети и её тренировки с целью аппроксимации многомерной функции тока двухфазного короткого замыкания. Значимость полученных результатов заключается в возможности существенного улучшения чувствительности и обеспечения селективности токовой защиты электрической сети посредством применения цифровой тени для отработки аварийных режимов. Отмечается удобство оперирования цифровой тенью и лёгкость её воспроизведения при реализации в виде нейросети.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, релейная защита и автоматика, цифровые тени, искусственные нейронные сети, адаптивные системы, активно-адаптивные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим систему релейной токовой защиты магистральной электрической сети с изолированной нейтралью (рис. 1) от всех видов многофазных коротких замыканий (КЗ) К (в том числе с замыканием на землю). Проанализируем абсолютно селективную защиту (срабатываемую без задержки - токовую отсечку - исключительно на защищаемом участке сети), основным измерительным органом которых является орган тока ТА. Входная воздействующая величина - ток измерительных трансформаторов тока ТА. Параметр срабатывания - ток срабатывания реле - наименьшее значение тока в органе, при котором он устойчиво срабатывает [1].

Очевидно, что ток уставки реле выбирается исходя из наиболее «тяжелого» для идентификации режима короткого замыкания, отличающегося наименьшим током.

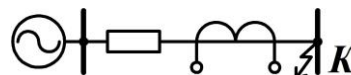


Рис. 1. Схема системы релейной защиты.¹

Подобный режим имеет место при коротком замыкании двух фаз К⁽²⁾ в самом конце защищаемого участка, как это показано на рис. 1. При этом для улучшения чувствительности в качестве тока, от которого отстраивается система защиты, будем рассматривать ток двухфазного короткого замыкания с замыканием фаз на землю. Т.е. учтём переходное сопротивление металлического смыкания проводов (0,1 Ом), а также переходное сопротивление земли (не более 5 Ом), что, согласно статистическим данным приводимым в [2], имеет место в 80 % случаев аварий, связанных с падением проводов на землю.

Не менее очевидным является и факт того, что точность вычисления тока КЗ напрямую влияет на чувствительность и точность срабатывания защиты. В классическом варианте исполнения защиты, описываемом в

¹ Appendix 1

[3, 4], ток КЗ рассчитывается единожды на основании табличных данных, касающихся погонных параметров проводов. Между тем, как это было показано ранее в [5, 6], продольные и поперечные параметры линии прямой и нулевой последовательностей достаточно изменчивы, изменчива и нагрузка электрической сети – всё это в конечном счёте обуславливает и изменчивость тока КЗ, используемого для отстройки защиты, т.е. довольно сильно влияет на точность её функционирования. Исходя из этого можно прийти к выводу о том, что улучшить качество работы релейной защиты возможно за счёт динамичной уставки, обновляемой с заданным промежутком времени с учётом актуализированной модели линии.

Всё сказанное наталкивает на необходимость использования цифровой тени электрической сети. Корпорация Microsoft определяет цифровую тень объекта как «систему связей и зависимостей, описывающей поведение физического объекта, получаемой с реального объекта при помощи IoT» (сети физических устройств, которые подключены к другим устройствам и службам через Интернет или другую сеть и обмениваются с ними данными) [7]. На практике цифровая тень электрической сети (подобно тому, как данная технология реализуется в промышленности [8-13] и городском хозяйстве [14]) может быть создана посредством опроса устанавливаемых на трассе линии датчиков (температуры проводов, гололёдообразования и т.д.), инкорпорированных в SCADA-систему. Следовательно, можно с полной уверенностью сказать, что применение цифровой тени «интеллектуализует» систему релейной защиты, а именно наделяет её способностью к адаптивному «поведению». Данный подход принципиальным образом отличается от изложенных в [15, 16, 17] и ряда других публикаций концепций защит нового поколения, не подразумевающих сбор оперативной информации об изменении электрических параметров защищаемой линии.

На рис. 2 показана блок-схема алгоритма функционирования предлагаемой системы релейной защиты. Как видно, левая часть блок-схемы описывает стандартный порядок действий при срабатывании токового реле: если ток, фиксируемый с помощью

трансформаторов тока TA превышает уставку реле, то происходит отключение линии [3, 4].

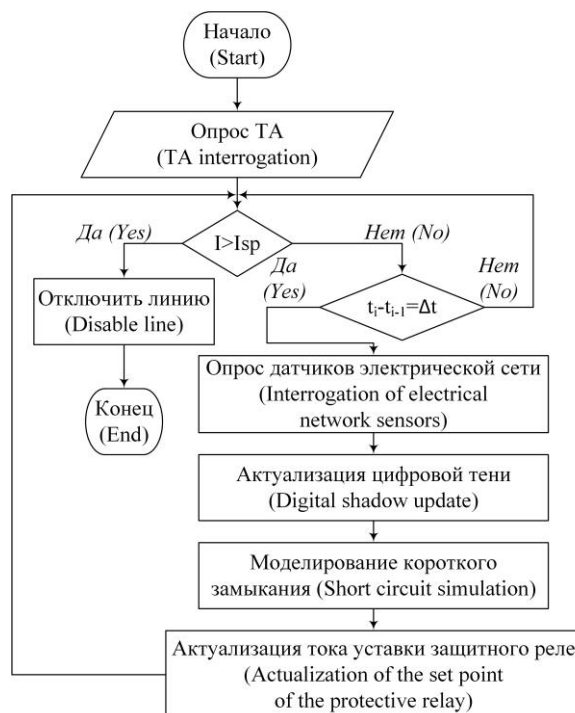


Рис. 2. Алгоритм функционирования системы защиты с коррекцией тока уставки срабатывания.²

Механизм коррекции уставки показан справа: с заданным промежутком времени Δt выполняется опрос датчиков электрической сети, выполняется актуализация цифровой тени (тем самым обеспечивается «движение» цифровой тени за реальным объектом), моделируется интересующий режим короткого замыкания – двухфазного с замыканием на землю – результатом чего становится получение более точного значения тока КЗ для коррекции уставки; скорректированное значение уставки (set point – SP) принимается в качестве опорного значения I_{sp} .

Таким образом, промежуток времени Δt есть ничто иное, как тот отрезок времени, в течение которого оператор сети считает состояние линии и её нагрузку неизменными (условно говоря, это «срок годности» сформированной модели сети, промежуток времени, в течение которого данная модель актуальна или же – шаг, на который реальный объект удаляется от своей цифровой тени).

Аппаратное воплощение системы, реализующей данный алгоритм, показано на рис. 3.

Представленная схема ещё раз указывает на тот факт, что цифровая тень электрической

² Appendix 1

сети «живёт» в виде подпрограммы, исполняемой центральным компьютером; в целом программное обеспечение компьютера подразумевает выполнение действий, связанных с актуализацией цифровой тени, моделирование на ней переходного режима, определение тока уставки и передачи данного значения на электронное реле. Также возможна и реализация на аппаратном уровне исполнительской части данной системы в виде полноценной компьютерной релейной защиты, подобно тому, как это описывается в

фундаментальной монографии Фадке и Горпа [18].

Что на практике представляет из себя цифровая тень, каким образом она может быть реализована? Например, цифровая тень может быть задана в виде модели электрической сети, созданной в среде Matlab Simulink (рис. 4). Проанализируем её основные элементы.

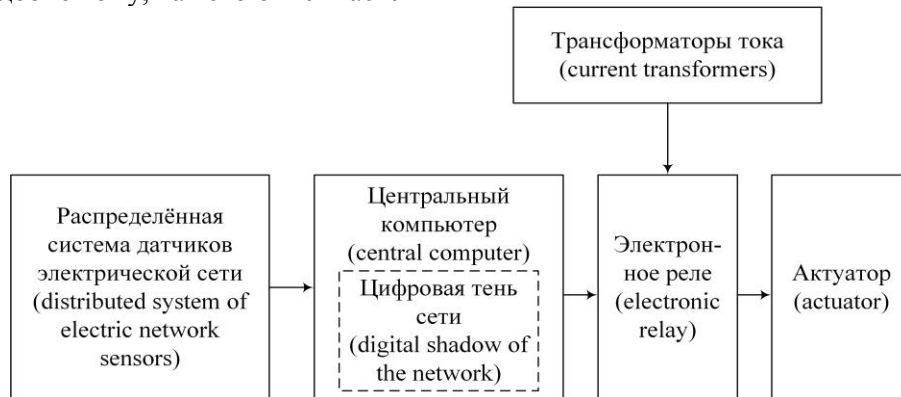


Рис. 3. Структурная схема системы защиты с коррекцией тока уставки с механизмом адаптивной коррекции тока уставки.³

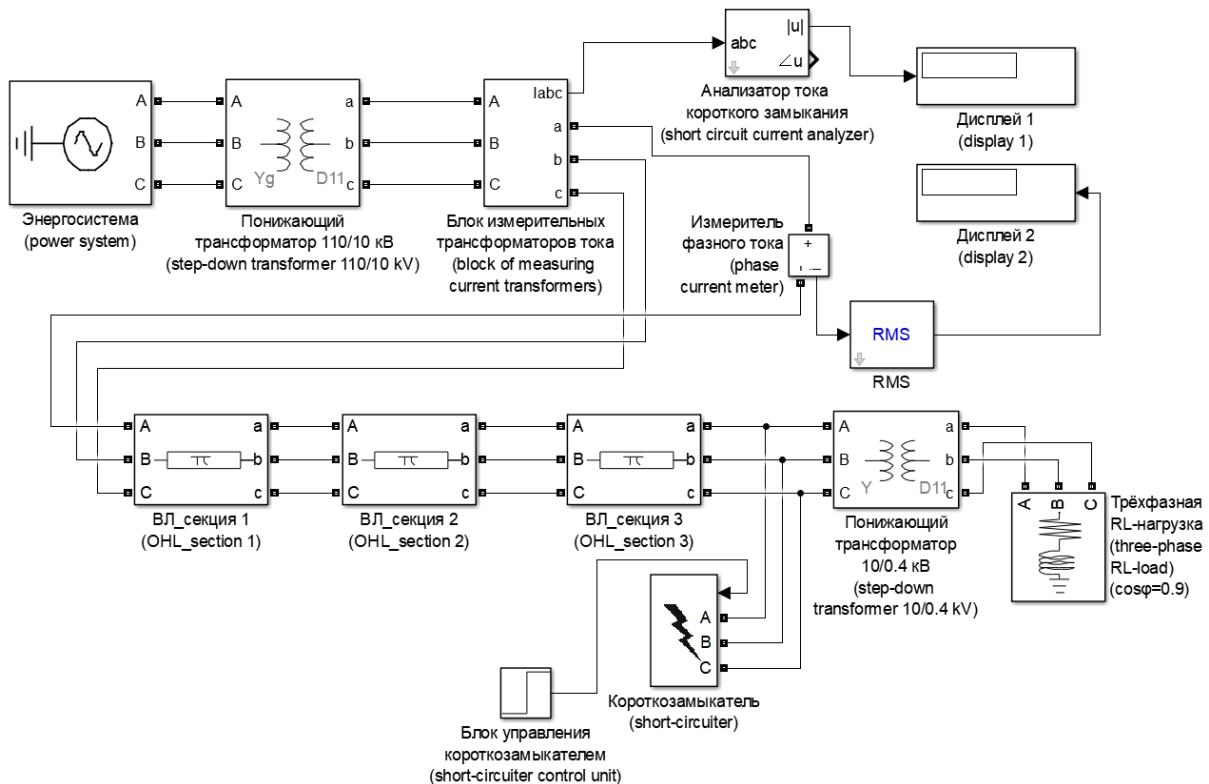


Рис. 4. Модель электрической сети в среде Simulink для эмуляции переходных режимов.⁴

Реальная линия электропередачи представляет собой неоднородную линию, продольные и поперечные параметры которой с расстоянием могут изменяться (например, вследствие разного нагрева проводов и степени гололёдообразования из-за различающихся условий внешней среды, рельефа и т.д.), что тем не менее при инженерном анализе практически не учитывается.

Повышение точности срабатывания релейной защиты требует максимально возможного учёта перечисленных факторов, обуславливающих неоднородность линии.

Для более полного приближения к реальному объекту линию можно представить в виде совокупности нескольких условно однородных участков – в данном случае трёх секций (ВЛ_секция 1, ВЛ_секция 2, ВЛ_секция 3), каждая из которых имеет П-образную схему замещения с сосредоточенными параметрами. Короткозамыкатель управляется внешним сигналом генератора (блок управления короткозамыкателя) и настроен на замыкание фаз А, В и земли с переходным сопротивлением 0,1 Ом между проводами и 5 Ом при замыкании проводов на землю.

Следовательно, обновляя с промежутком времени Δt параметры модели – цифровой тени (задавая отклонения относительно средних (начальных или номинальных) параметров активных сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей трёх секций прямой и нулевой последовательностей, а также тока нагрузки) и эмулируя затем короткое замыкание в конце защищаемой линии, можно получать более точные значения тока КЗ, используемого для задания уставки срабатывания, т.е. корректировать уставку электронного реле (см. рис. 2, 3) исходя из изменения условий окружающей среды, а также электропотребления в сети.

Повторимся, что, как известно из [5, 6], изменения условий окружающей среды приводят к отклонению параметров линии, вследствие чего, выполняя опрос соответствующих датчиков, возможна коррекция параметров каждой из трёх секций, составляющих линию. Таким образом, применение технологии цифровой тени способствует адаптивности системы релейной защиты, повышению её чувствительности и селективности.

Между тем необходимо отметить, что оперирование моделью, представленной на рис. 4, требует достаточно весомых вычислительных ресурсов. При этом фактически цифровая тень призвана реализовывать многомерную функцию тока КЗ (short circuit – SC) $I_{SC}(\delta R_1, \delta R_2, \delta R_3, \delta L_{11}, \delta L_{10}, \delta L_{21}, \delta L_{20}, \delta L_{31}, \delta L_{30}, \delta C_{11}, \delta C_{10}, \delta C_{21}, \delta C_{20}, \delta C_{31}, \delta C_{30}, \delta I_{load})$, где $\delta R_1, \delta R_2, \delta R_3$ – отклонения (в %) активных сопротивлений 1-3 секций соответственно (считая равными отклонения активного сопротивления прямой и нулевой последовательностей), $\delta L_{ij}, \delta C_{ij}$ – отклонения (в %) индуктивностей и ёмкостей соответственно i -й секции прямой ($j=1$) или нулевой ($j=0$) последовательностей, δI_{load} – отклонение (в %) тока нагрузки (load) от номинального.

Данная функция может быть с лёгкостью аппроксимирована с использованием искусственной нейронной сети – благодаря этому, представляя цифровую тень в качестве обученной нейросети (на множестве из порядка 1000 примеров – комбинаций значения выходного параметра I_{SC} и соответствующих ему значений входных параметров $\delta R_1, \delta R_2$ и т.д.), достигается значительная экономия вычислительных ресурсов центрального компьютера (рис. 3) и упрощение исполняемой программы без существенной потери точности.

Следует отметить, что в целом аппроксимация функции I_{SC} возможна на основании следствия из теоремы Колмогорова – Арнольда – Хехт-Нильсена, согласно которому возможна представимость любой многомерной функции нескольких переменных с помощью нейронной сети фиксированной размерности [19, 20]. Теория использования нейронной сети с прямой связью в качестве аппроксиматора сколь угодно сложных функций изложена в работе Джорджа Цыбенко [21].

Рассмотрим реализацию искусственной нейронной сети, а именно многослойного перцептрона, в программном пакете Statistica Neural Networks (SNN). Ключевым моментом при проектировании перцептрона является выбор количества внутренних слоёв и числа нейронов в них.

Несмотря на то, что строгой методики подбора количества слоёв в сети не

существует (предполагается эмпирическая оценка – задание сетей нескольких конфигураций, после чего исходя из погрешности на тестовых выборках выполняется выбор оптимальной), оценить количество нейронов в скрытых слоях возможно.

Например, анализ количества необходимого числа синаптических весов L_w в многослойной сети с сигмоидальными периодическими функциями реализуется по следующей формуле [20, 22]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \cdot \left(\frac{N}{m} + 1 \right) \cdot (n + m + 1) + m, \quad (1)$$

где n – размерность входного вектора значений, m – размерность выходного вектора, N – число элементов обучающей выборки.

Оценив необходимое число весов, можно рассчитать число нейронов в скрытых слоях. Скажем, для сети с одним скрытым слоем это число L составит [20]:

$$L = \frac{L_w}{n + m}, \quad (2)$$

В [20] приводятся и другие аналогичные соотношения:

$$2(n + L + m) \leq N \leq 10(n + L + m), \quad (3)$$

$$\frac{N}{10} - n - m \leq L \leq \frac{N}{2} - n - m. \quad (4)$$

В любом случае, повторимся, что выбор внутренней архитектуры многослойного персептрона является задачей, решаемой эмпирически, путём анализа и подбора, т.к. строгой теории относительно построения подобных сетей на сегодняшний день нет [19-23].

При этом пакет SNN предлагает опцию «совета» (advise), согласно которому, по мнению программы, оптимальной для нашей задачи (16 входных параметров и 1 выходной) при использовании персептрона с одним внутренним слоем является конфигурация с 8-ью нейронами в скрытом слое (рис. 5). Стоит отметить, что данная конфигурация нейросети соответствует эмпирическому «правилу пирамиды», упоминаемому в [22].

Процесс обучения нейронной сети по «учебнику» (табл. 1), составленному

посредством эмуляции интересующего нас вида КЗ на модели Simulink при различных значениях отклонений параметров линии и нагрузки, происходит достаточно быстро: уже с 20-й «эпохи» обучения по методу обратного распространения ошибки погрешность стабильно опускается ниже 0,1.

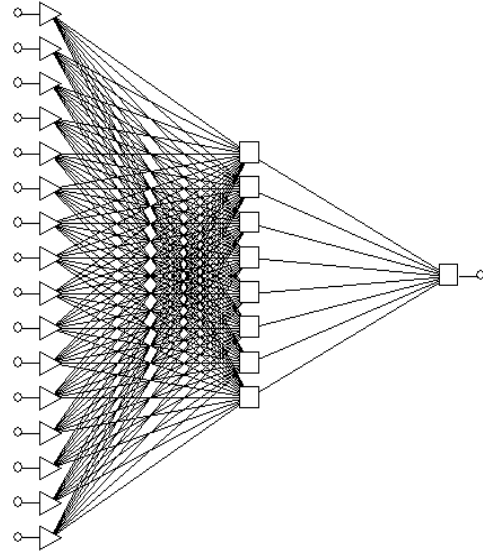


Рис. 5. Многослойный персептрон (MLP) для аппроксимации функции двухфазного КЗ с замыканием на землю в конце линии.⁵

Таблица 1.⁶

Три примера из обучающей выборки нейронной сети.⁷

Параметр (parameter)	Значение (value)		
Вход (input)			
$\delta R_1, \%$	4,93	13,49	8,41
$\delta R_2, \%$	2,07	7,76	18,80
$\delta R_3, \%$	12,84	13,33	14,94
$\delta L_{11}, \%$	2,75	8,64	21,39
$\delta L_{10}, \%$	1,65	14,07	12,45
$\delta L_{21}, \%$	9,79	13,77	12,64
$\delta L_{20}, \%$	8,40	12,42	15,32
$\delta L_{31}, \%$	6,43	16,11	14,09
$\delta L_{30}, \%$	7,25	14,31	5,09
$\delta C_{11}, \%$	2,71	17,07	6,51
$\delta C_{10}, \%$	11,20	13,64	17,95
$\delta C_{21}, \%$	12,49	18,67	16,21
$\delta C_{20}, \%$	13,16	15,92	10,70
$\delta C_{31}, \%$	4,85	15,02	13,29
$\delta C_{30}, \%$	2,35	9,73	19,34
$\delta I_{load}, \%$	11,88	9,59	7,65
Выход (output)			
I_{sc}, A	1482	1414	1407

^{5,6,7} Appendix 1

Обученная нейронная сеть демонстрирует минимальную погрешность (не более 0.17 %) на тренировочной выборке (предъявляемой нейросети выборке, не входившей в состав учебной).

Используя программный пакет NeuroPro, можем задать ту же конфигурацию нейронной сети и после обучения сети на том же учебнике оценить значимость каждого из её входов.

Кроме того, программа NeuroPro позволяет вербализовать созданную нейронную сеть. Опция вербального описания нейронной сети является чрезвычайно ценной, т.к. позволяет с лёгкостью перенести математическое описание нейронной сети, сгенерированной и обученной на персональном компьютере, в программный код, исполняемый любым другим маломощным устройством, будь то одноплатным компьютером или микроконтроллером, наделяя это устройство функционалом нейросетевой обработки данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простейшая токовая релейная защита, выполненная на основе электронного реле, может быть усовершенствована посредством внедрения адаптивного механизма коррекции уставки срабатывания для улучшения чувствительности реагирования при КЗ на самых дальних рубежах защищаемой линии. Это достигается путём моделирования КЗ на цифровой тени электрической сети, «следующей» за реальной сетью путём актуализации информации о её состоянии за счёт опроса датчиков сети (т.к. влияние окружающей среды, фиксируемое датчиками температуры провода, гололёдообразования и т.д. оказывает непосредственное воздействие на колебания продольных и поперечных параметров линии, не говоря о естественном износе проводов и линии в целом) и отстройки защиты от непрерывно обновляемого с заданными промежутком времени значения аварийного тока. При этом цифровая тень может быть выполнена в виде искусственной нейронной сети, реализующей в соответствии с теоремой Колмогорова – Арнольда – Хехт-Нильсена с достаточно высокой точностью многомерную функцию - в данном случае функцию зависимости тока двухфазного КЗ с замыканием на землю в

конце линии от отклонений значений параметров сети от номинальных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 38/468-22.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Relay protection system diagram.

²Fig. 2. Functioning algorithm of the protection system with correction of the tripping current.

³Fig. 3. Structural diagram of a protection system with setpoint current correction with a mechanism for adaptive setpoint current correction.

⁴Fig. 4. Electrical network model in the Simulink environment for transient emulation.

⁵Fig. 5. Multilayer perceptron (MLP) for approximating the function of a two-phase short circuit with an earth fault at the end of the line.

^{6,7}Table 1. Three examples from the training set of the neural network.

Литература (References)

- [1] Bass E.I., Doroguncev V.G., Relejnaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection of electric power systems]. Moscow, 2002. 296 p. (In Russian)
- [2] Kozlov V.K., Kirzhackih E.R., Giniatullin R.A., Issledovanie vliyaniya perekhodnogo soprotivleniya na opredelenie mesta odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'nyh setyah s izolirovannoj nejtral'yu [Investigation of the influence of transient resistance on determining the location of a single-phase earth fault in distribution networks with an isolated neutral]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Elektrotehnika i energetika*, 2019, no. 1, pp. 39-46. (In Russian)
- [3] Kop'ev V.N. Relejnaya zashchita [Relay protection]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2011, 160 p. (In Russian)
- [4] Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Relejnaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection of electric power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1992, 528 p. (In Russian)
- [5] Morgan V.T. Thermal behaviour of electrical conductors: steady, dynamic and fault-current ratings. New York, Research Studies Press, 1991. 741 p.
- [6] Shilin A.N., Shilin A.A., Dikarev P.V., Ahmedova O.O. Intellektual'naya relejnaya zashchita [Intelligent Relay Protection]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 30-37. (In Russian)
- [7] Grabchak E., Medvedeva E. Cifrovye dvojniki i cifrovye teni v elektroenergetike [Digital twins and digital shadows in the power industry]. *Cifrovaya podstanciya*. (In Russian). Available: <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovye-dvojniki-i-tsifrovye-teni-v-elektroenergetike/>. (accessed 22.06.2023).

- [8] El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87-92.
- [9] Qia Q., Taa F., Zuo Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing. Procedia CIRP, 2018, no. 72, pp. 237-242.
- [10] Palensky P., Cvetkovic M., Gusain D., Joseph A. Digital twins and their use in future power systems. Available at: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17435.2>. (accessed 29.06.2023)
- [11] Wu J., Yang Y., Cheng X. The development of digital twin technology review. 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020, pp. 4901-4906.
- [12] Jain P., Poon J., Singh J.P. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. IEEE Trans Power Electron, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 940-956.
- [13] Melesse T.Y., Di Pasquale V., Riemma S. Digital twin models in industrial operations: a systematic literature review. Procedia Manufacturing, 2020, vol. 42, pp. 267-272.
- [14] Deren L., Wenbo Y., Zhenfeng S. Smart city based on digital twins. Computational Urban Science, 2021, vol. 1, no. 4. Available at: <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y>. (accessed 29.06.2023)
- [15] Baohui Z., Zhiguo H., Zhiqian B. New development in relay protection for smart grid. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, vol. 1. Available at: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-016-0025-x>. (accessed 29.06.2023)
- [16] Umeda S., Matsuno A., Abe K., Hirao M., Takahashi M., Fukushima K., Kawano F., Ooku-bo M., Miyoshi T. New relay system supported to high confidence operating on real-time, The Papers of Technical Meeting on Power Protective Relay (PPR-09), 2009, pp. 45-50.
- [17] Kabalci E. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids. Measurement science review, 2013, vol. 13, no 5, pp. 248-252.
- [18] Phadke A.G., Thorp J.S. Computer relaying for power systems. Chichester, Wiley, 2009. 370 p.
- [19] Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximator, Neural Networks, 1989, vol. 2, pp. 359-366.
- [20] Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2002, 382 p. (In Russian)
- [21] Cybenko G.V. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, Mathematics of Control Signals and Systems, 1989, vol. 2, no. 4, pp. 303-314.
- [22] Masters T. Practical neural network recipes in C++. Boston, Academic Press Inc, 1993. 494 p.
- [23] Uhrig R.E. Introduction to artificial neural networks, Proc. of IECON-95 – 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 33-37. doi: 10.1109/IECON.1995.483329.

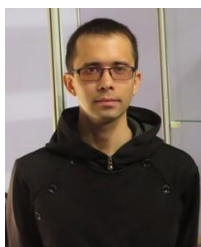
Сведения об авторах.



Шилин Алексей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: активно-адаптивные электрические сети, искусственные нейронные сети
E-mail: shilin.jr@gmail.com



Дикарев Павел Владимирович – преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: релейная защита и автоматика, энергоинформационные системы
E-mail: dikarev.pavel@mail.ru



Дементьев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).
Область научных интересов: информационно-измерительные и управляющие системы в электроэнергетике
E-mail: c165tc34@yandex.ru

Reduction of Overvoltages under Connection on a High-Voltage Cable Line Due to Optimal Controlled Switching

Lobodzinskiy V., Buryk N., Spinul L., Chibelis V., Illina O.

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract. The purpose of the work is to develop a mathematical model of a cable transmission line, which allows modeling and choosing the optimal conditions for controlled switching to limit overvoltage at the development and design stage. The goal is achieved by solving the problem of determining the initial angle of each phase, so that each phase has an initial switching angle equal to zero with a time delay. A high-voltage cable line for a voltage of 330 kV, implemented using Matlab, has been chosen as the object of study. The most significant result is the method of numerical simulation of the cable line that allows you to analyze transients when each phase of a three-phase cable line is connected to a three-phase source with a time delay, the switching angle of all phases is zero. This, in turn, makes it possible to limit switching overvoltages. The significance of the results obtained lies in the possibility of the proposed technique to choose the optimal conditions for controlled switching, which makes it possible to use it in the design of switching nodes, as well as the use of controlled switching to eliminate unwanted electrical transients during planned switching. The simulation results showed that the greatest effect of using numerical simulation is when each phase of a three-phase cable line is connected to a three-phase source with a time delay of 1/150 second, then the switching angle of all phases is zero, which makes it possible to limit switching overvoltages.

Keywords: three-phase cable line, switching overvoltage, transient processes, controlled switching, theory of multipoles, modeling of electrical engineering objects.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.03>

UDC: 621.315

Reducerea supratensiunilor la pornirea unei linii de cablu de înaltă tensiune datorită comutării controlate optime

Lobodzinskiy V., Burik N., Spânu L., Cibelis V., Illina O.

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este elaborarea unui model matematic al unei linii de transmisie prin cablu, care să permită modelarea și alegerea condițiilor optime de comutare controlată pentru limitarea supratensiunii în stadiul de elaborare și proiectare. Scopul a fost atins prin rezolvarea următoarelor probleme: determinarea unghiului inițial al fiecărei faze, astfel încât fiecare fază să aibă un unghi inițial de comutare egal cu zero cu o întârziere de timp. Ca obiect de studiu a fost aleasă o linie de cablu de înaltă tensiune pentru o tensiune de 330 kV, implementată cu ajutorul Matlab. Cele mai semnificative rezultate sunt metoda de simulare numerică a liniei de cablu care permite analiza proceselor tranzitorii la modificarea unghiului inițial de comutare al fiecărei faze, pentru a lua măsuri de limitare a supratensiunilor de comutare. Semnificația rezultatelor obținute constă în posibilitatea utilizării metodologiei propuse pentru alegerea condițiilor optime de comutare controlată, ceea ce face permite utilizarea acesteia în proiectarea nodurilor de comutare, precum și utilizarea comutației controlate pentru a elimina tranzitorii electrice nedoriți în timpul comutării planificate. Rezultatele simulării au arătat că cel mai mare efect al utilizării simulării numerice este atunci când fiecare fază a unei linii de cablu trifazate este conectată la o sursă trifazată cu o întârziere de 1/150 secunde, atunci unghiul de comutare al tuturor fazelor este de 1/150 secunde, atunci unghiul de comutare al tuturor fazelor este zero, ceea ce face posibilă limitarea supratensiunilor de comutare.

Cuvinte-cheie: linie de cablu trifazat, supratensiuni de comutare, tranzitorii, comutare controlată, teoria multipolului, modelarea obiectelor electrice.

Снижение перенапряжений при включении высоковольтной кабельной линии за счет оптимальной управляемой коммутации

Лободзинский В.Ю., Бурик Н.П., Спинол Л.Ю., Чибелис В.И., Иллино О.А.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина

Аннотация. Целью работы является разработка математической модели кабельной линии электропередачи, позволяющая моделировать и выбирать оптимальные условия управляемой коммутации для ограничения перенапряжения на стадии разработки и проектирования. Поставленная

цель достигается решением задачи определения начального угла каждой фазы, так чтобы каждая фаза имела начальный угол включения равный нулю с задержкой по времени. В качестве объекта исследования была выбрана высоковольтная кабельная линия на напряжение 330 кВ. Для решения практических задач при моделировании кабельной линии электропередачи в работе для исследования коммутационных переходных процессов используется схема замещения линии, состоящая из симметричного многополюсника, реализуемая с использованием Matlab. Наиболее существенным результатом является методика численного моделирования кабельной линии, что позволяет анализировать переходные процессы при изменении начального угла включения каждой фазы, для принятия мер ограничения коммутационных перенапряжений. Результаты моделирования показали, что при включении каждой фазы трехфазной кабельной линии в трехфазный источник с задержкой во времени, угол включения всех фаз равен нулю, это дает возможность ограничивать коммутационные перенапряжения. Синхронизация процессов коммутации осуществляется с напряжения фазы А и производится в последовательности А→В→С при коммутации трехфазной кабельной линии к генератору. Такие последовательности обусловлены стремлением к минимизации полного времени коммутации. Значимость полученных результатов состоит в возможностях с помощью предложенной методики выбирать оптимальные условия управляемой коммутации, что позволяет использовать её при проектировании коммутационных узлов, управляемых коммутаций для устранения нежелательных электрических переходных процессов при запланированных переключениях. Результаты моделирования показали, что наибольший эффект применения численного моделирования при включении каждой фазы трехфазной кабельной линии в трехфазный источник с задержкой во времени равно 1/150 секунды, то угол включения всех фаз равен нулю, что дает возможность ограничивать коммутационные перенапряжения.

Ключевые слова: трехфазная кабельная линия, коммутационные перенапряжения, переходные процессы, управляемая коммутация, теория многополюсников, моделирование электротехнических объектов.

INTRODUCTION

One of the modern methods of increasing the reliability and safety of high and ultra-high voltage power transmission cable lines is the use of cables with cross-linked polyethylene insulation, which is characterized by increased operational characteristics, especially in areas with dense construction and extensive communications.

When using ultra-high voltage cable lines, it is necessary to take into account the high-frequency transient processes of current and voltage, which arise as a result of commutative switches. It is extremely important to take into account the influence of this transitional process on the design requirements for the entire power transmission system [1-5].

Controlled switching, or synchronous switching, allows to reduce the load on the power line and switch during switching and minimize interference in the system. Thanks to this, the cable line lasts longer and wears out less. A smaller number of damages in the system (for example, repeated insulation breakdowns) increases the operational readiness of the power system. The switching operation (on and/or off, depending on the task to be performed) is carried out phase-selectively at predetermined switching angles [6-18].

It should be noted the great interest of the scientific community in the development and

research of high-voltage cable power lines. Both simulation mathematical models and physical prototypes of ultra-high-voltage cable lines were developed [19-24]. In works [25, 26, 30] studies of electromagnetic processes in a powerful power transmission system, in which a cable line of ultra-high voltage is used, different modes of operation are analyzed. Models have been developed to estimate the transient process when ultra-high voltage cable lines are turned on [27-29]. However, the scientific community pays little attention to the study of transient processes when changing the initial phase of switching on a high-voltage cable line.

This work is distinguished by the fact that elements of the theory of multipoles and numerical methods of mathematical modeling, implemented in the Matlab program, were used in the development of the high-voltage cable line model. This significantly simplifies both conducting numerical calculation studies and obtaining generalizing results.

On the basis of modeling and analysis of transient voltages and currents in three-phase circuits of the type of long cable power transmission lines, which have distributed parameters and interphase mutual inductive and capacitive couplings, it is possible to determine the features of the appearance of inherent electromagnetic oscillations under complex boundary conditions and commutations.

The setting of such a scientific task is justified by the modern tendency in theoretical electrical engineering to consider multiphase electric circuits as a series-parallel connection of

various n-poles, which ensures an increase in the efficiency of the calculation of transient electromagnetic processes.

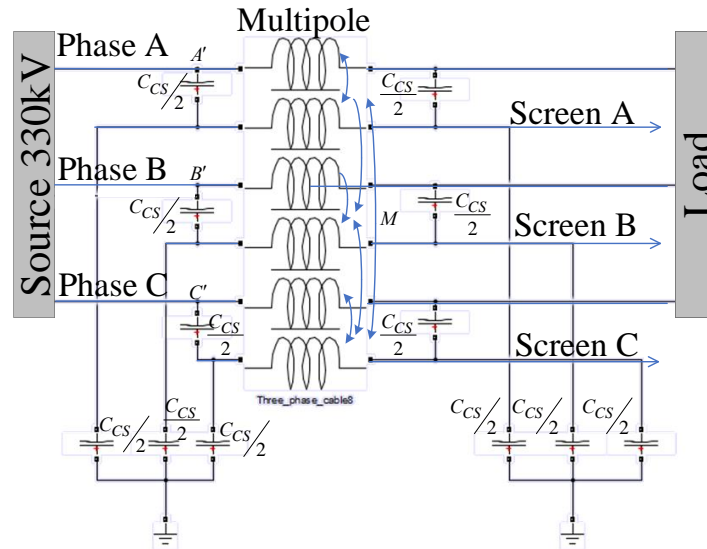


Fig. 1. The electrical equivalent circuit in the form of equivalent multipole network.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

In the work, a simulation model of a high-voltage cable power transmission line has been developed. This model consists of an equivalent circuit and is implemented in Matlab/Simulink. Such an implementation makes it possible to simulate and analyze electromagnetic transients in normal and emergency modes of cable line operation. Depending on the desired result and the accuracy of solutions for simulation, a rational method for solving partial differential equations, and the method of changing the simulation time (fixed or variable pitch) can be chosen. During the simulation, it is possible to follow the processes occurring in the electrical circuit.

When studying low-frequency transients in a three-phase cable power line, transient analysis is usually performed on the basis of a P- or T-shaped equivalent circuit with lumped parameters. The longitudinal and transverse parameters R , L , C of the line equivalent circuit are functions that depend on the frequency. At the same time, if one characteristic frequency can be distinguished for the investigated transient process, then the parameters at this frequency are used in the calculations. If the transient process is characterized by a wide range of frequencies, then for each of the

parameters an additional equivalent circuit with lumped parameters is synthesized, which implements its frequency response. To calculate the transients in a long line, it is possible to use the calculated method of dividing this line into short sections of such a length that allows the use of an equivalent circuit with lumped parameters for each section.

The electric circuit of the equivalent section of the length L_{meters} , is implemented in the form of an equivalent multipole network on the Fig. 1, taking into account the mutual inductive connections existing between the inductances of the cores and screens.

In terms of analysis, the line is a six-wire system (three cores and three screens) with an additional seventh wire – ground.

The described model is simplified because it does not take into account the dynamic characteristics of energy sources and loads. However, using the user-friendly Simulink user interface, the open structure of the model allows you to quickly change its topology and block parameters depending on the specific task. In particular, the topology of the constructed model can be used in the future to study two-phase, three-phase and other complex short circuits in the cable transmission line. This model also allows for a comprehensive study of the readings of virtual instruments when including in the

model of parallel nodes and loads with dynamically changing parameters, which allows calculations of various modes of operation of the power system of this type in the initial stages of design.

The investigated high-voltage power line has a power supply of 330 kV, the length of the line is 3000 m. The parameters of the line replacement scheme are calculated taking into account the geometric parameters of a single-phase cable (Fig. 2) $r_1=17.4 \text{ mm}$, $r_2=42.8 \text{ mm}$, $r_3=46.5 \text{ mm}$, $r_4=52.5 \text{ mm}$.

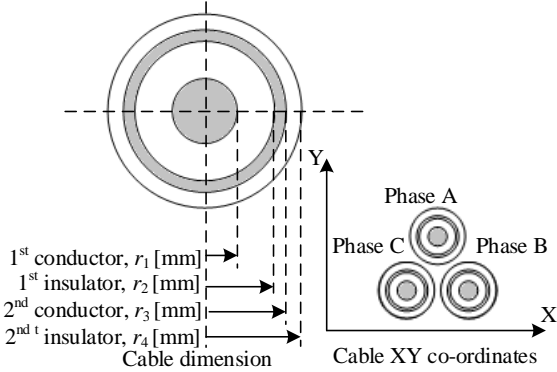


Fig. 2. Cable geometry.

The calculation expressions for the parameters of a single-phase cable are obtained from the known formulas for the linear active-inductive resistances of a multi-wire wire-ground system, which are presented in [31]. When calculating the capacitive parameters of the cable, it is assumed that the cable is laid underground (the depth in this case does not matter).

The matrix of cable parameters, voltage drops along the conductors U_c and screens U_s , related to the currents in them, is represented by the matrix equation:

$$\begin{bmatrix} U_{cA} \\ U_{sA} \\ U_{cB} \\ U_{sB} \\ U_{cC} \\ U_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c & Z_{cs} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{cs} & Z_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_c & Z_{cs} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{cs} & Z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_c & Z_{cs} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{cs} & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{sA} \\ I_{cB} \\ I_{sB} \\ I_{cC} \\ I_{sC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where I_A, I_B, I_C – are the currents of the cable cores; I_{sA}, I_{sB}, I_{sC} – cable shield currents; Z_c, Z_s – linear internal resistances of the core and screen; Z_{cs} – is the linear mutual resistance between the core and the screen of the same cable. The calculation of the parameters was carried out

using the geometric mean distance between the axes of the phases of the cables A, B, C.

To accurately calculate the electrical parameters of cables Z, taking into account the mutual influence of phases and circuits on each other, as well as taking into account the frequency dependences of these parameters, the following assumptions were made:

- the cable line consists of metal conductors, the axes of which are mutually parallel and parallel to the ground surface;
- the line is homogeneous along its axis;
- for the lines under consideration, we neglect the propagation of the electric field in the radial direction in the earth.

Calculation formulas for the parameters of the cable line, taking into account their dependence on frequency and actual geometric location in the ground:

$$Z_c = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_7 - 2Z_4$$

$$Z_s = Z_3 + Z_6 + Z_7$$

$$Z_{cs} = Z_5 + Z_6 + Z_7 - Z_4$$

Linear longitudinal parameters are represented by resistances $Z_1 \dots Z_7$, the formulas for calculating which in the range of relatively low frequencies are presented in [31].

RESULTS AND DISCUSSION

The oscillograms of the transient process of voltage and current in the shields of single-phase cables when the cable line is connected to the source in the idle mode are shown in fig. 3 and 4. From the given oscillograms in fig. 3 shows that the overvoltage on the cable shields at the moment of switching will be 4 kV.

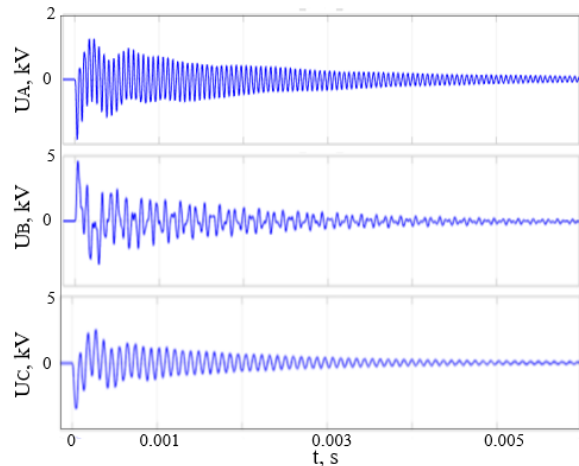


Fig. 3. Oscillograms of the transient process of voltage in screens of single-phase cables.

This is explained by superimposing the form of oscillations of different frequencies, caused by the effect of the mutual induction of the cores of all phases of the cable on the screen. Rapid attenuation of transient phenomena in screens of a three-phase cable line of single-phase execution is observed due to the presence of active components of all elements.

The appearance of currents is caused by the grounding of the screens at the end and at the beginning of the cable line. Since at the moment of switching, due to the magnetic connection between the core and the screen, the EMF of the mutual induction increases, which contributes to the flow of currents in the screens of about 280 A.

After the attenuation of the main components of the switching transient process in the cores of the cable, induced in the circuit due to mutual inductance, the emf of each core decreases, which leads to the attenuation of the voltage and current curves in the cable shield to minimum values.

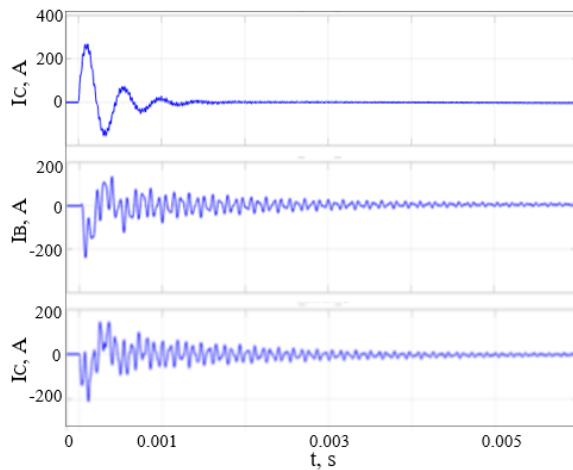


Fig. 4. Oscillograms of the transient process of the current in the shields of single-phase cables.

To limit the switching voltage, the principle of selecting favorable initial conditions of the transition process, in which the amplitudes of free oscillations have minimum values, is used, for example, control of the switching moment by changing the initial angle of each phase.

Let us consider the oscillograms of the transient processes of currents and voltages in the shields of a three-phase cable line of single-phase execution when the cable line is turned on to a three-phase voltage source when the initial angle changes.

The switching of each phase took place at different moments of time, so that each phase had an initial switching angle equal to zero. At

the angle of inclusion $\varphi=0^{\circ}$, the phase amplitude has a nominal value, which can be seen on the oscillograms of Fig. 5.

Analyzing the oscillograms of Fig. 5, we can conclude that if each phase of a three-phase cable line is connected to a three-phase source with a frequency of $f=50$ Hz with a time delay equal to $1/150$ sec, then the angle of inclusion of all phases will be zero, which will lead to a limitation of the switching voltage.

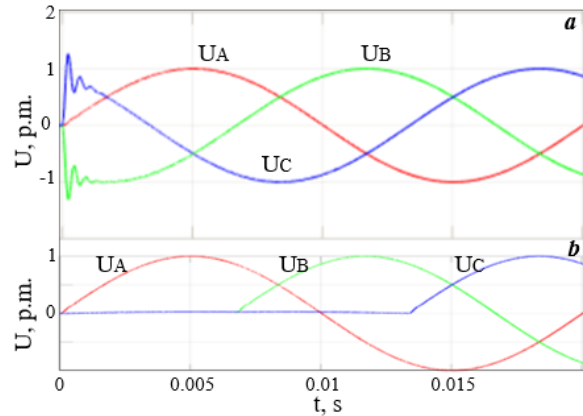


Fig. 5. Oscillograms of voltage and currents in a three-phase cable line at the moment of connection to the power source: with phase shift (a); at the switching angle $\varphi=0^{\circ}$ (b).

Changing the initial angle of each phase during switching does not affect the increase in voltage on the cable screen (Fig. 6), but at the same time, induced currents appear in the screens (Fig. 7), the transition process curves of which are subject to investigation in order to understand the processes, happening in cable screens.

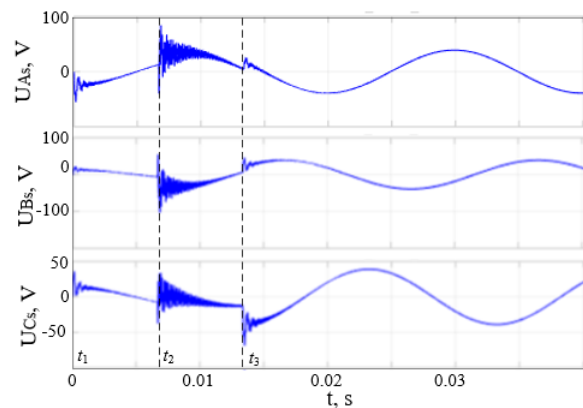


Fig. 6. Voltage curves in the screens of each phase when changing the initial angle.

From fig. 6, 7, it can be seen that at the first moment of time at t_1 , phase A is turned on and a current begins to flow through the conductive core, as a result of which a variable magnetic field is created around the conductor, which

leads to the appearance of a current in the screen of Fig. 7. The current in the screen causes a drop in the voltage of its phase, under the action of magnetic induction, causes a drop in the voltage on the screens of phases B and C (Fig. 6). Similarly, the voltage on the screens of phases B and C, which are not turned on, is due to the capacitive and electromagnetic connection with phase A.

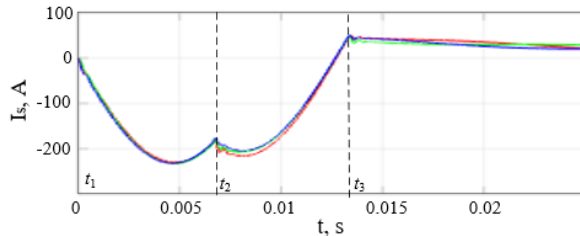


Fig. 7. Transient current curves when the initial angle changes.

At the moment of switching on one phase, induced currents begin to flow in all screens of each phase. Since only the voltage of phase A acts, the transposition of the screens does not compensate for the EMF of the mutual induction, which leads to a strong increase in the current.

At the moment of time t_2 , phase B is connected, which leads to an increase in the EMF of the mutual induction on the phases. This can be seen from the oscillogram (Fig. 6), the voltages U_A and U_B have a large initial amplitude compared to the disconnected voltage U_C .

The appearance of voltage on phase B, as a result of the transposition of the screens, compensates for the longitudinal currents flowing through the screens, but does not lead to a balance of phase voltages.

At the moment of time t_3 , all three phases are connected to the line, and therefore the EMF of the mutual induction, which is shown in the screens of the three sections of the transposition, due to the phase shift by 120° and 240° , is zero. Therefore, the currents induced in the screens, after a slight transient process, take values close to zero.

Oscillations caused by the connection of each phase at times t_1 , t_2 , t_3 by the recharging of the capacitors, and by the electromagnetic connection between the cores and shields of the three-phase cables.

CONCLUSION

Optimal conditions of controlled switching when switching on a three-phase cable line prevent the appearance of an aperiodic current

component, which allows limiting switching overvoltage.

It is convenient to analyze the switching processes of each phase by bringing the initial conditions to zero. Given that the very principle of controlled switching rids the current in the line of free components, the analysis of controlled switching can be carried out in the schemes of the established mode.

Synchronization of switching processes is carried out with the voltage of phase A and is carried out in the sequence $A \rightarrow B \rightarrow C$ when switching the three-phase cable line to the generator. Such sequences are due to the desire to minimize the total switching time.

The oscillograms of the transient processes of currents and voltages in the shields of a three-phase cable line of single-phase execution when the cable line is turned on to a three-phase voltage source when the starting angle is changed are considered. When each phase of a three-phase cable line is connected to a three-phase source with a time delay equal to $0.006(6)$ ($1/150$) of a second, the angle of inclusion of all phases is zero, which makes it possible to limit switching voltages.

The significance of the obtained results lies in the possibilities of the proposed method to select optimal conditions of controlled switching, which allows it to be used in the design of switching nodes, as far as in controlled switching to eliminate unwanted electrical transients during planned switching.

Changes in the initial angle of each phase during switching does not lead to an increase in the voltage on the cable shield, but at the same time, induced currents appear in the shields, the transition process curves of which are subject to additional research to analyze the processes occurring in the cable shields.

REFERENCES

- [1] Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical Modelling of Transient Processes in a Three Phase Electric Power System for a Single Phase Short-Circuit *Energies*, 2022, 15(3), 1126. doi.org/10.3390/en15031126
- [2] Vijaya Tharani C., Nandhini M., Sundar R., Nithiyanantha K. MATLAB based Simulations model for three phases Power System Network. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2016, 4, 502–509. ISBN-13: 978-1540513212
- [3] Pruski P., Paszek S. Analysis of transient waveforms in a power system at asymmetrical

- short-circuits. *Prz. Elektrotech.* 2020, 2, 26–29. doi.org/10.15199/48.2020.02.05
- [4] Colqui, J.S.L., de Araújo A.R.J., Kurokawa, S.; Filho, J.P. Optimization of Lumped Parameter Models to Mitigate Numerical Oscillations in the Transient Responses of Short Transmission Lines. *Energies*. 2021, 14, 6534. doi.org/10.3390/en14206534
- [5] Marius Fișcă, Mihail Abrudean, Vlad Mureșan, Iulia Clitan, Mihaela-Ligia Ungureșan, Roxana Motorga, Emilian Ceuca. Modeling and Simulation of High Voltage Power Lines under Transient and Persistent Faults. *Mathematics* 2023, 11(1), 21. doi.org/10.3390/math11010021
- [6] Nuricumbo-Guillén R., Cortés F.P.E., Gómez P., Martínez C.T. Computation of Transient Profiles along Nonuniform Transmission Lines Including Time-Varying and Nonlinear Elements Using the Numerical Laplace Transform. *Energies* 2019, 12, 3227. doi.org/10.3390/en12173227
- [7] Kizilcay M., Teichmann K., Papenheim S., Malicki P. Analysis of Switching Transients of an EHV Transmission Line Consisting of Mixed Power Cable and Overhead Line Sections. In *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST2017)*, Seoul, Korea, 26–29 June 2017.
- [8] Kuchansky Vladislav. "The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes." *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. IEEE, 2017, 394-399. doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939785
- [9] Nidhi Parmar, Chetan Kotwal, Tarang Thakkar, Prakash Makhijani. "Switching Overvoltages in Offshore Cable Connections." *ICRISET2017*, 2017, 586-592. doi.org/10.29007/d2q7
- [10] Garbelim Pascoalato, Tainá Fernanda, et al. A comparison of frequency-dependent soil models: Electromagnetic transient analysis of overhead transmission lines using modal decomposition. *Energies* 15 (5), 2022, 1687. doi.org/10.3390/en15051687
- [11] Shen Hong, Zhonghao Dongye. "Modeling of high-frequency electromagnetic oscillation for DC fault in MMC-HVDC systems." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* (2022). doi.org/10.17775/CSEEJPES.2021.06370
- [12] Peng Lu, Xu Liu, Lijuan Wang, Jijia Fu, Xinwen Hu, Xiaolang Li. "Influence of operation mode on HGIS fast transient overvoltage and enclosure overvoltage." *4th International Conference on Information Science, Electrical, and Automation Engineering (ISEAE 2022)*. Vol. 12257. SPIE, 2022. 658-665. doi.org/10.1117/12.2640282
- [13] Zychma Daria, Paweł Sowa. "Electromagnetic Transients in Multi-Voltage Transmission Lines during Non-Simultaneous Faults." *Energies* 15(3) (2022): 1046. doi.org/10.3390/en15031046
- [14] Ye Zhihong, Yanchao Shi, Zhiwei Gao, Xiaolin Wu. "Time-Domain Hybrid Method for the Coupling Analysis of Power Line Network with Curved and Multidirectional Segments." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* (2022). doi.org/10.1109/TEM.2022.3222208
- [15] Zalhaf Amr S., et al. Evaluation of the transient overvoltages of HVDC transmission lines caused by lightning strikes. *Energies* 15.4 (2022): 1452. doi.org/10.3390/en15041452
- [16] Zhang Shun, Nannan Zhou. Extraction of Multiple Electrical Parameters from IP-affected Transient Electromagnetic Data based on LSTM-ResNet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (2023). doi.org/10.1109/TGRS.2023.3266258
- [17] Mutukutti Ravi, Jose Marti. "Modelling of water conduit dynamics using the electromagnetic transient program line model." *Electric Power Systems Research* 212 (2022): 108401. doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108401
- [18] Jiixin Yuan, Weizhe Zhang, Jiajun Mei, Zaosheng Ye, Dongliang Gan, Yuankun Zheng, Liwen Peng. A novel multilayer fast electromagnetic unified power flow controller topology for distribution network. *IEEE Transactions on Industry Applications* 58(3) (2022): 3238-3249. doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.097
- [19] Wenyang Yang, Yuhang Pan, Zilan Qiu, Guofu Zhai. "Electromagnetic transient model and field-circuit coupling numerical calculation of Sen transformer based on finite-element method." *Electric Power Systems Research* 214 (2023): 108941. doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108941
- [20] Boumous S., Boumous Z., Anane Z., Nouri H. Comparative study of 220 kV overhead transmission lines models subjected to lightning strike simulation by using electromagnetic and alternative transients program. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 2022, 68–74. doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.10
- [21] Ghassan Bilal, Pablo Gómez, Reynaldo Salcedo, Juan Villanueva. Electromagnetic transient studies of large distribution systems using frequency domain modeling methods and network reduction techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 110 (2019): 11-20. doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.043
- [22] Rooney R. A. Coelho, Domingos T. da Silva Neto, José Roberto Cardoso. Electromagnetic Transients in Multiconductor Transmission Lines. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 21 (2022):

- 508-526. doi.org/10.1590/2179-10742022v21i4268097
- [23] Xiangxiang Wei, Dechang Yang, Xiaowei Wang, Bin Wang, Jie Gao, Jie Wei. "Faulty feeder detection based on fundamental component shift and multiple-transient-feature fusion in distribution networks." *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.2 (2020): 1699-1711. doi.org/10.1109/tsg.2020.3026390
- [24] Akifumi Yamanaka, Naoto Nagaoka, Yoshihiro Baba. "Circuit model of vertical double-circuit transmission tower and line for lightning surge analysis considering TEM-mode formation." *IEEE Transactions on Power Delivery* 35.5 (2020): 2471-2480. doi.org/10.1109/EEIC/ICPSEurope49358.2020.9160536
- [25] Meng, X. K., Jia Y. B., Liu Z. H., Yu Z. Q., Han P. J., Lu Z. M., Jin, T. High-Voltage Cable Condition Assessment Method Based on Multi-Source Data Analysis. *Energies*, 2022,15(4), 1369. doi.org/10.3390/en15041369
- [26] Pournabi M., Mohammadi M., Afrasiabi S., & Setoodeh P. Pournabi, Mehrdad, et al. Power system transient security assessment based on deep learning considering partial observability. *Electric Power Systems Research*, 205, 2022. 107736. doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107736
- [27] Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical Modelling of Transient Processes в Три фазе Electric Power System для Single Phase Short-Circuit. *Energies*, 15 (3), 2022. 1126. doi.org/10.3390/en15031126
- [28] Varetsky Yuriy, Michał Gajdzica, Beata Kushka. Study of transient overvoltages on CSI adjustable speed drives under arcing SLGF in the industrial cable grid. *Electric Power Systems Research*. 209, 2022: 107954. doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107954
- [29] Wang, Jingya, Yongchun Liang, and Chunyu Ma. A novel transient thermal circuit model of buried power cables for emergency and dynamic load. *Energy Reports*. 9, 2023. 963-971. doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.097
- [30] Shcherba, A. A., Podoltsev, A. D., & Kucheriava, I. M. The reduction of magnetic field of underground cable line in essential areas by means of finite-length composite magnetic shields. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1, 2022. 17-24. doi.org/10.15407/techned2022.01.017
- [31] Wedepohl L.M., Welcox D.J. Transient analysis of underground power transmission systems. *Proc. Inst. El. Eng*, 1973. vol. 120, №2. P. 253–260. doi.org/10.1049/piee.1973.0056

Information about authors.



Lobodzinskiy Vadim Yur'evich – PhD, Associate Professor. Research interests: energy modelling of smart grids; analysis of steady-state, pulsed and transient electromagnetic processes in electric circuits of different types.
E-mail: v.lobodzinskiy@gmail.com



Buryk Nikolay Petrovich – PhD, Associate Professor. Research interests: Research of methods of control of interconnected electromechanical systems in the conditions of uncertainty of mathematical model of object.
E-mail: burykm@ukr.net



Spinul Lyudmila Yur'evna – PhD, Associate Professor. Research interests: theoretical and applied aspects of the theory of identification of objects of different nature.
E-mail: spinul20@gmail.com



Chibelis Valeriy Ivanovich – PhD, Associate Professor. Research interests: development of scientific and technical nondestructive diagnosis of highvoltage cables.
E-mail: toe209@gmail.com



Illina Olga Aleksandrovna – assistant Professor. Research interests: research on the energy characteristics of the charge and discharge circuits of capacitors at non-zero voltage.
E-mail: illina.olga@lil.kpi.ua

Reduction of High-Voltage Cable Line Capacity Caused by Implementation of Magnetic Field Shielding Techniques

Grinchenko V. ¹, Tkachenko O. ²

¹ General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The paper deals with a capacity of high-voltage cable line made of three single-core cross-linked polyethylene insulated power cables. We consider three cases. First is a single-point bonded cable system when no magnetic field shielding technique is implemented and the capacity achieves maximum values. Second is a solidly bonded cable system when a thermal effect of induced shield currents causes a capacity reduction. The third case under study is a single-point bonded cable system covered by the passive loop. The passive loop mitigates the cable line magnetic field as well as the solidly bonding does, but also the thermal effect of passive loop currents reduces the capacity. The goal of the paper is to evaluate the relative change of cable line capacity when implementing magnetic field shielding techniques comparably to unshielded case. To achieve the goal we use a standard IEC 60287 when calculating the cable line capacity in the first and the second cases, and a thermal field simulation in the third case. The capacity is evaluated by successive approximations. Iterations are stopped when the conductor reaches the maximum operating temperature. We show that the increase in cable spacing does not guarantee the capacity increase when the solid bonding of cable shields or the passive loop is used. The most significant result is the substantiation of the advantages of passive loop, which provides the greater capacity in comparison with solid bonding at equivalent magnetic field shielding efficiencies. The obtained results can be used when choosing the type of bonding and the technique of cable line magnetic field mitigation.

Keywords: cable line, capacity, magnetic field, shielding, passive loop, bonding.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.04>

UDC: 621.315.23:621.3.017.73

Reducerea capacității liniei de cablu de înaltă tensiune prin ecranarea câmpului magnetic al lui

Grinchenko V.S. ¹, Tkachenko O.O. ²

¹ Institutul de Energetică generală al Academiei Naționale de Științe a Ucrainei, Kiev, Ucraina

² Anatolii Pidhornyi Institutul de Probleme de Inginerie Mecanică al Academiei Naționale de Științe a Ucrainei, Harkiv, Ucraina

Rezumat. Lucrarea tratează o capacitate de linie de cablu de înaltă tensiune formată din trei un singur conductor cabluri de alimentare cu izolare din polietilenă reticulat. Luăm în considerare trei cazuri. Mai întâi este un sistem de cabluri conectate într-un singur punct când nu este implementată nicio tehnică de ecranare a câmpului magnetic și capacitatea atinge valorile maxime. Al doilea este un sistem de cablu solid legat atunci când un efect termic al curenților induși de ecranare determină o reducere a capacității. Al treilea caz studiat este un sistem de cabluri conectate într-un singur punct acoperit de bucla pasivă. Bucla pasivă atenuază câmpul magnetic al liniei de cablu, așa cum o face legătura solidă, dar și efectul termic al curenților buclei pasive reduce capacitatea. Scopul lucrării este de a evalua modificarea relativă a capacității liniei de cablu atunci când diferite tehnici de ecranare a câmpului magnetic sunt implementate în mod comparabil cu carcasa neecranată. Pentru a atinge obiectivul, folosim un standard IEC 60287 atunci când calculăm capacitatea liniei de cablu în primul și al doilea caz și folosim o simulare de câmp termic atunci când este utilizată bucla pasivă. Cel mai semnificativ rezultat este fundamentarea avantajelor buclei pasive, care oferă o capacitate mai mare a liniei de cablu în comparație cu legăturile solide la eficiențe echivalente de ecranare a câmpului magnetic. Rezultatele obținute pot fi utilizate la alegerea tipului de legare și a tehnicii de atenuare a câmpului magnetic al liniei de cablu.

Cuvinte-cheie: linie de cablu, capacitate, câmp magnetic, ecranare, buclă pasivă, legare.

Снижение пропускной способности кабельной линии высокого напряжения при экранировании ее магнитного поля
Гринченко В.С.¹, Ткаченко А.О.²

¹ Институт общей энергетики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

² Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины
 Харьков, Украина

Аннотация. В статье исследована пропускная способность кабельной линии высокого напряжения, состоящей из трех одножильных силовых кабелей со сшитой-полиэтиленовой изоляцией. Рассмотрены три случая. В первом случае, когда выполнено одностороннее заземление экранов кабелей, а магнитное поле кабельной линии не экранируется, пропускная способность достигает максимальных значений. Во втором, когда выполнено двустороннее заземление, тепловое действие токов, наведенных в экранах кабелей, вызывает снижение пропускной способности. В третьем случае рассмотрена кабельная линия с односторонним заземлением экранов кабелей, на которой расположен пассивный контурный экран. Контурный экран, как и двустороннее заземление собственных экранов кабелей, позволяет уменьшить магнитное поле кабельной линии, но тепловое действие его токов также вызывает снижение пропускной способности. Целью статьи является оценка относительного изменения пропускной способности кабельной линии при экранировании ее магнитного поля по сравнению со случаем, когда снижения магнитного поля не проводится. Поставленная цель достигается путем применения стандарта IEC 60287 для определения пропускной способности в первом и втором случаях, а также численного моделирования теплового поля кабельной линии при использовании контурного экрана. При этом пропускная способность находится методом последовательных приближений, а итерационный процесс прекращается при достижении в жилах кабелей максимальной рабочей температуры. При исследовании пропускной способности варьируются следующие параметры: удельное тепловое сопротивление грунта, расстояние между кабелями, сечение жилы кабелей и сечение экранов. Показано, что увеличение расстояния между кабелями не гарантирует увеличения пропускной способности как при двустороннем заземлении экранов кабелей, так и использовании контурного экрана. Наиболее существенным результатом является обоснование преимущества применения контурного экрана, обеспечивающего большую пропускную способность кабельной линии в сравнении с двусторонним заземлением при эквивалентных эффективности экранирования магнитного поля. Значимость полученных результатов состоит в возможности их использования при выборе типа заземления и способа экранирования магнитного поля кабельной линии.

Ключевые слова: кабельная линия, пропускная способность, магнитное поле, экранирование, контурный экран, заземление.

I. INTRODUCTION

The most advanced means of electrical energy transmission in urban areas are underground high-voltage cable lines. The economic reason is an important one, as the cable line does not require significant land allocation when a power line route crosses residential area. For example, according to the Ukrainian regulations [1] the border zone is 20 m for 110 kV overhead lines and only 2 m for 110 kV cable lines. As well the electromagnetic safety reason becomes important for last decades. The potential risks of long-term exposure of a power frequency magnetic field to human health are discussed in [2-4]. The problem is studied by the World Health Organization within the "The International EMF Project". In Ukraine, the maximum permissible level (so-called reference level) of the power frequency magnetic field is 0.5 μT for living spaces and 10 μT for residential areas [1]. In general, the reference levels in Ukraine correspond to the current global trend towards stricter standards [5].

It is shown in [6-8] that 110 kV overhead line magnetic field exceeds the referred above reference level for living spaces outside its right-of-way. Therefore, the impermissible level of magnetic field is observed in high-rise buildings. This information can be represented on geoinformation maps [9-11]. In contrast, the cable line magnetic field could exceed the reference level for living spaces only on the ground floor [12]. In the right-of-way the cable line magnetic field could exceed the reference level for residential areas. The magnetic field highest level is observed in junction zones where the cable spacing reaches 0.5 m [1].

A typical high-voltage cable line consists of three single-core, cross-linked polyethylene (XLPE) insulated power cables. Fig. 1 shows main elements of 110 kV power cable, namely aluminum or copper conductor, XLPE insulation, and copper shield (a.k.a. shield of cable). Shields of cables require earthing. For this they are bonded and earthed at one or several points.

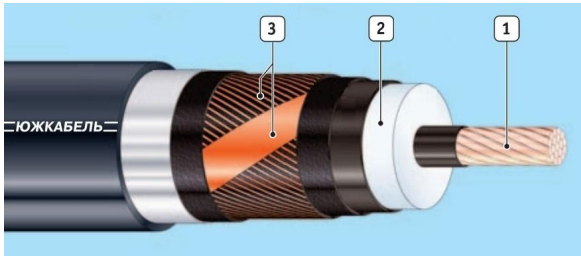


Fig. 1. Power cable for rated voltage 110 kV (1 – conductor, 2 – XLPE insulation, 3 – shield).

Different types of bonding are known [13-15], but the common ones are as follows [1]: single-point bonding, cross-bonding, and solid bonding. Single-point bonding and cross-bonding provides no circulating shield currents and consequently no extra heating of cables. This allows achieving the highest cable line capacity. However, single-point bonded and cross-bonded cable systems require additional protective devices. The solidly bonded cable system is free of this disadvantage, but another one appears. Thus, the thermal effect of shield currents leads to the cable line capacity reduction. On the other hand, the magnetic field of induced currents mitigates the total magnetic field of the cable line. This technique of mitigation of the cable line magnetic field is included to [16], but its effect on the cable line capacity is not studied.

Another way to mitigate the magnetic field of single-point bonded or cross-bonded cable system is to use an extra shield. Traditionally electromagnetic shields made of aluminum [17-20] and magnetic shields with high permeability [19-22] are used. Usually these shields are plane, U-shaped, H-shaped or they enclose the cable line. Neglecting the hysteresis losses, the magnetic shields do not produce heat. Thermal effect of Joule heating of electromagnetic shields on the cable line is negligible as the shield is distant by 200 mm from the power cable. So electromagnetic and magnetic shields do not reduce the cable line capacity. But they have two disadvantages, namely the quantity of metal is relatively high and the solid construction makes it difficult to access the cable line.

Shields made of passive loops are free of these disadvantages. There are single-loop shields [23-25], double-loop shields [25-27], and multi-loop shields [26, 27]. It is shown in [23] that a single-loop shield with an asymmetric magnetic coupling efficiently mitigates the magnetic field in the junction zone of cable line, and it does not lead to the cable line capacity

reduction. Similar passive loops covering long sections of high-voltage cable lines are shown in [28] and [29]. However, the single-loop shield covering the long section of cable line is not discussed and its thermal effect on the cable line capacity in such case is not studied.

The goal of the paper is to evaluate the relative change of cable line capacity when implementing magnetic field shielding techniques comparably to unshielded case.

Namely, the capacity reduction caused by solid bonding of the shields of cables and the reduction caused by usage of the long single-loop shield with an asymmetric magnetic coupling (hereinafter referred to as the passive loop) are under study. To assess the capacity reduction, we find the capacity of single-point bonded cable system and the capacity reduced by the thermal effect of closely located shielding conductors. These shielding conductors are the shields of cables (when the cable system is solidly bonded) or the conductors of passive loop (when it covers the cable line). To evaluate the cable line capacity, we use both the standard IEC 60287 “Electric cables – Calculation of current rating” and the technique based on the numerical simulation.

II. CALCULATION OF CABLE LINE CAPACITY BY IEC 60287 STANDARD

The IEC 60287 standard makes it possible to calculate the cable line capacity when the system is single-point bonded or solidly bonded. We examine the capacity of 110 kV cable line for two conductor sizes. As well two sizes of cable shield cross-section and two variants of cable spacing are under study.

The parameters of the cable line and the ambient are as follows:

- load factor is 100%;
- cable line is flat and cables are buried 1.5 m deep;
- distance between axis of adjacent power cables (so-called cable spacing) equals two or four diameters of the cable;
- soil thermal resistivity ρ_{soil} takes on the values from 0.6 K·m/W to 1.2 K·m/W with the step of 0.2 K·m/W, and 3.0 K·m/W as an extreme case;
- temperature at ground surface is $\theta_a=20^\circ\text{C}$.

We model the power cable as a cylindrical conductor coated with three layers, namely the XLPE insulation, the shield, and the jacket as an outer layer. At that the parameters of 110 kV

single-core XLPE-insulated power cables are as follows:

- conductor size is 240 mm² or 500 mm²;
- conductor is aluminum;
- maximum operating temperature of conductor is 90°C;
- cable insulation thickness is 16 mm;
- thermal resistivity of cable insulation is 3.5 K·m/W;
- the shield size is 100 mm² or 200 mm²;
- jacket (PVC-insulation) thickness is 4.0 mm;
- thermal resistivity of jacket is 6.0 K·m/W.

According to the subsection 1.4.1.1 of IEC 60287-1-1 standard [30], the permissible current rating is calculated by the following expression:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0, 5T_1 + m(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + mR(1 + \lambda_1)T_2 + mR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}}, \quad (1)$$

where $\Delta\theta$ is the permissible temperature rise of conductor above the ambient temperature θ_a , K; R is the alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature, Ω/m ; W_d is the dielectric losses per unit length per phase; T_1 is the thermal resistance per unit length between conductor and shield, K·m/W; T_2 is the thermal resistance between shield and armour, K·m/W; T_3 is the thermal resistance of cable jacket, K·m/W; T_4 is the thermal resistance between cable surface and soil, K·m/W; $m=1$ is the number of conductors in the cable; λ_1 and λ_2 is the ratio of total losses in shield and armour respectively to total conductor losses.

As the power cables under study have no armor, then parameters T_2 and λ_2 are equal to zero. We find the parameters T_1 , T_3 , and T_4 using subsections 2.1.1, 2.1.3, and 2.2.3.2.2 of the standard IEC 60287-2-1 [31].

In the single-point bonded cable system there are no currents in the shields of cables. Correspondingly $\lambda_1=0$. Calculating the capacity of cable line with solidly bonded shields according to (1), we use the loss factor λ_1 for the outer cable. It is bigger than the loss factor for the middle cable. By-turn, the bigger loss factor gives the less permissible current rating.

Table 1 shows the calculation results for the cable line capacity when the conductor size is 240 mm². It covers two variants of cable spacing, two variants of shield size, and both types of shield bonding. Similar Table 2 shows the capacity when the conductor size is 500 mm².

As expected the single-point bonded cable system provides more capacity compared to the solidly bonded one. The capacity does not depend on the shield size when the single-point bonding is used. To increase the capacity, cables with greater conductor cross-section can be used. Comparing first lines from Table 1 and Table 2, we find the one and a half times growth of the capacity. Another way to increase the capacity is to distant cables one from another reducing the mutual heating.

According to [1] the cable spacing of two cable diameters is regular, but its four-time increase is permitted by [16]. Comparing lines no. 1 and no. 4 from Table 1, we find the capacity increase by 3.9...6.3% depending on soil thermal resistivity. The similar analysis of Table 2 shows the capacity increase by 4.6...6.8%.

The solid bonding of shields of cables reduces the cable line capacity. Comparing the 1st line of Table 1 with 2nd and 3rd ones, and 4th line with 5th and 6th, we find the capacity reduction by 11.6...18.8%. The similar analysis of Table 2 shows the capacity reduction by 20.9...30.4%.

Obviously the usage of cables with greater conductor cross-section increases the cable line capacity. Comparing lines no. 2 and no. 3 from Table 1 with corresponding lines from Table 2, we find the capacity growth by 27.4...34.8% depending on soil thermal resistivity and shield size. However, the increase of cable spacing does not guarantee the capacity increase because of two competitive effects.

The increase of cable spacing reduces the mutual heating of cables and improves the heat transfer to soil. On the other hand, the increase of cable spacing leads to greater induced currents in shields [32] and correspondently to the more intense Joule heating. Comparing line no. 2 of Table 1 with line no. 5, we find a minor reduction of capacity when the shield size is 100 mm². And comparing the line no. 3 of Table 1 with the line no. 6, we find the minor increase of capacity when shield size is 200 mm². The similar analysis of Table 2 shows the same. This means that the competitive effects of capacity increasing and capacity decreasing cancel each other.

Therefore, we obtain that the solid bonding of shields of cables reduces the cable line capacity by 10...30%, and the increase of cable spacing and shield size does not significantly affect the capacity.

Table 1

Cable line capacity calculated by IEC 60287 when conductor size is 240 mm².

No.	Cable spacing, mm	Shield size, mm ²	Type of cable system	I, A				
				$\rho_{soil}=0.6$ K·m/W	$\rho_{soil}=0.8$ K·m/W	$\rho_{soil}=1.0$ K·m/W	$\rho_{soil}=1.2$ K·m/W	$\rho_{soil}=3.0$ K·m/W
1	120	–	single-point bonded	507	462	428	400	271
2		100	solidly bonded	448	405	372	346	231
3		200	solidly bonded	441	398	366	340	226
4	240	–	single-point bonded	527	483	448	420	288
5		100	solidly bonded	446	403	371	346	231
6		200	solidly bonded	450	408	375	350	234

Table 2

Cable line capacity calculated by IEC 60287 when conductor size is 500 mm².

No.	Cable spacing, mm	Shield size, mm ²	Type of cable system	I, A				
				$\rho_{soil}=0.6$ K·m/W	$\rho_{soil}=0.8$ K·m/W	$\rho_{soil}=1.0$ K·m/W	$\rho_{soil}=1.2$ K·m/W	$\rho_{soil}=3.0$ K·m/W
1	135	–	single-point bonded	764	693	638	594	397
2		100	solidly bonded	604	540	493	456	298
3		200	solidly bonded	587	524	478	442	288
4	270	–	single-point bonded	799	728	672	628	424
5		100	solidly bonded	585	524	478	443	290
6		200	solidly bonded	594	532	486	449	295

III. CAPACITY EVALUATION VIA CABLE LINE THERMAL FIELD SIMULATION

Another way to evaluate the cable line capacity is to use the thermal field numerical simulation. We assume the cable line thermal field to be plane-parallel. Therefore, a computational domain is a rectangle and includes cross-sections of cable line, passive loop, and soil. Since the cable line runs in a steady-state, the temperature distribution $\theta(x,y)$ does not change over time, where x and y are Cartesian coordinates of the observation point. The distribution satisfies the stationary heat equation. We take some value of the cable line current rating and find a thermal field distribution around the cable line using the finite element method. This gives the temperature of cable conductor. If it is bigger than the maximum operating temperature of 90°C, we repeat the numerical simulation with a less current rating. Otherwise, we increase the current rating for the

next simulation. Repeating the cycle, we find the cable line capacity by successive approximations. This technique allows evaluating the capacity of single-point bonded and solidly bonded cable systems as well as the capacity when the passive loop is used.

Table 3 and Table 4 show the results of capacity evaluation when the conductor size is 240 mm² and 500 mm², respectively. They correspond to Table 1 and Table 2 in lines dedicated to single-point bonded and solidly bonded cable systems. There is some difference in results obtained by different calculation techniques. When the conductor size is 240 mm², the difference in capacities of single-point bonded cable system is negligible. The difference reaches 3.5% when the conductor size is 500 mm². We attribute this to the non-uniformity of current density in conductors, which is taken into account in numerical simulation. For the solidly bonded cable system,

the difference in capacities calculated in different ways is bigger. It lies within 3.3...7.1% when the conductor size is 240 mm², and 5.7...11.1% when the conductor size is 500 mm². We explain this by precise expressions for shield currents used in numerical simulation, while the expression given the maximum current is used for every of three shields when calculating by IEC 60287. This also explains the higher values of cable line capacity obtained via numerical simulation. However, the results from Table 3 and Table 4 show the same trends as the results from Table 1 and Table 2. Namely, the solid bonding significantly reduces the cable line capacity, and the increase of cable spacing and shield size almost do not affect the capacity.

Another way to mitigate the cable line magnetic field is to use the passive loop covering the outer power cables. Fig. 2 shows the sketch of arrangement of cable line and passive loop. We consider passive loops having 100 and 200 mm² copper conductor and 4 mm thick PVC-insulation. The current in the loop provides an extra heating of cable line and reduces its capacity. We assume that the loop current is equal to the β -component obtained as a result of the Clarke transformation [33, 34] applied to the shield currents of the solidly bonded cable system.

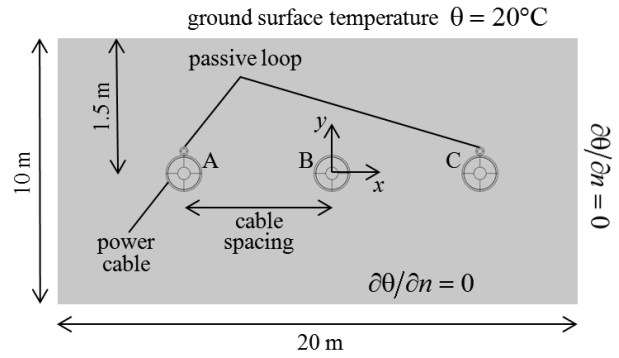


Fig. 2. Sketch of arrangement of cable line and passive loop covering the outer power cables.

This allows equalizing the magnetic field shielding efficiencies in the solidly bonded case and when the passive loop is used.

Analyzing Table 3 and comparing in pairs lines no. 2 and 3, lines no. 4 and 5, lines no. 7 and 8, and lines no. 9 and 10, we find that the implementation of the passive loop ensures more cable capacity than the solid bonding. For example, the solid bonding reduces the capacity by 9.3% and the passive loop reduces the capacity by 5.8% when cable spacing is 120 mm, shield size is 100 mm², and soil resistivity $\rho_{soil}=1.0 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$. In general Table 3 shows that the capacity is 3.4...9.3% higher when the passive loop is used.

Table 3

Cable line capacity calculated by numerical simulations when conductor size is 240 mm².

No.	Cable spacing, mm	Shield size, mm ²	Type of cable system	I, A				
				$\rho_{soil}=0.6 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$	$\rho_{soil}=0.8 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$	$\rho_{soil}=1.0 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$	$\rho_{soil}=1.2 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$	$\rho_{soil}=3.0 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$
1	120	–	single-point bonded	508	464	430	403	277
2		100	solidly bonded	466	423	390	363	247
3			with passive loop	482	438	405	378	257
4		200	solidly bonded	459	416	383	357	242
5			with passive loop	482	438	404	377	256
6	240	–	single-point bonded	529	485	451	423	293
7		100	solidly bonded	465	422	390	363	247
8			with passive loop	497	452	418	391	267
9		200	solidly bonded	465	422	389	363	247
10			with passive loop	501	456	422	394	270

Table 4

Cable line capacity calculated by numerical simulations when conductor size is 500 mm².

No.	Cable spacing, mm	Shield size, mm ²	Type of cable system	I, A				
				$\rho_{\text{soil}}=0.6$ K·m/W	$\rho_{\text{soil}}=0.8$ K·m/W	$\rho_{\text{soil}}=1.0$ K·m/W	$\rho_{\text{soil}}=1.2$ K·m/W	$\rho_{\text{soil}}=3.0$ K·m/W
1	135	–	single-point bonded	772	701	647	604	411
2		100	solidly bonded	650	584	535	496	331
3			with passive loop	694	624	572	531	355
4		200	solidly bonded	631	567	518	481	320
5			with passive loop	690	620	569	528	353
6		270	–	single-point bonded	807	736	681	636
7	100		solidly bonded	630	562	516	479	320
8			with passive loop	701	631	579	538	359
9	200		solidly bonded	628	564	516	479	319
10			with passive loop	713	643	590	549	368

The similar analysis of Table 4 shows the same trend when the conductor size is 500 mm². Namely, the cable line with passive loop provides 6.8...15.4% more capacity than the cable line with solidly bonded shields. The excess depends on soil thermal resistivity, cable spacing, and shield size.

The increase in cable spacing and the corresponding increase of width of passive loop covering the cable line do not guarantee the capacity increase because of two competitive effects mentioned before in Section II. Analyzing Table 3 and Table 4 and comparing in pairs lines no. 3 and 5, lines no. 8 and 10, we find that the competitive effects of capacity increasing and capacity decreasing cancel each other and the change of cable line capacity is minor.

IV. CONCLUSIONS

1. Using the IEC 60287 standard and the numerical simulation, we show that 110 kV cable line with solidly bonded shields provides 10...30% less capacity than the single-bonded cable system. The capacity reduction is caused by the thermal effect of currents induced in shields of cables. The rate of reduction depends on power cable parameters, cable spacing, and soil thermal resistivity.

2. The solid bonding of shields of cables leads to the mitigation of cable line magnetic

field. However, the passive loop covering the outer power cables is preferable, as the cable line provides up to 15% more capacity in comparison with solid bonding at equivalent magnetic field shielding efficiencies.

3. We show that the increase in cable spacing does not guarantee the capacity increase when the solid bonding of cable shields or the passive loop covering the power cables is used.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the project “Optimization of active loop used to mitigate magnetic field of indoor transformer substation” funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine and by the project “Refined method of calculating currents in cable shields when earthing a high-voltage cable line at both ends” funded by the National Academy of Sciences of Ukraine.

References

- [1] *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017, 760 p. (In Ukrainian)
- [2] Ates K., Carlak H.F., Ozen S. Dosimetry analysis of the magnetic field of underground power cables and magnetic field mitigation using an electromagnetic shielding technique. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 1672-1682. doi: 10.1080/10803548.2021.1918923

- [3] Kheifets L., Crespi C. M., Hooper C., Cockburn M., Amoon A. T., Vergara X.P. Residential magnetic fields exposure and childhood leukemia: a population-based case-control study in California. *Cancer Causes & Control*, 2017, vol. 28, no. 10, pp. 1117-1123. doi: 10.1007/s10552-017-0951-6
- [4] Focke F., Schuermann D., Kuster N., Schär P. DNA fragmentation in human fibroblasts under extremely low frequency electromagnetic field exposure. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2010, vol. 683, no. 1-2, pp. 74-83. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2009.10.012
- [5] *Exposure limits for low-frequency fields (public)*. World Health Organization. Available online: <http://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en>
- [6] Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskyi A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «ChTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 55-62. doi: 10.20998/2074-272X.2020.6.08
- [7] Rozov V.Yu., Reutsky S.Yu., Pelevin D.Ye., Pylugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamics*, 2013, no. 2, pp. 3-9.
- [8] Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042-1048. doi: 10.1109/TPWRD.2007.915212.
- [9] Gallego-Martínez R., Muñoz-Gutiérrez F.J., Rodríguez-Gómez A. Trajectory optimization for exposure to minimal electromagnetic pollution using genetic algorithms approach: A case study. *Expert Systems With Applications*, 2022, vol. 207, paper 118088. doi: 10.1016/j.eswa.2022.118088
- [10] Satayev M.I., Azimov A.M., Faiz N.S., Berdaliyeva A.A., Satayeva Z.I., Nikonov O.Y. Assessment of the impact of electromagnetic radiation in low-frequency energy facilities on the residential ecological zone. *GEOMATE Journal*, 2021, vol. 21, no. 83, pp. 132-141. doi: 10.21660/2021.83.j2100
- [11] Al-Bassam E., Elumalai A., Khan A., Al-Awadi L. Assessment of electromagnetic field levels from surrounding high-tension overhead power lines for proposed land use. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, pp. 1-12. doi: 10.1007/s10661-016-5318-z
- [12] Mimos E.I., Tsanakas D.K., Tzinevrakis A.E. Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables. *Electrical Engineering*, 2010, vol. 91, pp. 327-335. doi: 10.1007/s00202-009-0126-x.
- [13] Mahdipour M., Akbari A., Khalilzadeh M., Werle P. Impact of different bonding methods on high voltage cable shield induced voltage and current in normal and fault conditions. *Proceedings of the 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering*, pp. 1308-1312. doi: 10.1109/IranianCEE.2017.7985244
- [14] Lunca E., Vornicu S., Salceanu A. Numerical modelling of the magnetic fields generated by underground power cables with two-point bonded shields. *Proceedings of the 25th IMEKO TC-4 International Symposium on Measurement of Electrical Quantities*, 2022, pp. 221-226.
- [15] Lin Y., Xu Z. Cable sheath loss reduction strategy research based on the coupled line model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 5, pp. 2303-2311. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2414655
- [16] *State Standard SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011. Design of cable lines with rated voltage up to 330 kV. Guidance*. Kyiv, Minenergovugillya of Ukraine Publ., 2017, 139 p. (In Ukrainian)
- [17] Cardelli E., Faba A., Pirani A. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 889-898. doi: 10.1109/TMAG.2009.2031110
- [18] Ippolito M.G., Puccio A., Ala G., Ganci S. Attenuation of low frequency magnetic fields produced by HV underground power cables. *Proceedings of the 2015 50th International Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-5. doi: 10.1109/UPEC.2015.7339774
- [19] del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 114, pp. 21-27. doi: 10.1016/j.epsr.2014.04.001
- [20] De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, no. 316, pp. 908-911. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.137
- [21] Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 115, pp. 441-460. doi: 10.2528/PIER11022206
- [22] Zucca M., Lorusso G., Fiorillo F., Roccato P.E., Annibale M. Highly efficient shielding of high-voltage underground power lines by pure iron screens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, vol. 320, no. 20, pp. 1065-1069. doi: 10.1016/j.jmmm.2008.04.096

- [23] Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Yerisov A.V., Dobrodeyev P.N. Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 50-54. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.07
- [24] Canova A., Bavastro D., Freschi F., Giaccone L., Repetto M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 89, pp. 109-115. doi: 10.1016/j.epsr.2012.03.003
- [25] del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 674-683. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2039150
- [26] Maioli P., Zaccone E. Thermal design of HV electric systems with EMF mitigation devices. *Proceedings of the International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields*, 2009, paper R.18.
- [27] Maioli P., Zaccone E. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations. *Proceedings of the Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, 2007, pp. 231-236.
- [28] Canova A., Giaccone L. Magnetic mitigation of HV cable junction zone. *Proceedings of the 8th International Conference on Insulated Power Cables*, 2011, paper B.1.6.
- [29] Frezzi P., Hug R., Grant J., Klingler A. Passive magnetic field compensation of existing underground cables. *Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 876-881. doi: 10.1109/EMCEurope.2016.7739246
- [30] *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General*, IEC 60287-1-1, 2014.
- [31] *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance*, IEC 60287-2-1, 2015.
- [32] Gouda O.E. *Environmental Impacts on Underground Power Distribution*, 1st edition, IGI Global, 2016, 405 p.
- [33] Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248-1255. doi: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554
- [34] Walling R.A., Paserba J.J., Burns C.W. Series-capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, vol. 8, no. 1, pp. 461-469. doi: 10.1109/61.180369

Information about authors.



Volodymyr Grinchenko, Ph.D., Senior Researcher. Department for Energy Efficiency and Energy Balances Forecasting of General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Field of scientific interests includes electromagnetic and magnetic passive shielding, active shielding, non-linear effects in electrical engineering problems, and heat transfer applications.
E-mail: vsgrinchenko@gmail.com



Oleksandr Tkachenko, Ph.D., Researcher. Department of Magnetism of Technical Objects of Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. Current research and scientific interests are related to the study of cable lines control and computer simulation of physical processes in power systems.
E-mail: oleksandr.tk7@gmail.com

Reduction of Voltage Fluctuations in Electrical Networks Supplying Motors with a Rapidly Changing Load by Installing Longitudinal Compensation Batteries

Basmanov V.G., Kalinina E.A., Cherepanov V.V.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The article deals with the reduction of voltage fluctuations in electrical networks of industrial enterprises with the help of longitudinal compensation batteries. The purpose of the article is to develop a method for calculating the optimal parameters of the longitudinal compensation installation, which makes it possible to perform calculations using numerical characteristics of the range of changes in the voltage and flicker dose. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to develop a method for selecting the parameters of reducing voltage fluctuations, taking into account the random nature of the change in the parameters of network modes; using the proposed method, to develop a calculation method that allows choosing optimal parameters of capacitor units. The most significant result is the experimental and theoretical confirmation that the proposed method for selecting the parameters of longitudinal compensation batteries, taking into account the random nature of the change in the flicker dose, makes it possible to effectively apply longitudinal compensation to reduce voltage fluctuations in electrical networks of industrial enterprises with a rapidly changing load. The significance of the results is proved by the fact that the proposed method makes it possible to select a longitudinal compensation installation to limit voltage fluctuations at the design stage, thereby ensuring the quality of electric energy in networks with consumers having a rapidly changing load. The resulting calculation method is planned to be used in distribution electrical networks when performing technical measures to ensure the quality of electrical energy.

Keywords: asynchronous motors, rapidly changing load, voltage swing, flicker dose, active power, reactive power, longitudinal compensation installation.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.05>

UDC: 621.315.17

Reducerea fluctuațiilor de tensiune în rețelele electrice care alimentează motoare electrice cu o sarcină semnificativ variabilă prin instalarea bateriilor de compensare în serie

Basmanov V.G., Kalinina E. A., Cherepanov V.V.

Universitatea de Stat din Veatka, Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Articolul examinează reducerea fluctuațiilor de tensiune în rețelele electrice ale întreprinderilor industriale cu ajutorul bateriilor de compensare longitudinală. Scopul articolului este de a elabora o metodă de calculare a parametrilor optimi ai instalației de compensare longitudinală, care să facă posibilă efectuarea calculelor folosind caracteristici numerice ale intervalului de modificări ale tensiunii și dozei de pâlpâire. Pentru a atinge acest obiectiv, este necesar să se rezolve următoarele sarcini: să se elaboreze o metodă de selectare a parametrilor de reducere a fluctuațiilor de tensiune, ținând cont de natura aleatorie a modificării parametrilor modurilor de rețea; folosind metoda propusă, pentru a elabora o metodă de calcul care să permită alegerea parametrilor optimi ai unităților de condensator. Cel mai important rezultat este confirmarea experimentală și teoretică că metoda propusă pentru selectarea parametrilor bateriilor de compensare longitudinală, ținând cont de natura aleatorie a modificării dozei de pâlpâire, face posibilă aplicarea eficientă a compensării longitudinale pentru a reduce tensiunea fluctuații în rețelele electrice ale întreprinderilor industriale cu o sarcină în schimbare rapidă. Semnificația rezultatelor este dovedită de faptul că metoda propusă face posibilă selectarea unei instalații de compensare longitudinală pentru limitarea fluctuațiilor de tensiune în faza de proiectare, asigurând astfel calitatea energiei electrice în rețelele cu consumatori cu sarcină în schimbare rapidă. Metoda de calcul rezultată este planificată a fi utilizată în rețelele electrice de distribuție atunci când se efectuează măsuri tehnice pentru asigurarea calității energiei electrice.

Cuvinte-cheie: motoare asincrone, sarcină semnificativ variabilă, variație de tensiune, doză de pâlpâire, putere activă, putere reactivă, setare de compensare în serie.

Уменьшение колебаний напряжения в электрических сетях, питающих электродвигатели с резкопеременной нагрузкой, путем установки батарей продольной компенсации

Басманов В.Г., Калинина Е.А., Черепанов В.В.

Вятский государственный университет

Киров, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена уменьшению колебаний напряжений в электрических сетях промышленных предприятий с помощью батарей продольной компенсации. Актуальность работы подчеркивается тем, что проблема обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях продолжает оставаться одним из важнейших, определяющих надежность и эффективность электроснабжения потребителей. Целью данной работы является разработка способа расчета оптимальных параметров установки продольной компенсации, позволяющего выполнять расчеты, используя числовые характеристики размахов изменения напряжения сети и дозы фликера. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать методику выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, используя предложенную методику разработать способ расчета, позволяющий выбирать оптимальные параметры конденсаторных установок. В связи с этим авторами были выполнены исследования источников колебаний напряжения, которые применяются для создания полигонов математического ожидания и среднего квадратического отклонения, а также получения их основных числовых характеристик по активной и реактивной нагрузке обследованных электроприводов. Наиболее существенным результатом является экспериментальное и теоретическое подтверждение того, что предложенный способ выбора параметров батарей продольной компенсации с учетом случайного характера изменения дозы фликера позволяет эффективно применять продольную компенсацию для снижения колебаний напряжения в электрических сетях промышленных предприятий с резко переменным характером нагрузки. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный метод позволяет производить выбор установки продольной компенсации для ограничения колебаний напряжения на стадии проектирования, и, тем самым, обеспечить качество электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку. Полученный способ расчета планируется использовать в распределительных электрических сетях при выполнении технических мероприятий по обеспечению качества электрической энергии, а также в проектных организациях при проектировании новых объектов.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, резко переменная нагрузка, размах изменения напряжения, доза фликера, активная мощность, реактивная мощность, установка продольной компенсации.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема качества электрической энергии была и на сегодняшний день остается одной из наиболее важных проблем электроэнергетики [1-16].

В последние десятилетия большинство промышленных предприятий оснащается электронным оборудованием, микропроцессорной и вычислительной техникой, которые наиболее чувствительны к электромагнитным помехам, к изменениям качества электрической энергии. Изменение качества вызвано значительным увеличением установленной мощности нелинейных и резко переменных нагрузок [4-10].

К числу основных показателей качества электрической энергии относятся колебания напряжения. Колебания напряжения вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резко переменного характера [12,13,17-20]. Для этих приемников характерным является быстрые изменения амплитуды активной и реактивной мощности нагрузки,

потребляемой из питающей сети, и большая частота этих изменений.

По степени влияния резко переменных нагрузок на колебания напряжения и распространение этих колебаний можно выделить две группы таких приемников:

- приемники среднего напряжения номинальной мощностью в несколько сот киловатт и больше, применяемые в промышленности, например, дуговые печи, сталелитейные печи, электродвигатели переменного тока с частыми пусками и другие;

- приемники низкого напряжения номинальной мощностью в несколько десятков киловатт и меньше, применяемые в промышленности (сварочные машины, станы) и в коммунально-бытовом хозяйстве (лифты, электроприборы и аппараты в домашнем хозяйстве с электромеханическим и электрическим управлением потребления мощности и другие).

При резко переменных нагрузках низкого напряжения на величину колебаний напряжения влияют амплитуды изменений

активных и реактивных составляющих токов приемников. При резко переменных нагрузках среднего напряжения в основном влияние оказывают только изменений амплитуды реактивных составляющих нагрузок этих приемников [13,14].

К источникам колебаний напряжения относятся: дуговые сталеплавильные печи (ДСП), рудно-термические печи, индукционные печи [17,18,21]; дуговая и контактная сварка [15,17,18,20]; краны и лебедки; управляемые выпрямительные установки; станы горячей прокатки; приводы прокатных станков: блюминги, слябинги; пуск мощных электродвигателей (насосов, компрессоров); коммунально-бытовая нагрузка (кухонное оборудование, стиральные машины, водонагреватели, лифты, кондиционеры); рентгеновские аппараты и другие [15,17,18,22].

Колебания напряжения, возникающие при резкопеременной нагрузке, распространяются по всей сети, вызывая колебания напряжения на зажимах всех, в том числе, потребителей со спокойной нагрузкой, отрицательно сказываются на зрении человека и на протекание технологического процесса.

При колебаниях напряжения наблюдается погасание газоразрядных ламп, отпадают контакты магнитных пускателей, выходят из строя батареи конденсаторов и вентили преобразовательных агрегатов [4,8-10]. Также отрицательное влияние испытывают большинство потребителей электроэнергии. Кроме того, колебания напряжения считаются основной проблемой качества электроэнергии, вызывающей повышение температуры, перегрузку генераторов и двигателей и влияющей на людей через раздражающее мерцание света [17]. Надо также отметить, что в настоящее время развитие оборудования с цифровым управлением требует повышения качества электроэнергии. Однако не существует конкретной инфраструктуры, которая мотивировала бы проектирование энергосистемы для достижения определенного уровня качества электроэнергии [18]. В этой статье рассматривается механизм интерактивного динамического контроля качества электроэнергии для концептуализации затрат и выгод от качества электроэнергии. Основная цель состоит в том, чтобы обеспечить инженерную инфраструктуру и

процедуру, которые "подают правильные сигналы" поставщику электроэнергии и потребителю, чтобы сбалансировать качество электроэнергии и стоимость. В предлагаемой инфраструктуре используется вектор индекса уровня качества электроэнергии.

В статье [19] показано, что можно использовать индексы колебаний напряжения для эффективного определения местоположения возмущающих нагрузок в радиальных электросетях. Представленный способ определения местоположения возмущающих нагрузок и оценки параметров основан на индексах колебаний напряжения. Но в данной работе не предлагаются способы уменьшения этих колебаний.

В работах [23,24] предлагается новый алгоритм обнаружения колебаний напряжения на основе вейвлет-преобразования, предназначенный для обнаружения быстрых изменений в сигналах напряжения. Использование вейвлетов обеспечивает одновременную передачу частотно-временной информации о сигнале, что представляет особый интерес при обработке событий напряжения.

В статье [25] предложена усовершенствованная схема управления напряжением с прогнозом для работы регулятора напряжения в распределительной системе, чтобы минимизировать ожидаемый риск нарушения напряжения. В предлагаемой схеме прошлое кратковременное отклонение напряжения аппроксимируется, а прогнозные значения напряжения в местах расположения датчиков оцениваются по текущему вторичному напряжению регулятора напряжения. Таким образом, предлагаемая схема является автономной схемой управления и не требует измерения значений напряжения в режиме реального времени, как в других схемах управления напряжением.

В работе [26] предлагается метод оценки линии и выбора местоположения чувствительной нагрузки для уменьшения падения напряжения на чувствительных нагрузках.

Для сетевой стороны предложен энергетический индекс изменения напряжения.

Для стороны нагрузки предлагается функция степени влияния изменения напряжения. Предложенные показатели могут оценивать систему электроснабжения более комплексно и обоснованно.

Существуют различные направления по улучшению показателей качества электрической энергии, в т.ч. снижение колебаний напряжения. К числу, которых можно отнести применение устройств продольной компенсации (УПК), которые являются традиционным техническим средством, применяемым, для повышения пропускной способности, обеспечения эффективной загрузки и работы в целом линий. УПК является наиболее экономичным способом увеличения пропускной способности внутрисистемных и межсистемных связей, одновременно они могут применяться для улучшения показателей качества электроэнергии. Другим направлений по уменьшению колебаний напряжения является применение унифицированных кондиционеров качества электроэнергии (UPQC). Широкое применение UPQC для улучшения показателей качества электроэнергии в последние годы обусловлено возможностями одновременной компенсации как со стороны питающей сети, так и со стороны потребителя [27-32]. Но из-за высокой стоимости вопрос о размещении UPQC в системе распределения должен решаться с большой осторожностью и предпочтительно решаться как проблема оптимизации. Оптимизация задачи размещения UPQC в конкурентной среде заключается в минимизации потерь мощности, минимизации полных гармонических искажений (ТНД), улучшении профиля напряжения и уменьшении дисбаланса в нормальных условиях и условиях провисания напряжения [29].

Еще одним направлением по уменьшению колебаний напряжения является применение компенсаторов типа СТАТКОМ, где используются управляемые преобразователи напряжения. Принцип работы компенсатора СТАТКОМ основан на формировании желаемых мгновенных значений напряжений и токов, потребляемых на входе устройства, за счет применения векторного управления и широтно-импульсной модуляции [31, 33-35]. Для уменьшения колебаний напряжения более эффективно применение специализированного устройства, которое называется ДСТАТКОМ.

К числу устройств для снижения колебаний напряжения также относится динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН — DVR) [36,37].

Применение DVR в настоящее время является одной из наиболее распространенных процедур смягчения перепадов напряжения [36]. В процессе работы DVR подает напряжение последовательно с напряжением системы, а ДСТАТКОМ подает ток в систему для устранения проблем с качеством электроэнергии [37].

Анализ многочисленной литературы показал, что вопрос обеспечения качества электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку, весьма актуален и требует решения комплекса методических, организационных и технических мероприятий. Нужно отметить, что часто эти решения являются дорогостоящими, и во многих случаях расходы приходится нести заказчику. Таким образом, перед применением решения для обеспечения качества электроэнергии необходимо детально проанализировать проблему и также рассчитать соотношение затрат и выгод. Кроме того, нужно отметить, что эффективность применения устройств для снижения колебаний напряжения определяется методикой выбора параметров устройств для уменьшения колебаний напряжения.

В детерминированной постановке методики выбора параметров устройств для уменьшения колебаний напряжения известны и описаны в литературе, например, [4,38]. В этих методиках в качестве показателя, характеризующего колебания напряжения принят размах изменения напряжения. В настоящее время показателем колебаний напряжения является доза фликера, изменяющаяся во времени случайным образом [12]. Анализ литературы показал, что методики выбора параметров перечисленных выше устройств с учетом случайного характера изменения дозы фликера отсутствуют. При их разработке необходимо использовать методы расчета дозы фликера, учитывающие стохастический характер ее изменения. Исходя из вышеперечисленного, авторами было принято решение о применении для уменьшения колебаний напряжения установок продольной компенсации реактивной мощности (УПК).

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель данной работы состоит в разработке способа расчета оптимальных параметров

установки продольной компенсации, позволяющего выполнять расчеты, используя числовые характеристики размахов изменения напряжения сети и дозы фликера.

В соответствии с целью были определены следующие задачи:

- разработка методики выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающей случайный характер изменения параметров режимов сети;

- используя методику, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, разработать способ расчета, позволяющий выбирать оптимальные параметры конденсаторных установок.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач использовались методы экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования выполнялись на предприятии, деятельность которого направлена на обработку древесины и производство фанеры. Основными электроприемниками, участвующими в технологическом процессе, являются электродвигатели, имеющие повторно-кратковременный режим работы с резкопеременной нагрузкой случайного характера. Исследования выполнялись с помощью приборов:

- анализатор качества электрической энергии «PQM-701»
- анализатор электропотребления AR.5.

Решение поставленных задач достигалось путем применения методов математической статистики, теории вероятностей [38], теории случайных импульсов [39], с применением теоретических основ электропривода и электроснабжения [40].

На деревообрабатывающем предприятии в ходе экспериментальных исследований были получены зависимости активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощностей для механизмов с резкопеременной нагрузкой. Была выполнена математическая обработка, которая позволила получить усредненные статистические нагрузочные диаграммы. Данные диаграммы представляют собой совокупность наиболее вероятных значений характерных точек нагрузочных кривых $P(t)$ и $Q(t)$.

Вероятностный характер изменения нагрузки вызван воздействием нескольких случайных факторов: изменением плотности древесины, вкраплениями сучков, неравномерностью скорости подачи сырья, случайным диаметром фанерного кряжа.

Пример полученных усредненных статистических нагрузочных диаграмм по активной и реактивной мощностям для одного из обследованных механизмов приведен на рис. 1.

На рис. 1 применяются следующие обозначения: P_{act} , Q_{act} - фактические значения активной и реактивной мощностей; $P_{av.w.}$, $Q_{av.w.}$ - средняя активная и реактивная мощности за время работы t_w .

Полученные усредненные статистические нагрузочные диаграммы можно рассматривать как типовые. Их использование возможно для проектирования аналогичных производств при выборе электродвигателей электроприводов технологического оборудования, выборе кабелей, при расчете колебаний напряжения и дозы фликера.

В ходе выполняемых исследований установлено, что изучаемые процессы, происходящие при работе электроприводов с резко переменным характером нагрузки, являются случайными. Поэтому предложено рассматривать графики $P(t)$ и $Q(t)$ как импульсные случайные процессы со случайной амплитудой, временем цикла и продолжительностью включения под нагрузку.

Для исследования колебаний напряжения и дозы фликера значения имеют только точки экстремума графиков активной и реактивной мощности, поэтому предложено графики нагрузок рассматривать состоящими из точек, соответствующих экстремумам данных графиков, соединенных прямыми линиями. Такие графики предлагается описывать решетчатыми моделями и интерполировать сплайн-функциями первой степени.

Для примера на рис. 2 приведены полигоны моделей математического ожидания и среднего квадратического отклонения активной мощности главного привода одного из механизмов фанерного производства.

Предложено графики $Q(t)$, также как и графики $P(t)$, описывать решетчатой

моделью, интерполированной сплайн-функцией первого порядка.

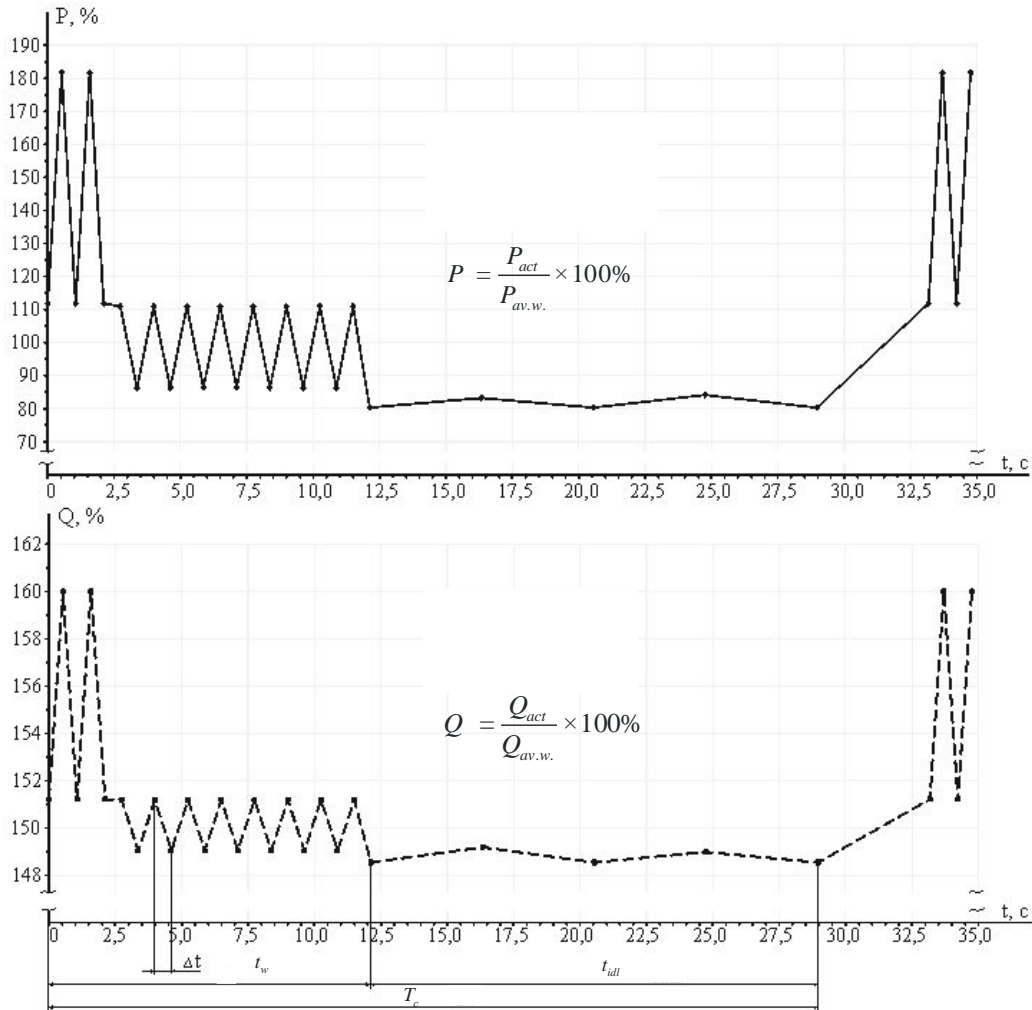


Рис. 1. Усредненные статистические нагрузочные диаграммы $P(t)$ и $Q(t)$ для электропривода механизма спиральной рубительной машины «Корорубка» фанерного производства.¹

Согласно [41], колебания напряжения характеризуются только одним показателем - дозой фликера [42]. Как известно, доза фликера рассчитывается по значениям размахов изменения напряжения сети $\delta U_{r\%}$, %,

$$\delta U_{r\%} = (\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot x) / U^2 \cdot 100 \quad (1)$$

где U — напряжение на источнике питания;
 ΔP , ΔQ — размах изменения активной и реактивной мощностей, кВт, квар;
 r , x — активное и реактивное сопротивление сети.

Используя полигоны моделей математических ожиданий и средних квадратических отклонений активной и реактивной мощности, можно получить размахи изменения активной и реактивной

мощностей, и подставив их значения в уравнение (1) рассчитать размах изменения напряжения сети.

Обеспечение качества электрической энергии в сетях с потребителями, имеющих резко переменную нагрузку, требует решения комплекса методических, организационных и технических мероприятий.

Одним из способов ограничения колебаний напряжения, относящимся к техническим мероприятиям, является выбор и установка средств компенсации реактивной мощности.

Традиционно применяются два вида компенсации:

- поперечная компенсация;
- продольная компенсация реактивной мощности.

¹ Appendix 1

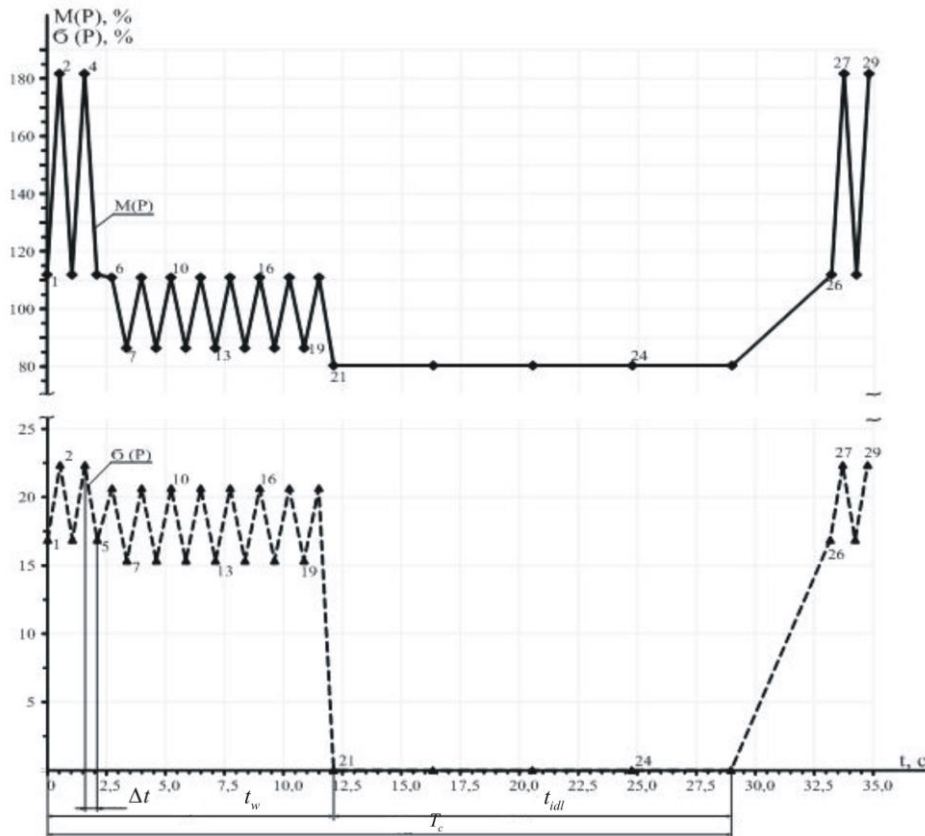


Рис. 2. Пример полигона моделей математических ожиданий и средних квадратических отклонений активной мощности главного привода механизма спиральной рубительной машины «Корорубка» фанерного производства.²

Поперечная компенсация нашла широкое применение, поскольку позволяет: уменьшить потери активной мощности при сохранении величины передаваемой мощности; увеличить пропускную способность сети; повысить передаваемую мощность.

Если есть колебания напряжения, применяется продольная компенсация реактивной мощности.

Главное её назначение – частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической цепи для уменьшения потери напряжения в них. При продольной компенсации конденсаторы включаются в сеть последовательно, через них проходит полный ток линии.

На рис. 3 приведена принципиальная схема включения установки продольной компенсации (УПК) в электрическую сеть.

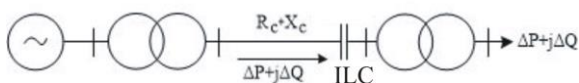


Рис. 3. Принципиальная схема включения УПК в электрическую сеть.³

При применении УПК уравнение (1) примет вид:

$$\delta U_{t\%} = (\Delta P \cdot r + \Delta Q \cdot (x - x_{ILC})) / U^2 \cdot 100, \quad (2)$$

где x_{ILC} — сопротивление установки продольной компенсации.

Ниже авторами предложен способ расчета сопротивления установки продольной компенсации.

Сопротивление установки продольной компенсации можно определить по известной формуле:

$$X_{ILC} = (\Delta U_{ILC} \cdot U_b) / \Delta Q, \quad (3)$$

где ΔU_{ILC} — величина напряжения, на которую необходимо уменьшить существующий размах напряжения с помощью УПК;

ΔQ — бросок (импульс) реактивной мощности;

U_b — базисное напряжение.

Предлагается вычислять максимальное значение дозы фликера P_{st}^{max} на интервале осреднения 10 мин., используя уравнение (4):

$$P_{st}^{\max} = M[P_{st10}] + \beta \sqrt{D[P_{st10}]} \\ = M[P_{st10}] + \beta \cdot \sigma[P_{st10}], \quad (4)$$

где β — коэффициент, зависящий от закона распределения дозы фликера P_{st} ;

$M[P_{st10}]$ — математическое ожидание дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.;

$D[P_{st10}]$ — дисперсия дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.;

$\sigma[P_{st10}]$ — среднее квадратическое отклонение дозы фликера на интервале осреднения 10 мин.

Далее определяется средний размах изменения напряжения, при котором достигается P_{st}^{\max} . При этом, можно записать:

$$P_{st}^{\max} = \sqrt[3]{n \cdot P_{st.av}^3}, \quad (5)$$

где $P_{st.av}$ — среднее значение импульса дозы фликера;

n — количество импульсов на интервале 10 минут.

Из уравнения (5) следует:

$$P_{st.av} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \cdot (P_{st}^{\max})^3} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \cdot P_{st}^{\max}}. \quad (6)$$

Если в уравнение (6) подставить нормативное значение кратковременной дозы фликера $P_{st}^{\max} = 1,38$ [41], то определим допустимое значение размаха напряжения d_{adm} , при котором доза фликера не будет превосходить указанное в стандарте значение, по формуле, приведенной в [11].

$$d_{adm} = \frac{P_{st} \cdot d_0}{F_{eq}}, \quad (7)$$

где F_{eq} — коэффициент эквивалентности, зависящий от формы колебаний напряжения [11];

d_0 — допустимый размах колебаний напряжения.

Величина ΔU_{ILC} вычисляется по формуле:

$$\Delta U_{ILC} = \frac{|d_{av} - d_{adm}|}{100} \cdot U_{nom}. \quad (8)$$

Размах изменения напряжения сети вычисляется по известному уравнению (1).

Учитывая, что активная и реактивная мощности для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором связаны аналитически, то с учетом этого, уравнение (1) можно записать в следующем виде,

$$\delta U_{t\%} = \frac{\Delta P \cdot r + L_Q \cdot \Delta P^2 \cdot x}{U^2} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где L_Q — линейные операторы активной и реактивной мощности.

Таким образом, уравнение (7) примет вид:

$$d_{av} = \frac{\Delta P_{av} \cdot r + L_Q \cdot \Delta P_{av}^2 \cdot x}{U^2} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где ΔP_{av} , ΔQ_{av} — среднее значение размаха изменения активной и реактивной мощностей, кВт, квар.

При решении квадратного уравнения, уравнение (10) примет вид:

$$\Delta P_{av} = \frac{-r \pm \sqrt{r^2 + 4 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}}{2 \cdot L_Q \cdot x}. \quad (11)$$

Отсюда

$$\Delta Q_{av} = L_Q \cdot \Delta P_{av}^2 = \\ = \frac{r^2 \pm r \cdot \sqrt{r^2 + 4 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}}{2 \cdot L_Q \cdot x^2} + \\ + \frac{2 \cdot L_Q \cdot x \cdot \frac{d_{av} \cdot U^2}{100}}{2 \cdot L_Q \cdot x^2}. \quad (12)$$

Подставив уравнения (11) и (12) в уравнение (10), определяется величина X_{ILC} .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Далее приводится пример расчета по предложенному авторами способу для группы деревообрабатывающего оборудования.

Расчет выполняется для шести электродвигателей: два лущильных станка, корорубка, барабанная рубительная машина «Дробилка шпона», окорочный станок и пила. Данные электроприемники являются источниками резкопеременной нагрузки, получают питание от одной секции шин трансформаторной подстанции (рис. 4).

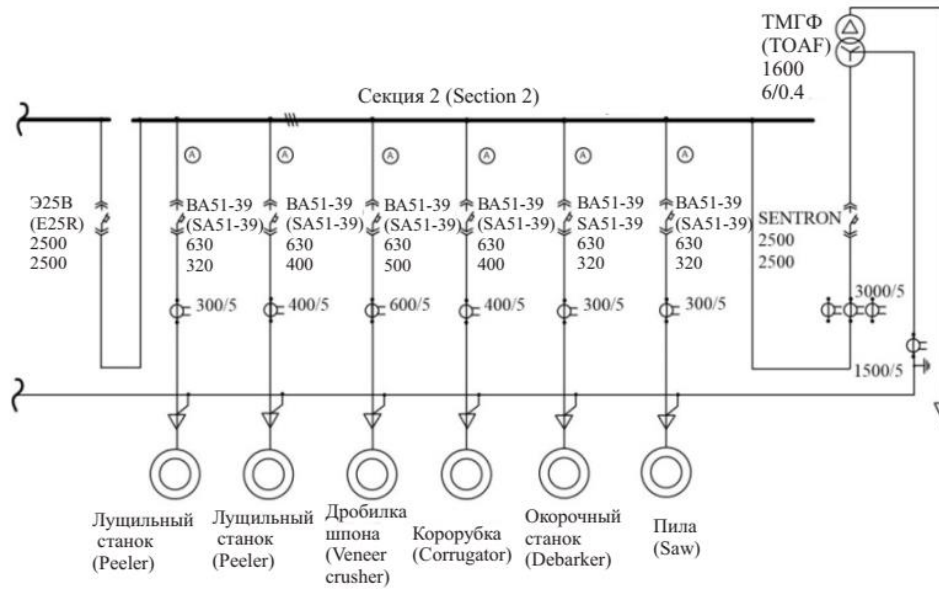


Рис. 4. Схема подключения главных приводов механизмов, являющихся источниками резкопеременной нагрузки.⁴

Задача заключается в определении сопротивления установки продольной компенсации, включаемой в сеть последовательно и предназначенную для снижения колебаний напряжения. Напряжение сети $U = 400$ В, активное сопротивление сети $r = 0,0015$ Ом, реактивное сопротивление сети $x = 0,0079$

Ом, количество импульсов на интервале 10 минут $n = 118$ шт., $L_Q = 1,97 \cdot 10^{-5}$, В/Вт.

На рис. 5 приведен фрагмент модели математического ожидания группового графика активной электрической нагрузки главных приводов механизмов, получающих питание от второй секции шин трансформаторной подстанции.

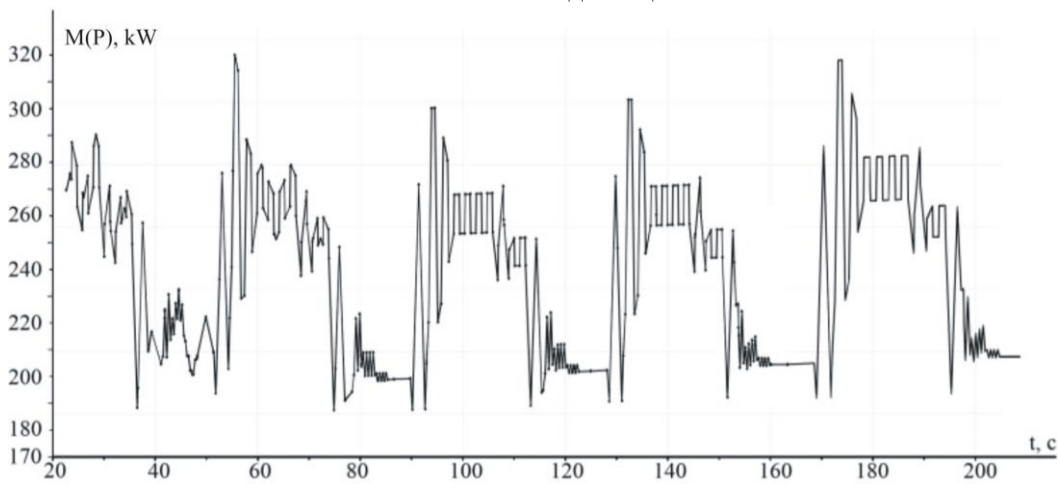


Рис. 5. Фрагмент модели математического ожидания группового графика активной электрической нагрузки.⁵

Расчет максимального значения дозы фликера на интервале осреднения 10 минут, возникающей при работе группы электроприводов (рис. 4) выполняется при помощи программы для расчета кратковременной дозы фликера при стохастическом характере нагрузок, которая разработана и описана в более ранних работах авторов статьи. В результате расчетов получили $P_{st}^{max} = 1,61$.

Используя уравнение (6), найдем $P_{st.av}$:

$$P_{st.av} = \sqrt[3]{\frac{1}{118}} \cdot 1,61 = 0,32. \quad (12)$$

Тогда по уравнению (7):

$$d_{av} = \frac{0,32 \cdot 2,75}{0,46} = 1,91.$$

Используя уравнение (6) найдем $P_{st.norm.}$:

$$P_{st.norm.} = \sqrt[3]{\frac{1}{118}} \cdot 1,38 = 0,28.$$

где $P_{st}^{max} = 1,38$ — норма значения кратковременной дозы фликера согласно [41].

По уравнению (7):

$$d_{norm} = \frac{0,28 \cdot 2,75}{0,46} = 1,67.$$

Величина ΔU_{LC} вычисляется по уравнению (8):

$$\Delta U_{LC} = \frac{1,91 - 1,67}{100} \cdot 400 = 0,96.$$

Определим средние значения размаха изменения активной (Вт) и реактивной мощностей (вар):

$$\Delta P_{av} = \frac{-0,0015}{2 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079} \pm \sqrt{\frac{0,0015^2 + 4 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079 \cdot \frac{1,91 \cdot 400^2}{100}}{2 \cdot 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0079}} = 135393,4.$$

Отсюда

$$\Delta Q_{av} = 1,97 \cdot 10^{-5} \cdot 135393,4^2 = 361128.$$

Сопротивление установки продольной компенсации, Ом:

$$X_{LC} = \frac{0,96 \cdot 400}{361128} = 0,0011.$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены следующие результаты:

- разработана методика выбора параметров средств для уменьшения колебаний напряжения, учитывающая случайный характер изменения параметров режимов сети;

- разработан способ расчета, использующий методику, учитывающую случайный характер изменения параметров режимов сети, который позволяет выбирать оптимальные параметры установок продольной компенсации для снижения колебаний напряжения.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Averaged statistical load diagrams $P(t)$ and $Q(t)$ for the electric drive of the mechanism of the spiral chipper "Kororubka" of plywood production.

²**Fig. 2.** An example of a polygon of models of mathematical expectations and standard deviations of the active power of the main drive of the mechanism of the spiral chipper "Kororubka" of plywood production.

³**Fig. 3.** Schematic diagram of the inclusion of the LCU in the electrical network.

⁴**Fig. 4.** Wiring diagram of the main drives of mechanisms that are sources of rapidly changing load.

⁵**Fig. 5.** Fragment of the mathematical expectation model of the group graph of active electrical load.

Литература (References)

- [1] Kusko A., Thompson M.T., Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, New-York, 2007. 225 p.
- [2] Chopade P.V., Bugade V.A., Bharadwaj D.G., Ensuring Power Quality and Reliability- A Step Towards Securing Energy for the Future. Proceedings of National Power System Conference NPSC, at Indian Institute of Technology (IIT) Roorkee, India, December 26-29, 2006, pp. 17-23.
- [3] Diakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K. Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike i elektrotehnike [Electromagnetic compatibility in electric power and electrical engineering]. Moscow, Energoatomizdat. 2003. 768 p. (In Russian).
- [4] Savina N.V. Kachestvo elektroenergii [Power quality]. Blagoveshchensk, Amurskiy gosudarstvennyy universitet. 2014. 182 p. (In Russian).
- [5] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. Third Edition. McGraw-Hill, 2012. 558 p.
- [6] Stones J., Collinson A. Power quality. *Power Engineering Journal*, 2001, vol. 15, no. 2, pp. 58-64. doi: 10.1049/pe:20010201.
- [7] Jazebi S., Vahidi B. Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 91, pp. 9-17, doi: dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.04.008.
- [8] Azcarate I., Gutierrez J.J., Lazkano A., Saiz P., Redondo K., Leturiondo L.A. Experimental study of the response of efficient lighting technologies to complex voltage fluctuations. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, vol. 63, pp. 499-506. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.039.
- [9] Gutierrez-Ballesteros E., Ronnberg S., Gil-de-Castro A. Characteristics of voltage fluctuations induced by household devices and the impact on LED lamps. *Electrical Power and Energy Systems*, 2022, vol. 141, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108158.
- [10] Gao Y., Wu C., Yao W., Cao Y., Zhang M. Time-varying voltage flicker analysis based on analytic-adaptive variational mode decomposition. *Electric Power Systems*

- Research*, 2022, vol. 212, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108245.
- [11] Zhezhenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Yu.L., Neuberger N.A. *Elektromagnitnaya sovместimost potrebiteley* [Consumer Electromagnetic Compatibility]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p.
- [12] Wiczynski G. Analysis of Voltage Fluctuations in Power Networks. in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no. 11, pp. 2655-2664. doi: 10.1109/TIM.2008.925005.
- [13] Vagin G.Ya., Kotelnikov O.I. Kachestvo elektroenergii v setyakh promyshlennykh predpriyatiy [Studies of the quality of electrical energy at machine-building enterprises and measures to improve it]. Moscow. MDNTP. 1977. pp.74-80.
- [14] Voynov S.L., Gamm A.Z., Golub I.I., Zhezhenko I.V., Zhelezko Yu.S., Neyman V.V., Sayenko Yu.L. *Normirovanie pokazateley kachestva elektricheskoy energii i ikh optimizatsiya* [Rationing of indicators of quality of electric energy and their optimization]. Irkutsk, 1988. 249 p.
- [15] Perera S., Elphick S. Applied Power Quality. Analysis, Modelling, Design and Implementation of Power Quality Monitoring Systems. 1st Edition. Elsevier. 2022. p.336. Available at: <https://shop.elsevier.com/books/applied-power-quality/perera/978-0-323-85467-2#full-description> (accessed 10.03.2023).
- [16] Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of the quality of electricity and their control at industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p. (In Russian).
- [17] Morsi W.G., El-Hawary M.E. On the appropriate monitoring period for voltage flicker measurement in the presence of distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2009, vol. 79 (4), pp. 557-561. doi:10.1016/j.epsr.2008.06.019.
- [18] Lee G.-J., Heydt G.T. An interactive–dynamic mechanism conceptualizing the cost and benefit of electric power quality. *Electric Power Systems Research*. vol. 69, pp. 69–75, 2004. doi:10.1016/j.epsr.2003.07.011.
- [19] Wiczyński G. Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid. *Electric Power Systems Research*. 2020, vol. 180, doi:10.1016/j.epsr.2019.106069.
- [20] Marei M.I., El-Saadany E.F., Salama M.M.A. Estimation techniques for voltage flicker envelope tracking. *Electric Power Systems Research*. 2004, vol. 70 (1), pp. 30-37. doi:10.1016/j.epsr.2003.11.001
- [21] Novoselov N.A. *Sovershenstvovaniye metodik rascheta pokazateley kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya s dugovymi staleplavilnymi pechami maloy moshchnosti* [Improving the methods for calculating the quality indicators of electric power in power supply systems with low-power arc steel-smelting furnaces. Cand. of tech. sci. diss.]. Magnitogorsk, 2012. 166 p.
- [22] Vagin G.Ya. *Rezhimy elektrosvarochnykh mashin* [Modes of electric welding machines]. – 2nd ed. reprint. and add. Moscow, Energoatomizdat. 1985. 192 p. (In Russian).
- [23] Latran M.B., Teke A. A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, vol. 71, pp. 131-139. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.02.040.
- [24] Barros J., Diego R.I., Apráiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 88, pp. 130-136. doi: org/10.1016/j.epsr.2012.02.009.
- [25] Yoshizawa S., Hayashi Y. Advanced voltage control based on short-time ahead voltage fluctuation estimation in distribution system. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 188. doi: org/10.1016/j.epsr.2020.106559.
- [26] Ma L., Li Y., Tian D., Lou J., Chen Y., Liu X. Assessment of voltage sag/swell in the distribution network based on energy index and influence degree function. *Electric Power Systems Research*, 2023, vol. 216. doi: org/10.1016/j.epsr.2022.109072.
- [27] Panda A.K., Patnaik N. Management of reactive power sharing & power quality improvement with SRF-PAC based UPQC under unbalanced source voltage condition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 182-194. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.05.010.
- [28] Patjoshi R.K., Kolluru V.R., Mahapatra K. Power quality enhancement using fuzzy sliding mode based pulse width modulation control strategy for unified power quality conditioner. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, vol. 84, pp. 153-167. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.05.007.
- [29] Sarker J., Goswami S.K. Optimal Location of Unified Power Quality Conditioner in Distribution System for Power Quality Improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 83, pp. 309-324. doi: org/10.1016/j.ijepes.2016.04.007.
- [30] Khalse S. S. The Unified Power Quality Conditioner (UPQC): The Principle, Control and Application. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, 2018, vol. 03, no. 11, pp. 126-129. Available at: <https://ijream.org/papers/IJREAMV03I113533.pdf>. (accessed 10.06.2023).
- [31] Ghosh A., Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Springer

- New York. 2002. p. 460. doi: org/10.1007/978-1-4615-1153-3.
- [32] Aminia M.A., Jalilianb A. Modelling and improvement of open-UPQC performance in voltage sag compensation by contribution of shunt units. *Electric Power Systems Research*, 2020, vol. 187. doi: org/10.1016/j.epsr.2020.106506.
- [33] Bhim S., Saha R. Modeling of 18 – pulse STATCOM for power systems applications. *Journal of power electronics*, 2007, vol. 7 (2), pp. 146-158.
- [34] Yang Z., Zhao G., Yu H., Current limiting control method with adaptive virtual impedance for grid-forming STATCOM, *Energy Reports*, vol. 9, Supplement 2, 2023, pp. 453-460. doi: org/10.1016/j.egyr.2023.03.023.
- [35] Koshelev K.S., Peshkov M.V. Vybor parametrov staticheskogo kompensatora reaktivnoi moshchnosti STATKOM [STATCOM static reactive power compensator parameter selection]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2007, no. 8, pp. 34–37.
- [36] Saeeda A.M., Abdel Aleemb S.H.E., Ibrahima A.M., Balcic M.E., El-Zahaba E.E.A. Power conditioning using dynamic voltage restorers under different voltage sag types. *Journal of Advanced Research*. 2016, vol. 7(1), pp. 95-103. doi: org/10.1016/j.jare.2015.03.001.
- [37] Ghosh H., Kumar Saha P., Kumar Panda G. Performance comparison between DVR and DSTATCOM used for load voltage control in distribution side. 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), Mylavaram, India, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/APCET.2012.6302026.
- [38] Savina N.V. *Primeneniye teorii veroyatnostey i metodov optimizatsii v sistemakh elektrosnabzheniya* [Application of probability theory and optimization methods in power supply systems]. – Blagoveshchensk, Amurskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2007. 271 p. (In Russian).
- [39] Shpiganovich A. N. *Matematicheskoye modelirovaniye sistem i tekhnologicheskikh kompleksov sluchaynymi potokami* [Mathematical modeling of systems and technological complexes with random flows]. Lipetsk, 2007. 209 p.
- [40] Andreyev V.P., Sabinin Yu.A. *Osnovy elektropriroda* [Drive Basics]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1963. 772 p. (In Russian).
- [41] *GOST 32144-2013 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standart 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
- [42] Axelberg P.G.V. Measurement Methods for Calculating of the Direction to a Flicker Source. Thesis for the degree of Licentiate of Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden 2003. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266408498_Measurement_Methods_for_Calculating_of_the_Direction_to_a_Flicker_Source. (accessed 10.02.2023).

Сведения об авторах.



Басманов Владислав Геннадьевич, к.т.н., доцент. Область научных интересов: надежность электроснабжения, качество электрической энергии, энергосбережение. E-mail: basmanov@vyatsu.ru



Черепанов Вячеслав Васильевич, д.т.н., профессор. Область научных интересов: энергосбережение, качество электрической энергии. E-mail: stud2398@yandex.ru



Калинина Екатерина Андреевна, к.т.н. Область научных интересов: энергосбережение, качество электрической энергии "умные" сети. E-mail: kalininakaterina@bk.ru

Study of the Efficiency of Heat-Supply Systems with Steam Turbine CHP Plants, Taking into Account Changes in the Temperature of the Delivery Water during Transportation

Suvorov D.M., Tatarinova N.V., Lyskova E.A.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to study the efficiency of steam turbine CHPPs in heat-supply systems, taking into account changes in the temperature of delivery water during transportation for various initial and extended heating regulation schedules. To achieve this goal, the following tasks were solved: calculation of the dependences of the delivery water cooling in the supply and return pipelines on the air temperature, construction of temperature and flow rate schedules of delivery water adjusted for heat losses during transportation, calculation of energy efficiency indicators for the operation of a model CHPP with various options for correcting schedules of delivery water. The most significant results are the following. Firstly, for the first time the method of the degree-by-degree calculation of heat losses during transportation and their distribution between pipelines of heating networks was used. Secondly, the dependences of the delivery water cooling in these pipelines on the outside air temperature are calculated. Thirdly, it has been established that the specific reference fuel consumption for electricity supply significantly decreases when switching to more efficient temperature schedules for heating regulation, but changes slightly when switching from natural regulation by flow rate to regulation by the temperature of the delivery water. The significance of the obtained results lies in the possibility of their use for an accurate assessment of the efficiency of heat supply systems with different heating control schedules and for determining the feasibility of correcting temperature schedules in order to take into account the cooling of delivery water during transportation.

Keywords: heat-supply system, heating load, heat-transfer agent transportation, temperature schedule, CHPP, delivery water cooling.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.06>

UDC: 697.34

Studiul eficienței sistemelor de alimentare cu căldură cu centrale de cogenerare cu turbine cu abur, ținând cont de modificările temperaturii apei din rețea în timpul transportului

Suvorov D.M., Tatarinova N.V., Lyskova E.A.

Universitatea de Stat din Veatka, Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia eficiența CHPP-urilor cu turbine cu abur în sistemele de alimentare cu căldură, ținând cont de schimbările de temperatură de livrare a apei în timpul transportului pentru diverse programe inițiale și extinse de reglare a încălzirii. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: calculul dependențelor de răcire a apei de livrare în conductele de alimentare și retur de temperatura aerului, construirea graficelor de temperatură și debit al apei de livrare ajustate pentru pierderile de căldură în timpul transportului, calculul indicatori de eficiență energetică pentru funcționarea unui model de CET cu diverse opțiuni de corectare a programelor de livrare a apei. Cele mai semnificative rezultate sunt următoarele. În primul rând, a fost utilizată pentru prima dată metoda de calcul grad cu grad al pierderilor de căldură în timpul transportului și distribuția acestora între conductele rețelelor de încălzire. În al doilea rând, se calculează dependențele de răcire a apei de livrare în aceste conducte de temperatura aerului exterior. În al treilea rând, s-a stabilit că consumul specific de combustibil de referință pentru alimentarea cu energie electrică scade semnificativ la trecerea la programe de temperatură mai eficiente pentru reglarea încălzirii, dar se modifică ușor la trecerea de la reglarea naturală prin debit la reglarea prin temperatura apei de livrare. Semnificația rezultatelor obținute constă în posibilitatea utilizării lor pentru o evaluare precisă a eficienței sistemelor de alimentare cu căldură cu diferite programe de control al încălzirii și pentru determinarea fezabilității corectării programelor de temperatură pentru a ține cont de răcirea apei de livrare în timpul transport.

Cuvinte-cheie: sistem de alimentare cu căldură, sarcină de încălzire, transport lichid de răcire, grafic de temperatură, cogenerare, răcire cu apă din rețea.

**Исследование эффективности работы систем теплоснабжения с паротурбинными ТЭЦ при учете изменения температуры сетевой воды при транспортировке
Суворов Д.М., Татарина Н.В., Лыскова Е.А.**

Вятский государственный университет, Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью данной работы является исследование эффективности работы паротурбинных ТЭЦ в системах теплоснабжения при учете изменения температуры сетевой воды при транспортировке как в подающих, так и в обратных трубопроводах тепловых сетей для различных исходных и расширенных графиков регулирования отопления. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: расчет зависимостей остывания теплоносителя в подающих и обратных трубопроводах от температуры воздуха; построение скорректированных с учетом тепловых потерь при транспортировке графиков температур и расходов сетевой воды; расчет показателей энергетической эффективности работы модельной ТЭЦ при различных вариантах коррекции графиков температур и расходов сетевой воды. Исследование выполнено на адекватных математических моделях турбоустановок ТЭЦ и систем теплоснабжения. Основным показателем энергетической эффективности является удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, рассчитанный в сопоставимых условиях. При этом учитывались затраты электроэнергии на привод сетевых насосов, тепловые потери в теплосетях и выработка электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ. Наиболее существенными результатами являются следующие. Во-первых, впервые использована методика поградусного расчета тепловых потерь при транспортировке и их распределение между подающими и обратными трубопроводами тепловых сетей. Во-вторых, рассчитаны зависимости остывания сетевой воды в этих трубопроводах от температуры наружного воздуха. В-третьих, установлено, что удельный расход условного топлива на отпускаемую ТЭЦ электрическую энергию существенно уменьшается при переходе на более эффективные температурные графики регулирования отопления, но незначительно изменяется при переходе от естественного регулирования по расходу к регулированию по температуре теплоносителя. Значимость полученных результатов состоит в возможности их использования для точной оценки эффективности работы систем теплоснабжения с паротурбинными ТЭЦ при различных графиках регулирования отопления и для определения целесообразности коррекции температурных графиков с целью учета остывания сетевой воды при транспортировке.

Ключевые слова: система теплоснабжения, отопительная нагрузка, транспортировка теплоносителя, температурный график, ТЭЦ, остывание сетевой воды.

ВВЕДЕНИЕ

В системах теплоснабжения городов и населенных пунктах государств, расположенных на постсоветском пространстве, в последние 2-3 десятилетия все отчетливее проявляются тенденции, во-первых, к понижению максимальной температуры температурных графиков водяных систем теплоснабжения, в которых теплоносителем является сетевая вода; во-вторых, – к автоматизации регулирования теплоснабжения абонентов с учетом гидравлических характеристик как систем отопления и горячего водоснабжения абонентов, так и самих тепловых сетей.

Аргументом в пользу понижения расчетной температуры прямой сетевой воды авторы [1-3], например, считают снижение потерь при распределении теплоты. Авторы работ [4-7] считают необходимым реализацию более сложной стратегии управления системой теплоснабжения, которая обеспечивает требуемые условия комфорта в помещениях, а также снижение годового потребления топлива [4-7]. Для достижения этой цели создаются математические модели и программные

комплексы, которые позволяют провести детальные расчеты последствий снижения температурного уровня в тепловых сетях и у потребителей [8-11]. В работе [12] обосновывается возможность существенного снижения температурного графика за счет использования потенциала завышенного значения проектных тепловых потерь зданий.

Эти обстоятельства определяют целесообразность постепенного перехода систем теплоснабжения на температурные графики с использованием количественно-качественного регулирования тепловой нагрузки по ее фактической величине, и в первую очередь на расширенные графики регулирования по нагрузке отопления (РГР), которые являются наиболее энергоэффективными [13-23]. Результаты расчетов интегральной (за отопительный период) эффективности работы систем теплоснабжения в условиях пониженных температурных графиков в условиях ТЭЦ приведены в работе [24].

Остывание водяного теплоносителя в тепловых сетях происходит вследствие тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции. При соблюдении температурного графика

ка, который устанавливается для источника, то есть для коллекторов ТЭЦ, за счет остывания в подающем трубопроводе сетевая вода приходит в тепловые пункты потребителя с меньшей температурой, чем соответствует графику, а за счет остывания в обратном трубопроводе она приходит с меньшей, чем по графику, температурой на сам источник. Для целей установления тарифов на тепловую энергию производится расчет и утверждение нормативных потерь тепловой энергии и теплоносителя, основной частью которых являются именно потери тепловой энергии через теплоизоляционную конструкцию трубопроводов. Например, в России, это делается на основании документа, утвержденного приказом №325 Минэнерго [25]. Однако методологический подход этого документа дает возможность определить указанные потери только интегрально за год или за отопительный период и не дает возможности напрямую рассчитать их в зависимости от температуры наружного воздуха и распределить между подающим и обратным трубопроводами.

В работе [24] при расчете интегральных удельных показателей эффективности при отпуске электрической энергии ТЭЦ с использованием методики, изложенной в [25], были определены нормативные тепловые потери теплоносителя в целом за отопительный период, которые для модельной системы теплоснабжения при наличии трубопроводов, построенных ранее 1997 года, составили от 5.5 до 7.8% от величины отпуска тепловой энергии в сеть за тот же период, однако режимы работы агрегатов ТЭЦ были рассчитаны без учета изменения параметров теплоносителя, обусловленных этими потерями. По данным ряда авторов, реальные тепловые потери в тепловых сетях за счет изношенности тепловой изоляции трубопроводов могут быть в 2-3 раза выше нормативных, и наиболее действенным способом снижения тепловых потерь при транспортировке является переход на пониженные температурные графики и низкопотенциальные системы теплоснабжения в целом [26-30].

Расчет остывания теплоносителя при транспортировке может производиться либо для средних за период значений расхода теплоносителя и его температур в подающем и обратном трубопроводах, либо для дискретных значений расходов и температур, соответствующих определенным температурам наружного воздуха (по их графикам). Приме-

нительно к данному исследованию предполагается произвести расчеты эффективности работы ТЭЦ поградусно и интегрально за отопительный период (с учетом длительности стояния наружных температур), поэтому требуется расчетное определение потерь при транспортировке отдельно в подающем и в обратном трубопроводах для каждого целочисленного значения наружной температуры (то есть поградусно), и на основании этого – отдельный расчет поградусного остывания сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах. Для этого может быть использована как адаптированная методика расчета нормативных потерь, основанная на документе [25], так и методика расчета удельных тепловых потерь, учитывающая нормативное термическое сопротивление теплоизоляционного слоя и температурный напор теплопередачи и изложенная в работе [31].

Целью данной работы является исследование на математической модели ТЭЦ и системы теплоснабжения эффективности работы паротурбинных ТЭЦ при учете изменения температуры сетевой воды при транспортировке как в подающих, так и в обратных трубопроводах тепловых сетей для различных (по максимальной температуре сетевой воды) исходных и расширенных графиков регулирования отопления.

Для моделируемой ТЭЦ при этом учитывается реально возможная конфигурация тепловых сетей, соответствующая длинам, диаметрам и способу прокладки теплопроводов. При этом решаются следующие задачи. Во-первых, это выбор наиболее подходящей для расчета остывания теплоносителя методики расчета нормативных тепловых потерь и граничных условий для поградусного ее применения. Во-вторых, это расчет зависимостей остывания теплоносителя в подающих и обратных трубопроводах при разных температурных графиках. В-третьих, это построение скорректированных с учетом тепловых потерь при транспортировке графиков температур и расходов сетевой воды. В-четвертых, это расчет показателей энергетической эффективности работы модельной ТЭЦ в характерных режимах при различных вариантах коррекции графиков температур и расходов сетевой воды при учете как потерь тепловой энергии при транспортировке, так и затрат энергии на привод сетевых насосов. В-пятых, наконец, это сопоставление различных вариантов коррекции графиков температур и рас-

ходов сетевой воды с точки зрения энергоэффективности между собой и с изменением энергоэффективности при переходе на пониженные и расширенные графики регулирования по нагрузке отопления.

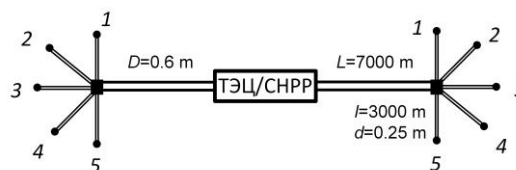
МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ РАСЧЕТОВ

Расчет режимов работы агрегатов модельной ТЭЦ выполняется на основании программы расчета турбоустановки Т-50-12.8 [24]. Исследование производится для климатических условий г. Кирова. Граничные условия моделирования нагрузок и режимов работы агрегатов ТЭЦ соответствуют принятым в предыдущем расчетном исследовании [24], а именно: величина расчетной тепловой нагрузки потребителей принята равной 220 МВт, чему соответствует два возможных варианта состава основного оборудования ТЭЦ с одной и с двумя турбинами, которым соответствуют характерные значения коэффициента теплофикации α : $\alpha=0.5$ (на ТЭЦ работает один турбоагрегат) и $\alpha=1.0$ (работают два турбоагрегата данного типоразмера) соответственно. За счет тепловых потерь при транспортировке теплоносителя и на их величину тепловая нагрузка ТЭЦ увеличивается, причем для расчета изменения режимов работы ТЭЦ эти потери рассчитываются для каждого значения тепловой нагрузки, то есть для каждого целочисленного значения температуры наружного воздуха (поградусно). В тепловые потери при транспортировке включаются только потери через теплоизоляционную конструкцию теплопроводов и не включаются потери с утечками теплоносителя ввиду их незначительности и неопределенности.

За исходный температурный график (ИТГ) сетевой воды модельной ТЭЦ принят 150/70°C; при температуре прямой сетевой воды $\tau_{10}=150^\circ\text{C}$, соответствующей расчетной для проектирования систем отопления для г. Кирова температуре воздуха -33°C , производится срезка. Пониженный температурный график принят 130/70°C, также со срезкой при температуре -33°C . Расширенные графики регулирования (РГР) рассчитаны также со срезкой при двух максимальных температурах теплоносителя – $\tau_{10}=150^\circ\text{C}$ и $\tau_{10}=130^\circ\text{C}$. Все графики рассчитаны только по отопительной нагрузке без спрямления вплоть до температуры включения отопления $+8^\circ\text{C}$ [24].

Для исследуемой системы теплоснабжения, как и в работе [24], выбраны две основные тепловые магистрали длиной 7 км, отходящие от ТЭЦ, и по 5 ответвлений от каждой из этих основных магистралей, длиной по 3 км каждая (рис. 1).

Магистрали выполнены при подземной канальной прокладке. Их исходные диаметры приняты по оптимальной скорости теплоносителя и составляют для всех исследованных температурных графиков 600 мм для основных магистралей и 250 мм для ответвлений от магистралей (рис. 1).



1-5 – ответвления от каждой из двух основных магистралей; D, L – длина и диаметр основной магистрали; d, l – длина и диаметр каждого ответвления от основной магистрали

Рис. 1. Схема двухтрубной системы теплоснабжения исследуемой модельной ТЭЦ.¹

Расчеты проводились поградусно по каждой целочисленной температуре наружного воздуха в отопительный период. Определение интегральных за отопительный период характеристик выполнялось с учетом длительности стояния температур в каждом одноградусном интервале, при этом использовались данные, приведенные в работе [14].

Расчет гидравлических потерь в трубопроводах тепловых сетей производился по стандартной методике с учетом потерь по длине трубопроводов при известной скорости теплоносителя в каждом из них и потерь в местных сопротивлениях, аналогично тому, как это было сделано в работе [24].

Расчет остывания теплоносителя может производиться по нормативным или по фактическим значениям тепловых потерь при транспортировке. С учетом модельного характера исследования, величина остывания теплоносителя в подающих и обратных магистралях может быть задана любой (в разумном диапазоне), но для достижения цели исследования важно получить правильные зависимости величин остывания от температуры наружного воздуха при заданном температурном графике, а также при проведении расчетов правильно распределить суммарные

¹ Appendix 1

тепловые потери (и соответствующее им остывание теплоносителя) между подающей и обратной магистралями. Это приводит к необходимости использовать для расчетов нормативную документацию и результаты ранее выполненных исследований в данной области.

Для определения нормативных тепловых потерь в тепловых сетях, спроектированных и построенных в России и на постсоветском пространстве (основная часть этих сетей строилась еще в период существования СССР) может использоваться методика [25]. Однако использование этой методики напрямую распространяется только на расчет тепловых потерь при средних за период параметрах теплоносителя, и ее применимость (в части удельных величин тепловых потерь через теплоизоляцию) для расчетов при любой температуре наружного воздуха не доказана. Также эта методика не позволяет при совместной прокладке подающего и обратного трубопроводов распределить тепловые потери между ними, за исключением трубопроводов, построенных до 1997 года, что приводит к дополнительной погрешности. Кроме того, в этой методике при подземной канальной прокладке трубопроводов температурный напор теплопередачи рассчитывается между средней температурой теплоносителей и температурой грунта на глубине заложения трубопроводов, что требует дополнительных экспериментальных данных, которые для модельного исследования недоступны. В данном исследовании принято, что тепловая сеть построена после 2004 года, что ограничивает использование методики [25] только определением интегральных потерь за отопительный период.

В настоящее время в России согласно «Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок» в системы отопления зданий из тепловой сети должен поступать теплоноситель с допустимым отклонением $\pm 3\%$ от установленного (утвержденного) температурного графика, задаваемого при проектировании систем отопления зданий. Величины среднего охлаждения теплоносителя и потерь в сети должны определяться расчетом по методическим указаниям [32] (СО 153-34.20.523-2003 Методические указания по составлению энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии) для характерных температур наружного воздуха на основе среднегодовых нормативных или

фактических тепловых потерь и утечек, согласно СП 61.133330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» [33]. В соответствии с этими документами, нормативные тепловые потери трубопроводов могут быть рассчитаны для любой заданной температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах и для любой температуры наружного воздуха. Методика расчетов согласно двум вышеприведенным нормативным документам и методика разделения нормативных тепловых потерь между подающим и обратным трубопроводами при их совместной прокладке представлена в работе [31]. Согласно этой методике, температурный напор теплопередачи при подземной канальной прокладке принимается как разность средней (между подающим и обратным трубопроводами) температуры теплоносителя и температурой наружного воздуха, а распределение нормативных (соответствующих среднегодовым значениям температур в подающем и обратном трубопроводах и средней температуре воздуха за отопительный период и определяемых по [33]) тепловых потерь между подающим и обратным трубопроводами производится исходя из равенства термических сопротивлений теплопередачи для этих трубопроводов по формулам (1, 2) [31]:

для подающего трубопровода, Вт/м:

$$q_{лТ1.нр} = q_{л.нр} \frac{\tau_{1.нр} - t'_н}{\tau_{1.нр} + \tau_{2.нр} - 2 \cdot t'_н} K, \quad (1)$$

для обратного трубопровода, Вт/м

$$q_{лТ2.нр} = K \cdot q_{л.нр} - q_{лТ1.нр}, \quad (2)$$

где $q_{лТ1.нр}$, $q_{лТ2.нр}$ – нормы удельных линейных потерь для подающего и обратного трубопроводов тепловых сетей соответственно; $q_{л.нр}$ – нормативные линейные потери при среднегодовых температурах теплоносителя $\tau_{1.нр}/\tau_{2.нр}$ ($\tau_{1.нр}$ – для подающего трубопровода, $\tau_{2.нр}$ – для обратного трубопровода); $t'_н$ – расчетная наружная отопительная температура; $K = 1.15$ – коэффициент дополнительных потерь через крепежи и опоры [25, 28];

В дальнейшем будет использоваться именно эта методика.

Во всех расчетных подходах для определения остывания теплоносителя при данной

температуре наружного воздуха при известных удельных потерях в подающей и в обратной тепловых магистралях в данном исследовании используются следующие очевидные соотношения.

Для каждого участка трубопровода при любой температуре наружного воздуха величина потерь в подающем трубопроводе, Вт, определяется как:

$$Q_{\text{пот.пр}} = q_{\text{л.Т1}} \cdot L, \quad (3)$$

где L – длина исследуемого трубопровода, м; $q_{\text{л.Т1}}$ – удельные тепловые потери подающего трубопровода, Вт/м.

Аналогично, для обратного трубопровода, Вт:

$$Q_{\text{пот.обр}} = q_{\text{л.Т2}} \cdot L, \quad (4)$$

где $q_{\text{л.Т2}}$ – удельные тепловые потери обратного трубопровода, Вт/м.

Тепловые потери теплоносителя в тепловых магистралях в данном режиме $Q_{\text{пот}}$ складываются из потерь в прямой (подающей магистрали) $Q_{\text{пот.пр}}$ и потерь в обратной магистрали $Q_{\text{пот.обр}}$, Вт:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот.пр}} + Q_{\text{пот.обр}}, \quad (5)$$

Температура сетевой воды у потребителя, °С:

$$\tau'_1 = \tau_1 - \frac{Q_{\text{пот.пр}}}{c \cdot G}, \quad (6)$$

где τ_1 – температура прямой сетевой воды на входе тепловую сеть, °С; G – расход сетевой воды, кг/с; c – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·К.

Величина остывания теплоносителя в подающей линии, °С:

$$d\tau_{\text{пот.пр}} = \tau_1 - \tau'_1, \quad (7)$$

Температура сетевой воды в обратной линии на входе в сетевые подогреватели ТЭЦ, °С:

$$\tau'_2 = \tau_2 + \frac{Q_{\text{пот.обр}}}{c \cdot G}, \quad (8)$$

где τ_2 – температура обратной сетевой воды на выходе из тепловой сети, °С.

Величина остывания теплоносителя в обратной линии, °С:

$$d\tau_{\text{пот.обр}} = \tau'_2 - \tau_2, \quad (9)$$

Применительно ко всей системе теплоснабжения тепловые потери на всех ее участках складываются, а остывание теплоносителя на последовательно расположенных участках суммируется. В данном случае за счет симметрии конфигурации тепловой сети на всех оконечных участках ответвлений 1-5 (рис.1) температура теплоносителя с учетом остывания будет одинаковой.

При выполнении исследования использовались следующие критерии для оценки эффективности работы системы теплоснабжения. Основным параметром (критерием) энергетической эффективности является удельный расход условного топлива на единицу отпуска электрической энергии в сопоставимых условиях. Это предполагает неизменность отпуска от ТЭЦ за отопительный период как тепловой энергии, так и электрической энергии, с учетом изменения затрат электроэнергии на привод сетевых насосов, а также неизменность удельных затрат на отпуск тепловой энергии. Расчеты произведены при использовании физического метода разделения затрат топлива по видам энергетической продукции, что в принятых граничных условиях обеспечивает корректность получаемых результатов.

Величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении E_t в данном исследовании определялась для каждого режима работы турбоустановки для каждого исследуемого температурного графика по формулам, приведенным в статье («Расширенный график регулирования отопления: оценка влияния на эффективность паротурбинных ТЭЦ», Пятин А.А., Суворов Д.М. «Проблемы региональной энергетики», №3 (47), 2020, с. 40-55).

Интегральный удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г у.т./кВт·ч, определен по известной формуле (10):

$$b_{yt}^3 = \frac{122.8 \cdot N_3}{\eta_k \cdot \eta_{tr} \cdot ((Q_{os} + Q_{ПВК}) - Q_t)}, \quad (10)$$

где N_3 – количество выработанной электроэнергии за весь отопительный период (интегрально), МВт·ч; η_k – КПД котла, принимаем 0.92; η_{tr} – КПД транспорта теплоты, принимаем 0,98; Q_{os} – затраты теплоты на турбоустановку за весь отопительный период, МВт·ч; $Q_{ПВК}$ – тепловая энергия, отпускаемая пиковыми водогрейными котлами, МВт·ч.

Интегральный удельный расход топлива на отпуск электроэнергии, г у.т./кВт·ч, определяется по (11):

$$b_{yt}^{эот} = \frac{122.8 \cdot N_3^{от}}{\eta_k \cdot \eta_{tr} \cdot ((Q_{os} + Q_{ПВК}) - Q_t)}, \quad (11)$$

где $N_3^{от}$ – количество отпущенной электроэнергии за весь отопительный период, МВт·ч.

Процент тепловых потерь при транспортировке, %, рассчитывается по формуле (12):

$$\omega = 100 \cdot \frac{Q_{пот}^H}{Q_t^{ТЭЦ}}, \quad (12)$$

где $Q_t^{ТЭЦ}$ – количество отпущенной тепловой энергии от модельной ТЭЦ за период, МВт·ч; $Q_{пот}^H$ – величина нормативных тепловых потерь в магистральных тепловых сетях за период, МВт·ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОСТЫВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПОДАЮЩИХ И ОБРАТНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАФИКАХ

Сравнение результатов расчета остывания теплоносителя подающем трубопроводе диаметром 600 мм длиной 7 км (рис.1) для ИТГ 150/70°C по методикам [25] и [31] выполнено в работе авторов (Лыскова Е.А., Суворов Д.М. Сопоставительный анализ остывания теплоносителя при транспортировке по трубопроводам тепловых сетей при расчете по различным методикам // Вопросы фундамен-

тальных и прикладных научных исследований. – 2023. С. 39-43). По результатам этого расчета в указанной выше работе были сделаны следующие выводы. Во-первых, расчет с использованием нормативных данных по [25] в основной части отопительного периода дает удовлетворительные результаты, однако характер зависимости остывания теплоносителя от температуры наружного воздуха в этом случае имеет искаженный характер, что объясняется расчетом удельных тепловых потерь без учета изменения температуры наружного воздуха (задается средняя за отопительный сезон температура грунта и по отношению к ней рассчитывается температурный напор теплопередачи). Во-вторых, при расчетах остывания теплоносителя как в подающем, так и в обратном трубопроводах при различных температурных графиках в дальнейших исследованиях следует использовать методику, изложенную в работе [31], с использованием удельных параметров тепловых потерь согласно [33].

В настоящем исследовании установлено, что методика [25] при расчете интегральных потерь через тепловую изоляцию трубопроводов за отопительный сезон дает практически тот же результат, что и при использовании методики, представленной в [31]. Это подтверждает адекватность выполненных расчетов и заданных в них граничных условий.

На рис.2 и 3 представлены результаты расчетов остывания сетевой воды, выполненных по формулам (1-9) для системы теплоснабжения, представленной на рис.1.

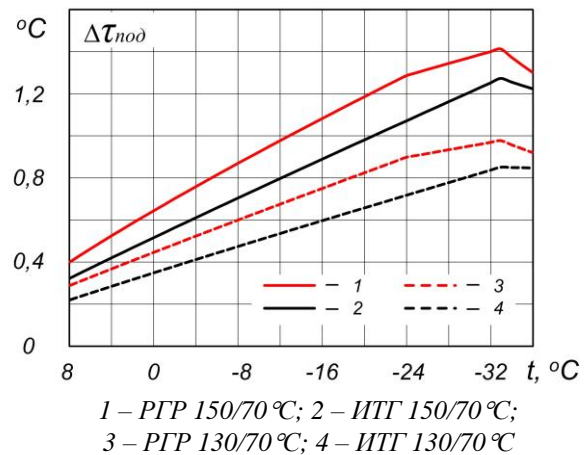


Рис. 2. Зависимость суммарного остывания теплоносителя $\Delta\tau_{под}$ в подающих трубопроводах $D=600$ мм и $d=250$ мм от температуры наружного воздуха.²

² Appendix 1

Графики представлены для подающих (рис.2) и для обратных (рис.3) трубопроводов (суммарно по основным магистралям диаметром 600 мм и ответвлениям диаметром 250 мм).

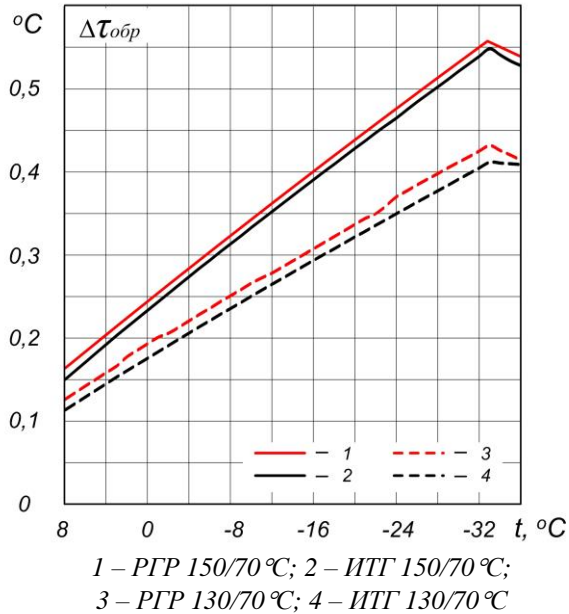


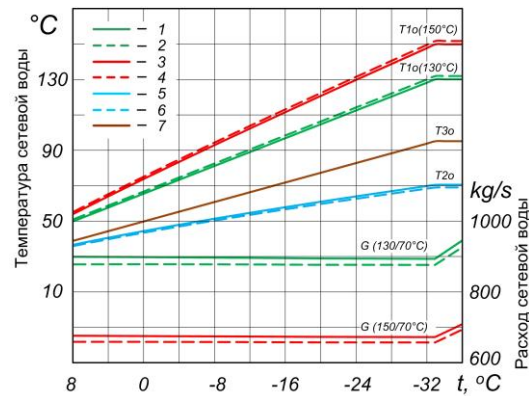
Рис. 3. Зависимость суммарного остывания теплоносителя $\Delta\tau_{обр}$ в обратных трубопроводах $D=600$ мм и $d=250$ мм от температуры наружного воздуха.³

Результаты, представленные на рис.2 и 3, вполне ожидаемы и отражают естественные обстоятельства: остывание для графиков при максимальной температуре сетевой воды 150°C всегда больше, чем при 130°C (за счет меньшего расхода сетевой воды при прочих равных условиях), а при РГР остывание несколько больше, чем при ИТГ при той же максимальной температуре сетевой воды графика, так как практически во всем диапазоне температур расходы сетевой воды при РГР меньше, чем при ИТГ. Это различие практически нивелируется для графика остывания в обратном трубопроводе за счет того, что обратная сетевая вода при РГР имеет более низкую температуру и поэтому температурный напор теплоотдачи, которому пропорциональны удельные теплотери, для обратного трубопровода при РГР несколько меньше, чем при ИТГ. При этом суммарные величины теплотери при графиках 150/70°C выше примерно на 7–8%, чем при графиках 130/70°C, за счет более высокой температуры сетевой воды в подающем теплопроводе, а

при переходе от ИТГ на РГР тепловые потери уменьшаются, в среднем, на 5–6%.

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ТЭЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ УЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

На рис.4, 5 представлены рассчитанные на основании представленных выше методических подходов и граничных условий графики температур и расходов сетевой воды для всех исследуемых температурных графиков (на рис.4 – для ИТГ, а на рис.5 – для РГР). При РГР с расходом сетевой воды для систем отопления абонентов при смене способа регулирования 40% от расчетного переход к количественному регулированию для абонентов систем отопления, как это видно по рис.6, происходит при температуре наружного воздуха -24°C , когда температура T_{3o} достигает своей предельной величины 95°C .



1, 2 – температура прямой сетевой воды на отопление T_{1o} для ИТГ 130/70 °С;
3, 4 – температура прямой сетевой воды на отопление T_{1o} для ИТГ 150/70 °С;
5, 6 – температура обратной сетевой воды после отапливающих устройств T_{2o} ;
7 – температура воды на входе в систему отопления T_{3o} ;
 G – расход сетевой воды

Рис. 4. Отопительный график системы отопления для ИТГ 150/70°C и 130/70°C (пунктирные линии соответствует графику с скорректированными температурами сетевой воды).⁴

При сравнении рис.4 и рис.5 очевидно, что при РГР в течение основной по времени части отопительного периода обеспечивается существенно меньшая температура обратной сетевой воды, вследствие чего расходы сете-

вой воды в этой зоне графиков при РГР, в среднем, на 20% меньше, чем при ИТГ.

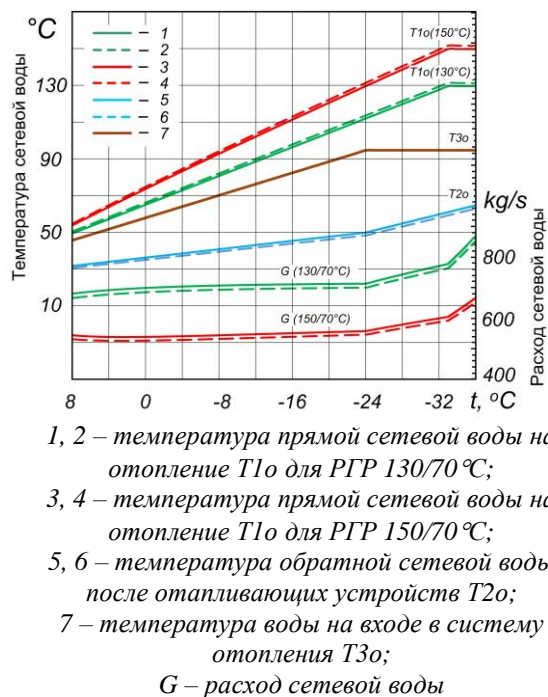


Рис. 5. Отопительный график системы отопления для РГР 150/70°С и 130/70°С при доле относительного расхода 40% (пунктирные линии соответствует графику с скорректированными температурами сетевой воды).⁵

При расчете графиков, представленных на рис.4, 5, расчетная тепловая нагрузка ТЭЦ была увеличена на величину нормативных тепловых потерь при транспортировке, составляющую около 5 МВт при расчетной температуре $t = -32^{\circ}\text{C}$. В реальных условиях при незначительном отклонении температуры расчетной теплоносителя в подающем трубопроводе для тепловых потребителей от предусмотренной температурным графиком (менее 3–4°С) для большинства потребителей расходы сетевой воды могут не измениться за счет уменьшения теплопотребления при использовании запаса по расчетной нагрузке отопления при проектировании или за счет наличия внутренних тепловыделений, но при моделировании мы должны считать, что все потребители находятся в одинаковых условиях и что все они за счет действия устройств автоматического регулирования обеспечивают заданное теплопотребление при любой наружной температуре воздуха. В этих условиях изменение графиков тепловых нагрузок в сторону увеличения на величину нормативных тепловых потерь вызывает необходимость их коррекции или путем увеличения

расходов сетевой воды, что осуществляется устройствами автоматического регулирования теплопотребления абонентов, либо путем изменения температурных графиков, которое осуществляется на ТЭЦ (при этом температура прямой сетевой воды увеличивается на величину ее остывания в подающих трубопроводах до потребителей, а температура обратной сетевой воды снижается на величину ее остывания в обратных трубопроводах от абонентов до ТЭЦ). На рис.4, 5 сплошными линиями показаны значения параметров (расхода и температуры сетевой воды) при увеличении расхода теплоносителя (коррекция по расходу), а пунктирными – при изменении температур прямой и обратной сетевой воды в соответствии с данными, представленными на рис.2, 3, при расходах сетевой воды согласно исходному графику без учета тепловых потерь (коррекция по температуре).

Анализируя графики рис.4, 5, можно заключить, что во всем диапазоне изменения температур воздуха коррекция графиков по расходу приводит к росту расходов теплоносителя примерно на 2% по сравнению с исходными графиками, что соответствует доле тепловых потерь трубопроводов в суммарной тепловой нагрузке, которая практически не изменяется при изменении наружной температуры. Полученные данные далее были использованы при расчете режимов работы модельной ТЭЦ, результаты которых представлены ниже.

При расчете режимов работы модельной ТЭЦ сопоставлению подлежали как интегральные показатели за отопительный период, так и показатели работы при различных температурах наружного воздуха. Непосредственному сравнению при этом были подвергнуты результаты расчета режимов с коррекцией графиков по температуре теплоносителя с режимами при прочих равных условиях и коррекцией графиков по расходу теплоносителя. На рис.6, 7 приведены результаты расчета показателя Et для ИТГ и РГР при работе ТЭЦ с коэффициентом теплофикации 0.5.

При анализе этих графиков укажем, что при температурах воздуха выше +5°С имеет место работа при открытой полностью регулирующей диафрагме части низкого давления (РД ЧНД) при зарытой полностью задвижке на верхний сетевой подогреватель ВСП (при одноступенчатом подогреве сетевой воды) путем частичного обвода воды помимо нижнего сетевого подогревателя НСП, затем при

понижении температуры воздуха до -1°C происходит двухступенчатый подогрев при обводе части сетевой воды помимо ВСП, и только при дальнейшем понижении температуры воздуха имеет место регулирование тепловой нагрузки при работе по электрическому графику путем прикрытия РД ЧНД, которая полностью закрывается при температуре воздуха около -7°C , после чего турбина работает по тепловому графику с максимальной тепловой нагрузкой.

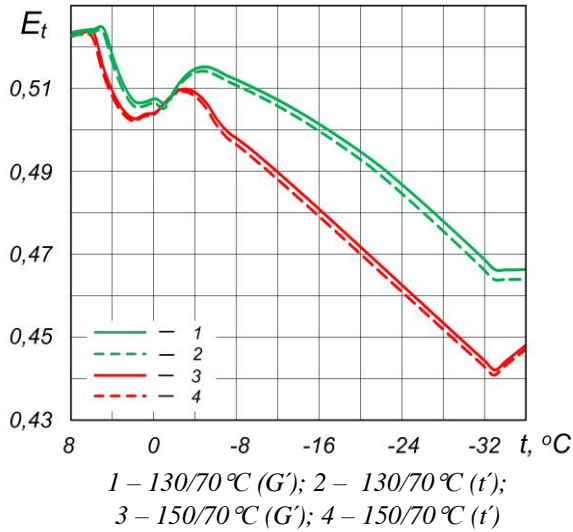


Рис. 6. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении E_t для ИТГ при коэффициенте теплофикации α равном 0,5 с коррекцией по расходу (G) и температуре (t) теплоносителя.⁶

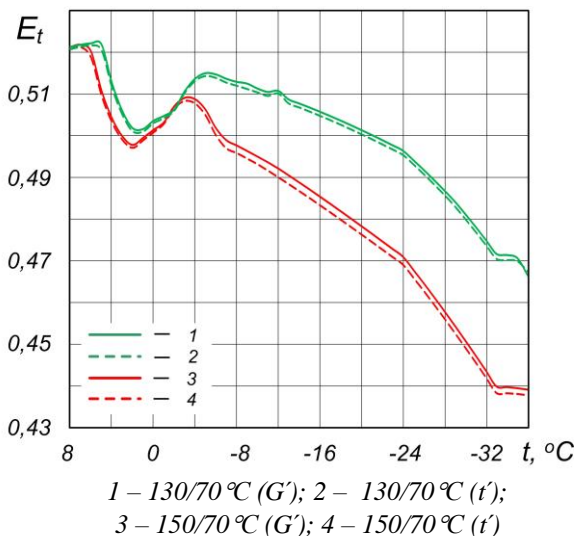


Рис. 7. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении E_t для РГР при коэффициенте теплофикации α равном 0,5 с коррекцией по расходу (G) и температуре (t) теплоносителя.⁷

С этими изменениями режимов работы турбин и связаны колебания величины E_t при температурах воздуха выше -7°C . Существенное отличие РГР от ИТГ по этому показателю имеет место в основном при работе по тепловому графику с закрытой РД ЧНД (при более низких температурах воздуха), что связано прежде всего, с более низкой температурой обратной сетевой воды и вследствие этого с более низким давлением в нижнем отопительном отборе турбины при РГР. Также из графиков очевидно, графики с максимальной расчетной температуре сетевой воды 130°C более эффективны, чем 150°C , вследствие больших расходов сетевой воды и меньших ее температур на выходе из ВСП, при прочих равных условиях, что и приводит к меньшим давлениям в отопительных отборах и больших теплоперепадах в проточной части турбины для графиков при 130°C .

Аналогичные результаты по величине E_t получены для графиков при работе ТЭЦ с коэффициентом теплофикации 1.0 (рис. 8, 9).

Новым из полученных результатов (рис. 6–9) является то, что выявлено лишь очень малое отличие по данному показателю между графиками с коррекцией по расходу (сплошные линии) и с коррекцией по температурам (пунктирные линии), причем для всех графиков коррекция по температурам приводит к несколько меньшим значениям E_t в течение основной части отопительного периода (пунктирные линии идут чуть ниже сплошных), что определяется преимущественно несколько меньшими расходами сетевой воды через турбины в этих случаях.

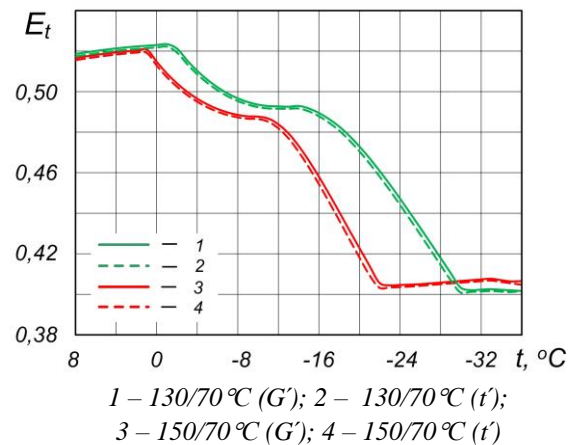


Рис. 8. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении E_t для ИТГ при коэффициенте теплофикации α равном 1,0 с коррекцией по расходу (G) и температуре (t) теплоносителя.⁸

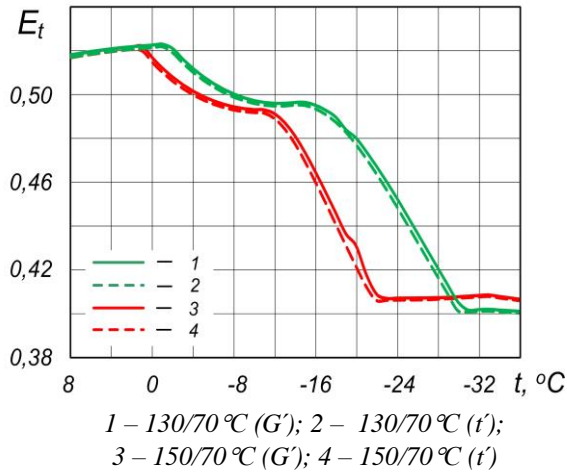


Рис. 9. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении E_t для РГР при коэффициенте теплофикации α равном 1,0 с коррекцией по расходу (G') и температуре (t') теплоносителя.⁹

При этом также можно отметить, что разница по параметру E_t между ИТГ и РГР в области отрицательных температур воздуха при коэффициенте теплофикации 0.5 существенно больше, чем при коэффициенте теплофикации 1.0. Наличие горизонтальных участков в графиках рис.8 и рис 9. в области низких температур обусловлено тем, что при температуре -22°C для графиков $150/70^\circ\text{C}$ и при температуре -30°C для графиков $130/70$ достигается предельное давление в верхнем отборе 245 кПа (температура сетевой воды на выходе из ВСП при этом составляет около 124°C), что и определяет постоянство показателя E_t . В этом случае РД ЧНД на турбинах закрыта не полностью, а для дальнейшего нагрева сетевой воды до необходимой по графику температуры включаются пиковые водогрейные котлы (ПВК).

Сравнение экономии теплоты топлива на ТЭЦ при переходе с графика с коррекцией по расходу на аналогичный график с коррекцией по температуре теплоносителя было рассчитано как интегрально, с учетом длительности каждого одноградусного интервала наружных температур, так и для каждого целочисленного значения температуры наружного воздуха. В этом последнем случае при переходе с графика с коррекцией по расходу на график с коррекцией по температурам сетевой воды расчет производился в единицах тепловой мощности (киловаттах) по следующим формулам.

Прирост отпуска электроэнергии ΔN_s , кВт:

$$\Delta N_s = N_{s_{t'}} - N_{s_{G'}}, \quad (13)$$

где $N_{s_{t'}}$ – отпуск электроэнергии в режиме с коррекцией по температуре; $N_{s_{G'}}$ – отпуск электроэнергии в режиме с коррекцией по расходу.

Прирост затрат теплоты топлива на ТЭЦ (включая энергетические котлы и ПВК) ΔQ_o , кВт:

$$\Delta Q_o = Q_{o_{t'}} - Q_{o_{G'}}, \quad (14)$$

где $Q_{o_{t'}}$ – затраты теплоты топлива в режиме с коррекцией по температуре; $Q_{o_{G'}}$ – затраты теплоты топлива в режиме с коррекцией по расходу.

Расчет экономии теплоты топлива B , кВт, выполнялся при удельном расходе теплоты на замещающей турбоустановке $q_3=2.5$ по формуле (15), аналогично работе [14]:

$$B = q_3 \cdot \Delta N_s - \Delta Q_o, \quad (15)$$

Графическая зависимость величины B от температуры наружного воздуха для работы с наиболее соответствующим реальным условиям эксплуатации коэффициентом теплофикации $\alpha=0.5$ приведена на рис.10.

Из рис.10 очевидно, что в целом при графиках $130/70^\circ\text{C}$ переход на коррекцию по температурам более эффективен (для ИТГ в большей степени, нежели для РГР), так как величина экономии теплоты топлива во всем температурном диапазоне положительна, тогда как при графиках $150/70^\circ\text{C}$ этот переход с точки зрения энергетического эффекта невыгоден. В то же время средняя величина этого эффекта (от 100 до 200 кВт), составляет менее 0.1% от расхода теплоты топлива на ТЭЦ (170–250 МВт), то есть отраженный на рис.10 эффект является весьма малым и сопоставим с погрешностью проводимых на математической модели расчетов).

Результаты, аналогичные представленным на рис. 10, имели место и при работе с коэффициентом теплофикации $\alpha=1.0$, за исключением диапазона низких температур наружного воздуха.

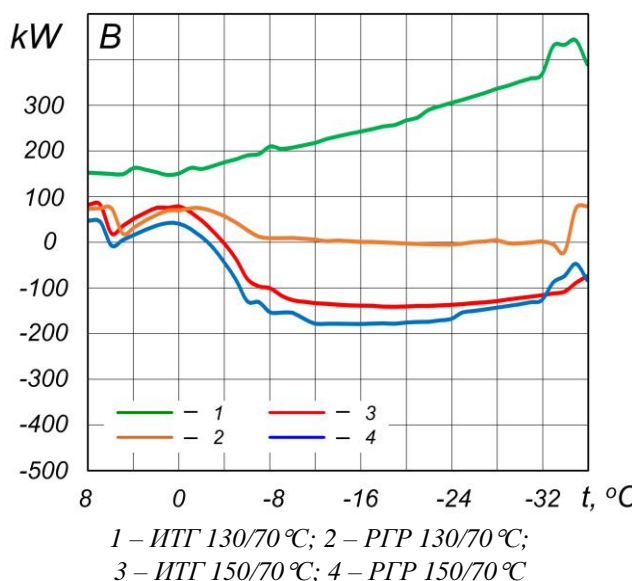


Рис. 10. Экономия топлива на ТЭЦ при переходе на температурную коррекцию графиков вместо расходной при коэффициенте теплофикации α равном 0.5.¹⁰

При работе с коэффициентом теплофикации $\alpha=1.0$ будут иметь место отрицательные значения величины B (до 1500–2000 кВт) в области низких температур наружного воздуха (менее -12°C), что обусловлено большими

расходами теплоты топлива на ПВК в режимах с коррекцией по температурам за счет меньших тепловых нагрузок турбин при наличии ограничения по давлению в верхнем отборе, но работа ТЭЦ при значениях $\alpha=1.0$ гораздо менее характерна для работы современных ТЭЦ, чем при $\alpha=0.5$.

Интегральный за год (в данном случае это отопительный период) эффект для всех графиков регулирования при переходе от коррекции по расходам к коррекции по температурам теплоносителя за отопительный период с учетом длительности стояния наружных температур рассчитаны по вышеприведенным формулам и приведены в таблице 1.

Наиболее важным из представленных в таблицах 2, 3 является величина $b_{\text{yt}}^{\text{от}}$ ($b_{\text{cf}}^{\text{eh}}$), которая учитывает и удельную выработку электроэнергии E_i , и долю тепловых потерь при транспортировке $\omega, \%$, и расход электроэнергии на привод сетевых насосов. Анализ вариантов по данному показателю удобно произвести также и в графическом виде (рис.11, 12).

Таблица 1¹¹.

Интегральный эффект от коррекции температурных графиков¹²

Вид графика (Schedule type)	Прирост годового отпущения электроэнергии (increase in annual electricity supply), МВт·ч (MW·h)	Прирост годовых затрат теплоты топлива (increase in annual costs of fuel heat), МВт·ч (MW·h)	Годовая экономия топлива (annual fuel savings), МВт·ч (т у.т.) (MW·h, t c.e.)
$\alpha=0.5$			
ИТГ (ITS) 150/70°C	-89.4	-13.7	-209.7 (-25.8)
ИТГ (ITS) 130/70°C	415.4	10.3	1028.1 (126.5)
РГР (ERS) 150/70°C	-178.2	-24.1	-421.5 (-51.8)
РГР (ERS) 130/70°C	79.2	1.8	196.3 (24.1)
$\alpha=1.0$			
ИТГ (ITS) 150/70°C	-328.9	659.5	-1481.6 (-182.2)
ИТГ (ITS) 130/70°C	73.2	131.0	52.1 (6.4)
РГР (ERS) 150/70°C	-619.0	692.1	-2239.5 (-275.5)
РГР (ERS) 130/70°C	-107.4	112.2	-380.7 (-46.8)

Таблица 2¹³.

Интегральные показатели исследуемых графиков при коэффициенте теплофикации $\alpha=0.5$ ¹⁴

Вид графика, максимальная температура, °C (Schedule type, maximum temperature, °C)	E_t	b_{yt}^3 , Г у.т./кВт·ч (b_{cf}^c , g c.f./kW·h)	b_{yt}^{30T} , Г у.т./кВт·ч (b_{cf}^{eh} , g c.f./kW·h)	ω , %
ИТГ 150 (ITS 150) G'	0.502	198.2	200.6	2.295
ИТГ 150 (ITS 150) t'	0.499	198.4	200.7	2.295
ИТГ 130 (ITS 130) G'	0.509	195.9	199.8	2.134
ИТГ 130 (ITS 130) t'	0.511	195.8	199.5	2.134
РГР 150 (ERS 150) G'	0.507	196.8	198.4	2.201
РГР 150 (ERS 150) t'	0.505	197.0	198.5	2.201
РГР130 (ERS 130) G'	0.512	195.1	197.5	2.039
РГР130 (ERS 130) t'	0.513	195.1	197.5	2.039

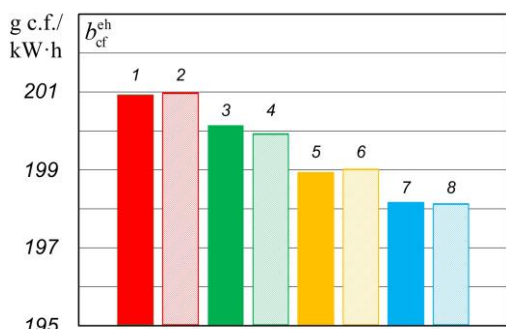
Примечание к таблице 2. Параметр G' в первом столбце – коррекция по расходу сетевой воды, параметр t' - коррекция по температуре сетевой воды.

Таблица 3¹⁵.

Интегральные показатели исследуемых графиков при коэффициенте теплофикации 1.0¹⁶

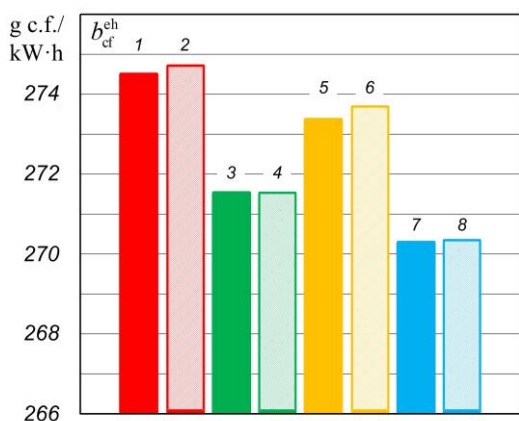
Вид графика, максимальная температура, °C (Schedule type, maximum temperature, °C)	E_t	b_{yt}^3 , Г у.т./кВт·ч (b_{cf}^c , g c.f./kW·h)	b_{yt}^{30T} , Г у.т./кВт·ч (b_{cf}^{eh} , g c.f./kW·h)	ω , %
ИТГ 150 (ITS 150) G'	0.491	274.7	276.3	2.295
ИТГ 150 (ITS 150) t'	0.493	275.0	276.5	2.295
ИТГ 130 (ITS 130) G'	0.502	270.1	272.6	2.134
ИТГ 130 (ITS 130) t'	0.505	270.2	272.6	2.134
РГР 150 (ERS 150) G'	0.494	273.8	274.9	2.201
РГР 150 (ERS 150) t'	0.493	274.3	275.2	2.201
РГР130 (ERS 130) G'	0.504	269.5	271.1	2.039
РГР130 (ERS 130) t'	0.507	269.6	271.2	2.039

Примечание к таблице 3. Параметр G' в первом столбце – коррекция по расходу сетевой воды, параметр t' - коррекция по температуре сетевой воды.



1 – ИТГ 150/70 °С (G'); 2 – ИТГ 150/70 °С (t');
 3 – ИТГ 130/70 °С (G'); 4 – ИТГ 130/70 °С (t');
 5 – РГР 150/70 °С (G'); 6 – РГР 150/70 °С (t');
 7 – РГР 130/70 °С (G'); 8 – РГР 130/70 °С (t')

Рис. 11. Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии при коэффициенте теплофикации α равном 0.5.¹⁷



1 – ИТГ 150/70 °С (G'); 2 – ИТГ 150/70 °С (t');
 3 – ИТГ 130/70 °С (G'); 4 – ИТГ 130/70 °С (t');
 5 – РГР 150/70 °С (G'); 6 – РГР 150/70 °С (t');
 7 – РГР 130/70 °С (G'); 8 – РГР 130/70 °С (t')

Рис. 12. Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии при коэффициенте теплофикации α равном 1.0.¹⁸

Разница в уровне величины показателя $b_{\text{уг}}^{\text{эот}}$ ($b_{\text{cf}}^{\text{eh}}$) в таблицах 2, 3 и на рис.11, 12 (около 200 г.у.т./кВт·ч и более 270 г.у.т./кВт·ч) при двух разных значениях α обусловлена тем, что при $\alpha=0.5$ ТЭЦ работает большую часть отопительного периода по тепловому графику, а при $\alpha=1.0$ – по электрическому графику. Также можно отметить, что если при переходе с ИТГ на РГР для всех исследованных вариантов рост эффективности отпуска электроэнергии составляет не менее 1 г.у.т./кВт·ч, а при переходе с графиков 150/70°С на график 130/70°С – от 1 г.у.т./кВт·ч при $\alpha=0.5$ до 4 г.у.т./кВт·ч при $\alpha=1.0$, то при переходе от графиков регулирования по расходу к графикам с регулирани-

ем по температуре теплоносителя – не более, чем на 0.3 г.у.т./кВт·ч, причем этот эффект в ряде случаев положителен, а в ряде – отрицателен, и он зависит от конкретных ограничений в работе турбоагрегатов ТЭЦ в основной части времени их работы в отопительный период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье исследована работа модельной ТЭЦ при работе по исходным и расширенным температурным графикам 150/70°С, 130/70°С с учетом потерь при транспортировке теплоносителя и связанного с этим остывания сетевой воды в подающих и обратных трубопроводах тепловых сетей.

2. В ходе работы установлено, что наиболее подходящей для расчета остывания теплоносителя является методика поградусного расчета нормативных тепловых потерь в трубопроводах, представленная в статье [31], которая дает возможность разделить общие тепловые потери между подающими и обратными трубопроводами. В данной работе для расчета температурного напора теплопередачи использовалась температура наружного воздуха; при этом доля тепловых потерь от величины тепловой нагрузки оказалась практически не зависящей от наружной температуры и составила около 2% во всем диапазоне исследованных графиков.

3. При расчете зависимостей остывания теплоносителя в трубопроводах при различных температурных графиках было установлено, что при графиках с большей расчетной температурой остывание больше, а в подающих трубопроводах при ИТГ оно больше, чем при РГР. При этом 65–70% общего остывания происходит в подающих трубопроводах тепловых сетей.

4. Установлено, что при сохранении суммарной тепловой нагрузки потребителей прирост тепловой нагрузки источника на величину потерь при транспортировке может быть компенсирован или естественной коррекцией по расходу теплоносителя (с ростом, прямо пропорциональным доле тепловых потерь при транспортировке), либо коррекцией по температуре прямой и обратной температуре сетевой воды на источнике. При этом температура прямой сетевой воды увеличивается, а обратной – несколько уменьшается. В работе были построены графики температур и расходов сетевой воды для обоих вариантов коррекции.

5. При расчете показателей эффективности работы модельной ТЭЦ с учетом всех учитываемых влияющих факторов было определено, что основной из этих показателей – удельный расход условного топлива на отпускаемую электрическую энергию – существенно уменьшается при переходе на более эффективный температурный график 130/70 °C и при переходе с исходного на расширенный график регулирования по нагрузке отопления, но незначительно изменяется при переходе от регулирования по расходу на регулирование по температуре теплоносителя.

6. В целом по результатам проведенного исследования можно заключить, что учет остывания теплоносителя при транспортировке дает возможность более точно рассчитать режимы работы оборудования ТЭЦ и эффективность производства и отпуска тепловой и электрической энергии. При относительно небольшой доле потерь при транспортировке, характерной для крупных тепловых магистралей суммарной длиной до 10 км, остывание теплоносителя как в подающей, так и в обратной магистралях не превышает 1–2 °C, что не приводит к необходимости коррекции температурных графиков по температуре теплоносителя при наличии тепловых пунктов любого типа (с учетом запаса их мощности при проектировании).

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Diagram of a two-pipe heat supply system of the investigated model CHPP. (1–5 - branches from each of the two main heat pipelines; D, L - length and diameter of the main line; d, l - length and diameter of each branch from the main line).

²**Fig. 2.** The dependence of the total cooling of the heat-transfer agent in the supply pipelines D=600 mm and d=250 mm on the outdoor air temperature (1 – ERS 150/70 °C; 2 – ITS 150/70 °C; 3 – ERS 130/70 °C; 4 – ITS 130/70 °C).

³**Fig. 3.** The dependence of the total cooling of the heat-transfer agent in the return pipelines D=600 mm and d=250 mm on the outdoor air temperature (1 – ERS 150/70 °C; 2 – ITS 150/70 °C; 3 – ERS 130/70 °C; 4 – ITS 130/70 °C).

⁴**Fig. 4.** Heating schedule of the heating system in using the ITS 150/70 °C and 130/70 °C (dotted lines correspond to the chart with corrected delivery water temperatures) (1, 2 – the supply water temperatures for heating T1o in using the ITS 130/70 °C; 3, 4 – the supply water temperatures for heating T1o for ITS 150/70 °C; 5, 6 - the return water temperature after space heaters T2o; 7 - the water temperature at the inlet to the users' heating systems T3o; G - the flow rate of delivery water).

⁵**Fig. 5.** Heating schedule of the heating system in using the ERS 150/70 °C and 130/70 °C (dotted lines correspond to the chart with corrected delivery water temperatures) (1, 2 – the supply water temperatures for heating T1o in using the ITS 130/70 °C; 3, 4 – the supply water temperatures for heating T1o for ITS 150/70 °C; 5, 6 - the return water temperature after space heaters T2o; 7 - water temperature at the entrance to the heating system T3o; G - the flow rate of delivery water).

⁶**Fig. 6.** The specific electricity generation based on heat consumption Et in using the ITS at the district heating coefficient α equal 0.5 with correction for flow rate (G') and temperature (t') of the heat-transfer agent (1 – 130/70 °C (G'); 2 – 130/70 °C (t'); 3 – 150/70 °C (G'); 4 – 150/70 °C (t')).

⁷**Fig. 7.** The specific electricity generation based on heat consumption Et in using the ERS at the district heating coefficient α equal 0.5 with correction for flow rate (G') and temperature (t') of the heat-transfer agent (1 – 130/70 °C (G'); 2 – 130/70 °C (t'); 3 – 150/70 °C (G'); 4 – 150/70 °C (t')).

⁸**Fig. 8.** The specific electricity generation based on heat consumption Et in using the ITS at the district heating coefficient α equal 1.0 with correction for flow rate (G') and temperature (t') of the heat-transfer agent (1 – 130/70 °C (G'); 2 – 130/70 °C (t'); 3 – 150/70 °C (G'); 4 – 150/70 °C (t')).

⁹**Fig. 9.** The specific electricity generation based on heat consumption Et in using the ERS at the district heating coefficient α equal 1.0 with correction for flow rate (G') and temperature (t') of the heat-transfer agent (1 – 130/70 °C (G'); 2 – 130/70 °C (t'); 3 – 150/70 °C (G'); 4 – 150/70 °C (t')).

¹⁰**Fig. 10.** Fuel savings at CHPP in using the switching to temperature correction of schedules instead of flow rate correction at the district heating coefficient α equal 0.5 (1 – ITS 130/70 °C; 2 – ERS 130/70 °C; 3 – ITS 150/70 °C; 4 – ERS 150/70 °C).

^{11,12}**Table 1.** Integral effect from the correction of temperature schedules.

^{13,14}**Table 2.** Integral indicators of the studied schedules at the heat supply coefficient α equal 0.5 (The parameter G' in the first column is the correction for flow rate of delivery water, the parameter t' is the correction for the temperature of the delivery water).

^{15,16}**Table 3.** Integral indicators of the studied schedules at the heat supply coefficient α equal 1.0 (The parameter G' in the first column is the correction for flow rate of delivery water, the parameter t' is the correction for the temperature of the delivery water).

¹⁷**Fig. 11.** Specific consumption of equivalent fuel for electricity supply at the district heating coefficient α equal 0.5 (1 – ITS 150/70 °C (G'); 2 – ITS 150/70 °C (t'); 3 – ITS 130/70 °C (G'); 4 – ITS 130/70 °C (t'); 5 – ERS 150/70 °C (G'); 6 – ERS 150/70 °C (t'); 7 – ERS 130/70 °C (G'); 8 – ERS 130/70 °C (t')).

¹⁸**Fig. 12.** Specific consumption of equivalent fuel for electricity supply at the district heating coefficient α

equal 1.0 (1 – ITS 150/70°C (G'); 2 – ITS 150/70°C (t'); 3 – ITS 130/70°C (G'); 4 – ITS 130/70°C (t'); 5 – ERS 150/70°C (G'); 6 – ERS 150/70°C (t'); 7 – ERS 130/70°C (G'); 8 – ERS 130/70°C (t')).

Литература (References)

- [1] Chicherin S., Junussova L., Junussov T. [Minimizing the supply temperature at the district heating plant – dynamic optimization]. *2019 4th International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEEER 2019)*, vol. 118, 02004. doi: 10.1051/e3sconf/201911802004
- [2] Tunzi M., Boukhanouf R., Li H., Svendsen S., Ianakiev A. Improving thermal performance of an existing UK district heat network: a case for temperature optimization. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 158, pp. 1576–1585. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.049
- [3] Lauenburg P. Temperature optimization in district heating systems. *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, 2016, pp. 223–240. doi: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2
- [4] Guelpa E., Barbero G., Sciacovelli A., Verda V. Peak-shaving in district heating systems through optimal management of the thermal request of buildings. *Energy*, 2017, vol. 137(C), pp. 706–714. doi: 10.1016/j.energy.2017.06.107
- [5] Schweiger G., Larsson P., Magnusson F., Lauenburg P., Velut S. District heating and cooling systems – Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization. *Energy*, 2017, vol. 137(C), pp. 566–578. doi: 10.1016/j.energy.2017.05.115
- [6] Arce I., López S., Perez S., Rämä M., Klobut K., Febres J. Models for fast modelling of district heating and cooling networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82(P2), pp. 1863–1873. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.109
- [7] Romanchenko D., Odenberger M., Göransson L., Johnsson F. Impact of electricity price fluctuations on the operation of district heating systems: A case study of district heating in Göteborg, Sweden. *Applied Energy*, 2017, vol. 204(C), pp. 16–30. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.092
- [8] Bischì A., Taccari L., Martelli E., Amaldi E., Manzolini G., Silva P., Campanari S., Macchi E. A detailed MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. *Energy*, 2014, vol. 74, pp. 12–26. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.042
- [9] Ovchinnikov P., Borodin A., Strelets K. Utilization potential of low temperature hydronic space heating systems: a comparative review. *Building and Environment*, 2017, vol. 112, pp. 88–98. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.029
- [10] Lauenburg P. Temperature optimization in district heating systems. *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems, Elsevier Ltd.*, 2016, pp. 223–240. doi: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2.
- [11] Stevanovic V., Zivkovic B., Prica S., Maslovaric B., Karamarkovic V., Trkulja V. Prediction of thermal transients in district heating systems. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50:9, pp. 2167–73. doi: 10.1016/j.enconman.2009.04.034
- [12] Petrushchenkov V.A. Raschet rezhimov raboty centralizovannykh sistem teplosnabzheniya v neproektnykh usloviyah [Calculation of operating modes of centralized heat-supply systems in nonproject conditions]. *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69, no. 5, pp. 384–392.
- [13] Pyatin A.A. Novaya model' regulirovaniya – teoreticheskaya osnova vysokoeffektivnogo otopeniya [New control model — The theoretical basis for high efficiency heating]. *EKO-TEK – ECO-TECH*, 2019, no. 1(70), pp. 15–30. Available at: http://www.energy-saving.ru/uploads/files/eko-tek_itog_70.pdf (in Russian).
- [14] Pyatin A.A., Suvorov D.M. An Extended Heating Regulation Schedule: Definition and Assessment of Its Efficiency in Heat-Supply Systems. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, no. 4, pp. 310–323. doi: 10.1134/S0040363621040068
- [15] Novitsky N.N., Shalaginova Z.I., Tokarev V.V., Grebneva O.A. Technology for the development of operating modes of large heat supply systems based on methods of multilevel thermohydraulic modeling. *Izv. RAS. Energy*, 2018, no. 1, pp. 12–24.
- [16] Shalaginova Z.I., Tokarev V.V. Applied Problems and Methodological Approaches to Planning and Implementation of Operating Conditions at District Heating Systems. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 10, pp. 714–729. doi: 10.1134/S0040601519100057
- [17] Wang Y., You S., Zhang H., Zheng W., Zheng X., Miao Q. Hydraulic performance optimization of meshed district heating network with multiple heat sources. *Energy*, 2017, vol. 126, pp. 603–621. doi: 10.1016/j.energy.2017.03.044
- [18] Guelpa E., Toro C., Sciacovelli A., Melli R., Sciubba E., Verda V. Optimal operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation. *Energy*, 2016, vol. 102, pp. 586–595. doi: 10.1016/j.energy.2016.02.058
- [19] Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J. Optimization of multi-source complex district heating network, a case study. *Energy*, 2017, vol. 126, pp. 53–63. doi: 10.1016/j.energy.2017.03.018
- [20] Vesterlund M., Dahl J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks. *Energy Convers. Manage.*, 2015, vol. 89, no. 89, pp. 555–567. doi: 10.1016/j.enconman.2014.10.002
- [21] Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V. Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings. *Ener-*

- gy, 2017, vol. 184, pp. 33–44. doi:10.1115/IMECE2015-52315
- [22] Gabrielaitiene I., Bøhm B., Sunden B. Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark – A case study. *Energy Convers. Manage.*, 2007, vol. 48. no. 1, pp. 78–86. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2006.05.011
- [23] Gvozdenaca D., Urošević B.G., Menke Ch., Urošević D., Bangviwat A. High efficiency co-generation: CHP and non-CHP energy. *Energy*, 2017, vol. 135, pp. 269–278. doi: 10.1016/j.energy.2017.06.143
- [24] Suvorov D., Tatarinova N., Lyskova E. The effectiveness of extended schedules of heating regulation at CHP plants with decreasing normative design temperature of the supply water. *Problemele energeticii regionale*, 2021, no. 4(52), pp. 99–114.
- [25] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of December 30, 2008 N 325 "On approval of the procedure for determining the standards for technological losses in the transmission of thermal energy, heat-transfer agent" (as amended) (Minregion Rossii, Moscow, 2008)
- [26] Guelpa E., Capone V., Sciacovelli A., Vasset N., Bavière R., Verda V. Reduction of supply temperature in existing district heating: A review of strategies and implementations. *Energy*, 2023, vol. 262, part B. doi: 10.1016/j.energy.2022.125363
- [27] Sandvall A., Karlsson K. Energy system and cost impacts of heat supply to low-energy buildings in Sweden. *Energy*, 2023, vol. 268. doi: 10.1016/j.energy.2023.126743
- [28] Werner S. International review of district heating and cooling. *Energy*, 2017, vol. 137, pp. 617–631. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.045
- [29] Benakopoulos Th., Vergo W., Tunzi M., Salenbien R., Kolarik J., Svendsen S. Energy and cost savings with continuous low temperature heating versus intermittent heating of an office building with district heating. *Energy*, 2022, vol. 252. doi: 10.1016/j.energy.2022.124071
- [30] Tunzi M., Benakopoulos Th., Yang Q., Svendsen S. Demand side digitalisation: A methodology using heat cost allocators and energy meters to secure low-temperature operations in existing buildings connected to district heating networks. *Energy*, 2023, vol. 264. doi: 10.1016/j.energy.2022.126272
- [31] Pyatin A., Rubleva V. Prakticheskoe uravnenie rezhimov otopeniya. Chast' 2. Sposoby effektivnogo regulirovaniya . [Practical equation of heating regimes. Part 3. Accounting for losses in the heating network]. *EKO-TEK – ECO-TECH*, 2017, no. 3(64), pp. 44–52. Available at: http://www.energy-saving.ru/uploads/files/eko-tek_itog_70.pdf (in Russian).
- [32] SO 153-34.20.523(3)-2003 Guidelines for compiling an energy characteristic for thermal energy transport systems in terms of "Heat Losses" (Minregion Rossii, Moscow, 2003)
- [33] SP 61.13330.2012. Designing of thermal insulation of equipment and pipe lines (Minregion Rossii, Moscow, 2012)

Сведения об авторах.



Суворов Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплотехники и гидравлики ВятГУ. Научные интересы - оптимизация режимов работы ТЭЦ, энергосбережение
E-mail: dmilar@mail.ru



Лыскова Екатерина Алексеевна, магистрант ВятГУ. Научные интересы - математическое моделирование режимов работы тепловых сетей, энергосбережение.
E-mail: liskova.eka@yandex.ru



Татаринова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидравлики ВятГУ. Научные интересы - математическое моделирование турбоустановок ТЭЦ
E-mail: nvt_s@mail.ru

The Method of Selecting Boiler Houses under Technical Re-Equipment in a Mini-CHP

Myshkina L.S., Frolova Y.A., Ivanova E.M.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The development of the energy sector is aimed at improving the energy efficiency of heat and electricity. One way is to use cogeneration technologies. A large number of boiler houses created the preconditions for the creation of a mini-CHPP through their technical re-equipment. The purpose of the work is to develop a methodology for selecting and ranking boiler houses for transformation into a mini-CHPP. To achieve the goal, the following tasks were solved: the effects of the formation of a mini-CHP in the energy district were revealed; a system of criteria has been developed that determines the feasibility of transforming a boiler house; a ranking coefficient was proposed that reflects the potential for improving efficiency; the methodology was tested. The difference of the work is the complexity of the methodology, which takes into account both the advantages of cogeneration technologies and energy balances, as well as individual features of each boiler house. Multi-criteria selection of boiler houses is based on the purpose, fuel used, heat output and functions in heat supply systems. The technical condition, prospective balances of production and consumption of electricity in the energy district of a mini-CHPP are taken into account. The significance of the results lies in the fact that the proposed methodology makes it possible to increase the validity of decisions when transforming a boiler house into a mini-CHPP. The use of the selection results will lead to an increase in the economic efficiency of the heat supply system.

Keywords: cogeneration, mini-CHPP, energy efficiency, boiler house transformation, distributed energy, efficiency, reliability, environmental friendliness, economy.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.07>

UDC: 621.311; 338.49

Metoda de selectare a centralelor termice la reechipare tehnică într-o mini-CET

Mișchina L.S., Frolova Ia.A., Ivanova E.M.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Dezvoltarea sectorului energetic are ca scop îmbunătățirea eficienței energetice a energiei termice și electrice. O modalitate este utilizarea tehnologiilor de cogenerare. Un număr mare de centrale termice au creat precondițiile pentru crearea unui mini-CET prin reechiparea lor tehnică. Scopul lucrării este dezvoltarea unei metodologii de selectare și ierarhizare a centralelor termice pentru transformare într-o mini-CET. Pentru atingerea scopului, au fost rezolvate următoarele sarcini: au fost dezvoltate efectele formării unei mini-CET în districtul energetic; a fost elaborat un sistem de criterii care determină fezabilitatea transformării unei centrale termice; a fost propus un coeficient de clasare care reflectă potențialul de îmbunătățire a eficienței; metodologia a fost testată. Diferența lucrării este complexitatea metodologiei, care ia în considerare atât avantajele tehnologiilor de cogenerare și bilanțele energetice, cât și caracteristicile individuale ale fiecărei case de cazane. Selecția cu mai multe criterii a cazanelor se bazează pe scopul, combustibilul utilizat, puterea termică și funcțiile din sistemele de alimentare cu căldură. Se ia în considerare starea tehnică, bilanțurile prospective ale producției și consumului de energie electrică în raionul energetic al unei mini-CET. Semnificația rezultatelor constă în faptul că metodologia propusă face posibilă creșterea validității deciziilor la transformarea unei centrale termice într-o mini-CET. Utilizarea rezultatelor selecției va duce la o creștere a eficienței economice a sistemului de alimentare cu căldură.

Cuvinte-cheie: cogenerare, mini-CET, eficiență energetică, reechipare tehnică a centralei termice, energie distribuită, eficiență, fiabilitate, ecologie, economie.

Метод отбора котельных при техническом перевооружении в мини-ТЭЦ**Мышкина Л.С., Фролова Я.А., Иванова Е.М.**

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Развитие энергетики направлено на повышение энергоэффективности производства тепловой и электрической энергии. Одним из способов достижения является использование когенерационных технологий. Однако до настоящего времени имеет место раздельное производство тепловой энергии на котельных при производстве электрической энергии на тепловых электростанциях в конденсационном режиме. Указанное создало предпосылки создания мини-ТЭЦ на базе когенерационных установок, что возможно путем технического перевооружения котельных. Целью работы является разработка методики отбора и ранжирования котельных для последующего технического перевооружения в мини-ТЭЦ. Для достижения цели решены следующие задачи: выявлены эффекты от создания мини-ТЭЦ в энергорайоне; разработана система критериев выбора котельной для технического перевооружения в мини-ТЭЦ; предложен индекс, отражающий потенциал повышения эффективности для определения приоритетности реконструкции. Многокритериальный отбор учитывает техническое состояние и режим работы силовых трансформаторов центра питания, перспективные балансы производства и потребления электрической энергии и мощности в энергорайоне, в составе которого будет работать мини-ТЭЦ. Наиболее важным результатом является комплексная методика отбора, учитывающая не только достоинства когенерационных технологий, но и используемое топливо, назначение котельной и выполняемые ею функции, балансы энергии. Выполнение расчетов по методике на примере Новосибирской агломерации позволило определить котельные и очередность их перевода в мини-ТЭЦ, рекомендовать соответствующие решения при разработке схем теплоснабжения муниципальных образований. Полученные результаты являются значимыми при решении задач повышения энергоэффективности и экологичности отдельных территорий, что приведет к повышению экономической эффективности функционирования системы теплоснабжения. Значимость результатов заключается в том, что предложенный метод позволяет повысить эффективность принимаемых решений при техническом перевооружении котельных в мини-ТЭЦ и при развитии систем теплоснабжения.

Ключевые слова: когенерация, мини-ТЭЦ, энергоэффективность, техническое перевооружение котельной, распределенная энергетика, эффективность, надежность, экологичность, экономичность.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей энергетики является повышение энергоэффективности производства энергии для обеспечения потребителей недорогостоящей и чистой энергией. В мире наблюдается тенденция роста вводов объектов распределенной энергетики и включение промышленными, коммерческими, сельскохозяйственными потребителями распределенной генерации в системы собственного электроснабжения и в коммунальную инфраструктуру для энергоснабжения коммунально-бытовых потребителей [1, 2].

По экспертным оценкам суммарная установленная мощность объектов распределенной энергетики в России составляет около 23–24 ГВт, при этом ежегодные темпы ввода составляют около 1 ГВт [3, 4].

В качестве одного из объектов распределенной энергетики выделяются мини-ТЭЦ, предназначенные для совместного производства тепловой и электрической энергии.

Основной мини-ТЭЦ являются современные когенерационные установки, обеспечивающие наилучшие показатели эффективности использования углеводородного топлива при производстве тепловой и электрической энергии. Следовательно, создание мини-ТЭЦ могут обеспечить повышение энергоэффективности производства тепловой и электрической энергии. При этом появление мини-ТЭЦ и включение в региональную систему энергоснабжения оказывает положительное влияние на свойства, определяющие ее эффективность – экономичность, экологичность и надежность.

Формирование мини-ТЭЦ возможно в результате нового строительства и реконструкции котельной с переводом в мини-ТЭЦ.

Потенциал реконструкции котельных в мини-ТЭЦ заложен в структуре систем теплоснабжения на действующих отопительных и промышленных котельных [5]. К примеру, в России, количество котельных различной мощности составляет

около 76,7 тыс. Их трансформация в мини-ТЭЦ позволит обеспечить максимально возможное использование тепловых нагрузок для организации комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, что повысит энергоэффективность производства энергии.

В связи с указанным выше актуальным становится вопрос выбора котельных, перевод которых в мини-ТЭЦ позволит повысить энергоэффективность производства энергии и получить полезные системные эффекты. Однако, на сегодняшний день отсутствуют методы, позволяющие выбрать реконструируемые в мини-ТЭЦ котельную и обосновать вариант трансформации для повышения эффективности производства энергии и получения других системных эффектов. В работе [6] предлагаются технические решения, применяемые при реконструкции, но отсутствует обоснование выбора котельной. В исследованиях [7, 8, 9, 10] решение о проведении трансформации объясняется различными достоинствами когенерационной технологии, но не учитываются отдельные характерные особенности каждого объекта. В работе [11] перевод котельных в режим мини-ТЭЦ рассматривается как способ повышения надежности электроснабжения собственных нужд котельной. В [11, 12] указывается, что установку мини-ТЭЦ целесообразно проводить при недостаточных возможностях существующих источников электроэнергии и тепла. Во многих европейских странах, исследования в этой части не проводились в силу отличий изначального принципа построения системы теплоснабжения [13]. Отсутствует комплексный подход к изменению системы теплоснабжения и выбору котельных для технического перевооружения, где все этапы методически обоснованы и выверены для достижения наилучших эффектов.

Целью исследования является разработка метода, позволяющего сделать выбор котельных, реконструируемых в мини-ТЭЦ и обосновать вариант трансформации. Для достижения цели решены следующие задачи:

- выявление признаков, определяющих целесообразность трансформации котельной в мини-ТЭЦ;
- формирование методики выбора котельных, трансформация которых

приведет к повышению эффективности систем энергоснабжения;

- апробация методики на примере муниципального образования, где в составе системы теплоснабжения действует множество различных котельных.

МЕТОДЫ

Выбор трансформируемой в мини-ТЭЦ котельной производится с учетом различных факторов, которые могут рассматриваться как признаки. Исследование основано на методологии многофакторного анализа, что предполагает выполнение последовательных процедур:

- построение детерминированной многофакторной модели;
- выбор приема факторного анализа;
- реализация вычислительных процедур;
- формулирование выводов и рекомендаций по результатам анализа.

Решение поставленной задачи связано с применением метода группировок — выделение среди изучаемых объектов характерных групп и подгрупп по тем или иным признакам.

Для выбора трансформируемой в мини-ТЭЦ котельной обоснованы признаки, отражающие ее назначения, т.е. роль в системе теплоснабжения, а также учитываются технологические ограничения на выдачу электрической мощности при ее трансформации в мини-ТЭЦ.

Очевидно, что важную роль играет институциональная среда, определяющая правила и регламенты работы мини-ТЭЦ на оптовом и розничном рынке электроэнергии, правила технологического присоединения генерации к сети и другие нормативно-правовые акты.

Работа на розничном рынке позволяет заключать двухсторонние договора купли-продажи электроэнергии мини-ТЭЦ с коммунальными и коммерческими организациями, что сопровождается ростом доступности электроэнергии. Объясняется это возможностью сократить затраты на оплату сетевой составляющей в цене на электроэнергию, что важно для потребителей, находящихся в одном энергорайоне с котельной. В этом случае можно использовать существующую распределительную сеть среднего

напряжения, которая преобразуется в микрогрид. При этом появление в энергорайоне нового источника электроэнергии повышает гибкость и надежность электроснабжения.

В России к розничным генераторам относятся источники, не превышающие по мощности 25 МВт, что определяет максимальную мощность мини-ТЭЦ.

Предлагается методика выбора котельных для трансформации в мини-ТЭЦ и соответствующий ей алгоритм.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предпосылки реконструкции котельных с переводом в мини-ТЭЦ и системные эффекты от технического перевооружения

Общеизвестным является то, что процесс комбинированного производства тепловой и электрической энергии характеризуется высокой энергоэффективностью: расход топлива примерно в 1,5 раза ниже относительно раздельного производства энергии на котельных и тепловых электростанциях [14].

Известно, что коэффициент полезного использования топлива на ТЭЦ с паросиловыми установками достигает 70–75% [15], что обусловило развитие технической политики теплофикации на территории СССР. Идея широкого применения комбинированной выработки электрической и тепловой энергии была заложена в Государственном плане электрификации России (ГОЭЛРО).

Однако за последние десятилетия роль ТЭЦ в системах теплоснабжения изменилась. Снижение тепловой нагрузки ТЭЦ обусловлено рядом причин [16, 17], где главная – это сокращение потребления тепловой энергии и пара промышленными предприятиями. Конечно, свой вклад внесло строительство современных зданий с высокой теплоизоляцией. В системе теплоснабжения России с 2005 года на 16,8 % увеличилось количество газовых котельных, при снижении средней установленной мощности с 9,6 до 8 МВт. Это результат перехода части потребителей из централизованных на собственные системы теплоснабжения, где основными источниками служат котельные, что оказалось экономически эффективнее в условиях тотальной газификации территорий

и появления на рынке доступного и эффективного котельного оборудования, работающего с коэффициентом полезного использования топлива около 95%.

На сегодняшний день в структуре производства тепловой энергии в России на когенерацию и котельные приходится примерно по 50%. Потенциал когенерации использован только в крупнейших городах (рис. 1). Параллельно наблюдается существенный рост количества котельных: сейчас на их долю приходится 69% тепловых мощностей в стране. О динамике котельнизации можно судить по рис. 2, где с конца 1990-х прослеживается тенденция увеличения количества котельных. Аналогичная ситуация наблюдается на территории стран СНГ [18]. В Казахстане ведется активное строительство новых котельных в крупных и малых городах. Например, в Астане строятся две газовые котельные, мощность которых втрое превышает мощность существующего в городе источника комбинированной выработки [19]. В малых городах вводят в работу дополнительное котельное оборудование на ТЭЦ или строят новые источники тепловой энергии, не предполагающие комбинированную выработку. В Белоруссии в 2015 году около 35,7% тепловой энергии было произведено на котельном оборудовании, к 2021 году доля возросла до 37,2% [20]. Однако в стране существует тенденция возвращения к теплофикации, о чем свидетельствует увеличение числа мини-ТЭЦ [21], в том числе на базе трансформации котельных [22,23].

К наиболее распространенным типам когенерационного оборудования относятся энергоэффективные газопоршневые и газотурбинные установки [24], характеризующиеся высоким коэффициентом полезного использования топлива, значения которого достигают 85–89%.

Трансформация котельных в мини-ТЭЦ позволит увеличить долю комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, что обеспечит повышение энергоэффективности производства энергии и, следовательно, в определенной степени ресурсосбережения. Наибольший интерес в России при этом представляют почти 2600 котельных установленной мощностью от 20 до 100 МВт.

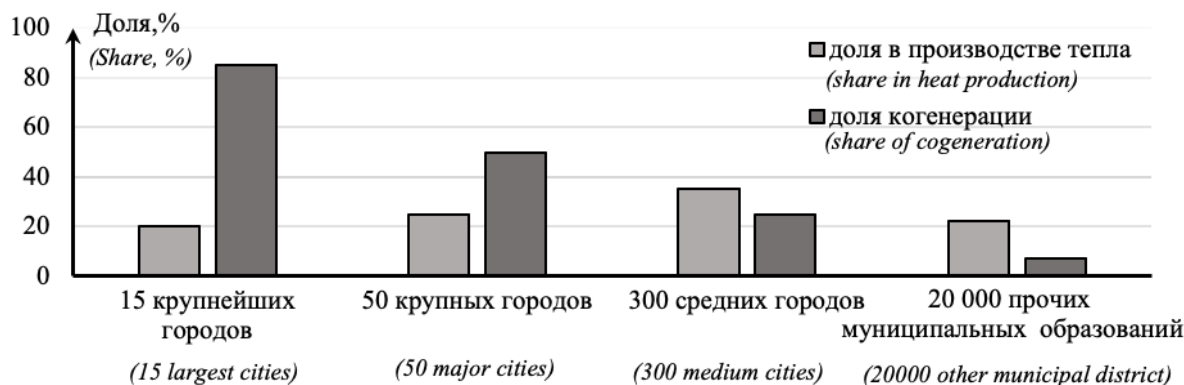


Рис. 1. Доля когенерации при централизованном производстве тепловой энергии в России.
 Fig.1. Share of cogeneration in centralized heat production in Russia.



Рис. 2. Динамика изменения числа котельных на фоне производства электрической и тепловой энергии тепловыми электростанциями.

Fig.2. Dynamics of changes in the number of boiler houses against the background of the production of electrical and thermal energy by thermal power plants.

Создание и присоединение к существующим распределительным электрическим сетям энергорайона мини-ТЭЦ позволяет повысить надежность [25, 26], экономичность, экологичность и энергоснабжения в целом [27, 28, 29].

Рост надежности энергоснабжения обеспечивается повышением:

- бесперебойности электроснабжения за счет многостороннего питания;
- долговечности электросетевого и генерирующего оборудования за счет возможности формирования облегченных режимов работы;
- управляемости и наблюдаемости за счет цифровизации энергорайона с мини-ТЭЦ для обеспечения согласованности взаимодействия централизованной и децентрализованных систем управления;
- энергобезопасности системы теплоснабжения за счет снижения риска

нарушения электроснабжения собственных нужд при крупных возмущениях в энергорайоне.

Повышение экологичности обеспечивается снижением углеродного следа при производстве энергии за счет сокращения выработки электроэнергии на угольных электростанциях [30].

Повышение экономичности обусловлено следующими факторами:

- энергоэффективностью производства тепловой и электрической энергии в когенерационном режиме на установках с высокими коэффициентами полезного использования топлива и электрическим КПД;
- сокращением потерь и затрат на передачу энергии из-за расположения энергоисточника в непосредственной близости к потребителям [3, 31];

- сокращением затрат на развитие электросетевого комплекса, связанное с техническим перевооружением и реконструкцией, особенно в дефицитных энергорайонах;
- снижением расходов на техническое обслуживание оборудования сетевого комплекса из-за повышения долговечности оборудования при обеспечении облегченного режима работы благодаря регулированию выдачи мощности мини-ТЭЦ;
- повышением наблюдаемости для контроля технического состояния оборудования и осуществления мероприятий по обеспечению показателей качества электроэнергии [32, 33].

Методика отбора котельных для трансформации в мини-ТЭЦ

Как известно, существует несколько схем технологического присоединения котельной к электрической сети. Во многом это зависит от требований к категории надежности теплоснабжения и категории надежности электроприемников котельной. Обычно котельные присоединяются к электрической сети согласно требованиям к электроприемникам первой категории надежности. Таким образом, электрическая сеть низкого напряжения, включая трансформаторные пункты, обеспечивает двустороннее независимое питание, где бесперебойность электроснабжения позволяет обеспечить функционирование котельных, как объектов первой категории надежности теплоснабжения. На крупных котельных тепловой мощностью более 100 МВт зачастую предусматривается установка резервного генератора для обеспечения собственных нужд.

Таким образом, схема внешнего электроснабжения средних отопительных котельных мощностью от 20 до 100 МВт обычно избыточна, что позволяет при отказе любого одного элемента (критерий n-1) обеспечить электроснабжения собственных нужд. Загрузка системы электроснабжения котельной даже при максимальной тепловой нагрузке не превышает 50%. Это позволяет при минимальных затратах на техническое перевооружение сети низкого напряжения осуществить на котельной установку генераторов, предназначенных обеспечить собственные нужды и выдачу электрической мощности, двукратно превышающей нагрузку собственных нужд.

Очевидно, что при установке генерации трехкратно превышающую по мощности максимальную нагрузку собственных нужд требуется реконструкция сетевого комплекса для выдачи электрической мощности в распределительную сеть среднего напряжения. Однако в этом случае выдаваемая мощность мини-ТЭЦ ограничена величиной минимальной загрузки центра питания. Это требование позволяет исключить реверсивный режим работы районной подстанции, которая обычно проектируется и строится для выполнения функции понижения напряжения.

Следует отметить актуальность трансформации котельных в мини-ТЭЦ для субъектов, выполняющих функции единой теплоснабжающей организации (ЕТО).

Исходя из требований к надежности электроснабжения, экономических и экологических эффектов можно выделить две детерминированных многофакторных моделей, по выбору котельной и использованию когенерационных установок мини-ТЭЦ.

Каждая из моделей определяет условия присоединения когенерационных установок к электрической сети при трансформации котельных (рис. 3):

1 модель: Обеспечение потребности в электроэнергии системы теплоснабжения, включая собственные нужды котельной. В этом случае достаточно присоединения генераторов к сети напряжение 0,4 кВ, выдача мощности сеть среднего напряжения осуществляется без реконструкции этой сети.

2 модель: Обеспечение растущего спроса на электроэнергию в энергорайоне, В этом случае предполагается реконструкция сети среднего напряжения 10(6) кВ, в том числе для выдачи мощности мини-ТЭЦ. Это альтернатива развитию сети высокого напряжения.

При отборе котельных появляется задача их оценки (ранжирования). Доминирующей в теории принятия решений является многокритериальный выбор.

Решение поставленной задачи отбора котельных для трансформации основано на детерминированном факторном анализе.

Производится попарное сравнение альтернатив и дальнейшее установление порядка на основе сравнения значений многокритериальных функций.

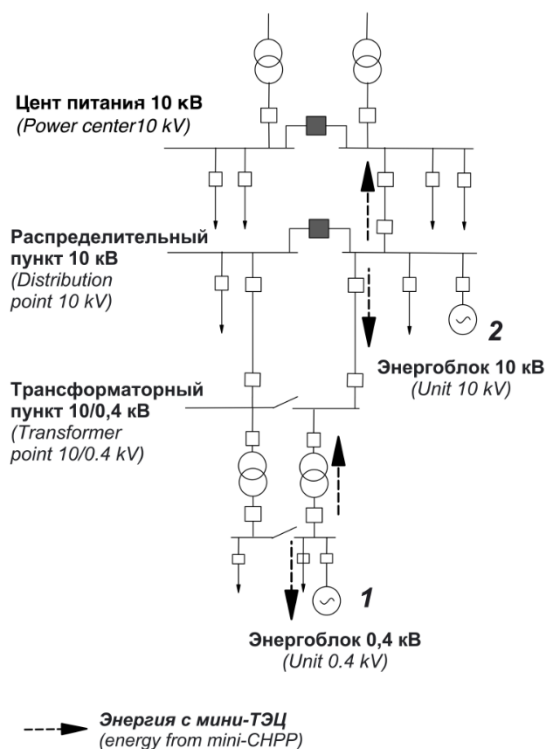


Рис.3. Модели использования мини-ТЭЦ при трансформации котельной.
Fig.3. Models for the use of mini-CHPP in the transformation of the boiler house.

Множество котельных, как возможных объектов трансформации задается множеством А:

$$A = \{a_i\}_{i=1}^n \quad (1)$$

Множество критериев для оценки эффективности трансформации задается множеством В:

$$B = \{b_j\}_{j=1}^m \quad (2)$$

Далее для отбора каждой котельной a_i по всему множеству критериев выставляются оценки рамках нечеткой логики:

- удовлетворяет критерию = 1
- не удовлетворяет критерию = 0

В качестве критериев оценки эффективности трансформации котельных в данной работе предлагается анализ множества исходя из 4 критериев.

Критерий b_1 : назначение котельной

Существуют отопительные и производственные котельные. Основными продуктами отопительной котельной

являются горячая вода и теплоноситель. Промышленные котельные являются источником пара для реализации технологического процесса производства и для них отопительные функции имеют вторичное значение.

Обычно отопительные котельные являются элементом коммунальной инфраструктуры муниципального образования. Их трансформация позволит помимо тепла осуществлять отпуск коммунальным потребителям недорогого электричества, которое во многих странах дотируется в соответствии с социальной политикой. Таким образом,

$$b_1 = 1, \text{ если котельная отопительная}$$

$$b_1 = 0, \text{ если котельная не отопительная}$$

Критерий b_2 : используемое топливо

Ориентация на газопоршневые и газотурбинные установки с позиций технологической допустимости требует соответствующей ресурсной достаточности. Поэтому трансформация котельной в мини-ТЭЦ с ГПУ и ГТУ возможна при ее работе на природном газе, что предполагает ее присоединение к системе газоснабжения. Последнее создает благоприятные предпосылки получения дополнительного объема природного газа достаточного для работы мини-ТЭЦ.

По мнению авторов, при выборе технических решений и схемы мини-ТЭЦ, создаваемой в коммунальной энергетической инфраструктуре приоритет следует отдавать ГПУ, т.к. их электрический КПД практически не зависит от температуры, окружающей среду в отличие от ГТУ. Кроме этого, их электрический КПД не ниже, а у отдельных моделей и выше, чем у паросиловых установок. ГПУ более ремонтпригодные, не требуют специальных условий завода-изготовителя как ГТУ, не нуждаются в дополнительных затратах на повышение шумозащиты, что важно для населенных пунктов [34], следовательно,

$$b_2 = 1, \text{ если топливо газ}$$

$$b_2 = 0, \text{ если топливо не газ}$$

Критерий b_3 : отношение котельной к объектам единой теплоснабжающей организации

Единая теплоснабжающая организация (ЕТО) – это основной поставщик тепла в определённой системе теплоснабжения, обязанностью которого является обеспечение тепловой энергией всех потребителей в зоне своей деятельности.

У источников тепловой энергии в зоне действия ЕТО существует высокая тепловая нагрузка и перевод такой котельной в мини-ТЭЦ позволит обеспечить производство тепловой энергии в когенерационном режиме [35], снизив ее стоимость, относя значительную часть расхода топлива на отпускаемую электроэнергию.

Зачастую мощность нагрузки электроприемников системы теплоснабжения, включая собственные нужды котельной, превышает 10% от тепловой и требует высокой надежности электроснабжения. Следовательно,

$$b_3 = 1, \text{ если котельная относится к ЕТО}$$

$$b_3 = 0, \text{ если котельная не относится к ЕТО}$$

Критерий b_4 : баланс энергорайона

В дефицитных энергорайонах для подключения новых потребителей отсутствуют свободные мощности на центре питания. Для снятия ограничений на новое технологическое присоединение потребителей требуется производить реконструкцию подстанции или увеличивать пропускную способность подходящих к подстанции линий. Это связано с большими капитальными затратами, что ведет к повышению сетевого тарифа и снижению доступности электроэнергии из систем централизованного электроснабжения. Появление мини-ТЭЦ в дефицитном энергорайоне снижает указанное ограничение, не требуя существенной реконструкции сети высокого напряжения.

$$b_4 = 1, \text{ если энергорайон дефицитный}$$

$$b_4 = 0, \text{ если энергорайон избыточный}$$

Обычно указанным признакам отвечает несколько котельных из множества, находящихся в муниципальном образовании.

Результаты вынесения оценок представляются как матрица решений вида, представленного в таблице 1.

Таблица 1.

Матрица решений.

Table 1.

Decision matrix.

	b_1	b_2	b_3	b_4
a_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
a_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
a_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}
...
a_n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	x_{n4}

Далее для котельных, удовлетворяющих условию:

$$x_{11} = x_{12} = x_{13} = x_{14} = 1 \quad (3)$$

вычисляется ранг, определяющих приоритет реконструкции (R).

Очевидно, что ранг зависит от характеристик энергорайона. Судить об этом можно по соотношению мощности центра питания с учетом критерия $n-1(P_{\text{цп_дон}})$ и электрической мощности создаваемой генерации, которая прямо пропорциональна тепловой мощности котельной (W):

$$R = \frac{W}{P_{\text{цп_дон}}} \quad (4)$$

Чем выше значение ранга, тем выше приоритетность трансформации котельной с позиции эффективности. Создание на их основе мини-ТЭЦ повысит эффективность систем тепло- и электроснабжения, что важно для социально-экономического развития территорий.

ПРИМЕР

Выбор котельных для технического перевооружения в Новосибирской агломерации

В качестве примера реализации алгоритма представлены результаты отбора котельных для последующей трансформации в мини-ТЭЦ на территории Новосибирской агломерации, где есть опыт успешной работы мини-ТЭЦ.

В г. Новосибирск преобладает централизованное теплоснабжение от ТЭЦ и крупных котельных. По состоянию на 2023 год, от ТЭЦ обеспечивается около 60 % потребителей, от крупных котельных

теплопроизводительностью более 20 МВт – 35,4 %.

В муниципальных образованиях, формирующих Новосибирскую агломерацию, отсутствуют источники комбинированной выработки, вся тепловая энергия вырабатывается на котельных, что определяет актуальность перехода на когенерационные технологии.

В топливном балансе котельных преобладает природный газ, что обусловлено газификацией региона. В результате исследования была сформирована матрица решений для 360 котельных. Отобрано 134 отопительных газовых котельных мощностью от 25 до 416 МВт, выполняющих функции ЕТО и находящихся в зоне дефицитных центров питания.

Далее отобранные котельные были проранжированы по приоритетности, путем расчета ранга, 10 котельных, обладающих максимальным рангом отображены на рис. 4.

В рассматриваемом примере на первом месте стоит котельная №8, а затем следует осуществлять трансформацию котельных №9 и №7 находящихся в одном энергорайоне. Следующими по приоритету являются котельные №1, №4, №6. Замыкают рейтинг котельные №2, №3 и №5

Скорее всего, помимо установки когенерационного оборудования на выбранных котельных потребуется реконструкция сети 10 кВ.

Трансформация котельной №10 позволит получить максимальный эффект от повышения энергоэффективности, но на ее базе можно создать источник мощностью до 25 МВт для электроснабжения второй по мощности в г.Новосибирске системы централизованного теплоснабжения. Это позволит мини-ТЭЦ остаться субъектом розничного рынка электроэнергии.

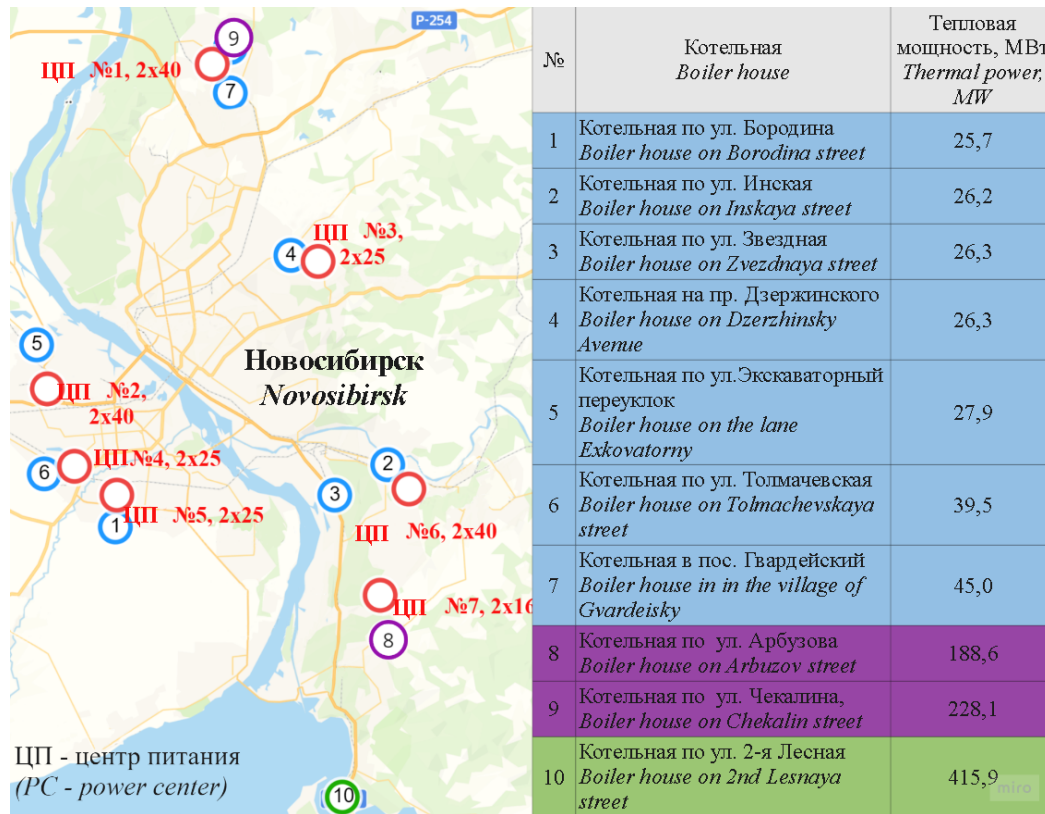


Рис. 4. Десять приоритетных для трансформации котельных в Новосибирской агломерации.

Fig.4. Ten top-priority boiler houses for transformation in the Novosibirsk agglomeration.

Трансформация отобранных котельных обеспечит повышение эффективности нескольких систем теплоснабжения, окажет положительное влияние на электроснабжение

в энергорайонах, повысив свойства экономичность, надежность и экологичность.

Полученные в работе результаты могут служить рекомендациями при разработке региональных программ «Энергосбережение

и повышение энергетической эффективности Новосибирской области», «Схема и программа развития электроэнергетики Новосибирской области», «Схема теплоснабжения города Новосибирск», что приведет к повышению инвестиционной привлекательности осуществления мероприятий по повышению когенерационной выработки тепловой и электрической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение энергоэффективности производства является актуальной отраслевой задачей. Одно из средств решения – использование когенерационных технологий и создание мини-ТЭЦ. Одним из вариантов создания мини-ТЭЦ является техническое перевооружение существующих котельных. В исследовании предложена комплексная методика отбора и ранжирования котельных для последующего создания мини-ТЭЦ, что потребует реконструкции распределительной сети среднего напряжения, но позволит сократить капиталовложения в модернизацию сети высокого напряжения. Разработанная методика основана на анализе комплекса критериев, учитываемых назначение котельных, используемое топливо, установленную тепловую мощность и выполняемую функцию в системах теплоснабжения, техническое состояние и режим работы электросетевого оборудования, перспективные и балансы электроэнергии и мощности в энергорайоне, в составе которого будет работать мини-ТЭЦ.

Применение полученных результатов исследования при решении задач повышения энергоэффективности и экологичности отдельных территорий повысит эффективность принимаемых решений при развитии систем теплоснабжения.

Дальнейшие научные исследования будут направлены на разработку методов обоснования структуры и состава когенерационного оборудования мини-ТЭЦ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10171, <https://rscf.ru/project/23-29-10171/> и гранта № р-57 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.

Литература (References)

- [1] Filippov S. New Technological Revolution and Energy Requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33 (accessed 02.03.2023).
- [2] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: Definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 2005, no. 33, pp.787–798. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.004 (accessed 05.03.2023).
- [3] Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. vol. 1295. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-63319-6_11 (accessed 05.03.2023).
- [4] Pankrushina T., Khorshev A. Methodical approach to assessing the optimal development scale of distributed cogeneration in the UPS of Russia for the long-term. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019, vol.114. DOI: 10.1051/e3sconf/201911405006 (accessed 06.03.2023).
- [5] Filippov S. P., Dilman M. D., Ilyushin P. V. Distributed generation of electricity and sustainable regional growth. *Thermal Engineering*. 2019, vol. 66, pp.869-880. DOI: 10.1134/S0040601519120036 (accessed 16.03.2023).
- [6] Sednin V.A., Raiko D.M., Levin V.M. К вопросу о повышении эффективности отопительных котельных и мини-TETs [On the issue of increasing the efficiency of heating boiler houses and mini-CHPs]. *Energiya i menedzhment – Energy and management*, 2015, no.1, pp. 12-17. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523> (accessed 19.03.2023).
- [7] Churashev V. N., Markova V. M. Mini-TETs-perspektivnoe napravlenie raz-vitiya energetiki [Mini-CHPP is a promising direction for the development of energy] *Aktualnye problemy razvitiya Novosibirskoy oblasti i puti ikh resheniya*. [Actual problems of the development of the Novosibirsk region and ways to solve them], 2014, no.1, pp. 138-161. (In Russian)
- [8] Caglayan H., Caliskan H. Advanced exergy analyses and optimization of a cogeneration system for ceramic industry by considering endogenous, exogenous, avoidable and unavoidable exergies under different environmental conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, vol. 140.

- DOI: 10.1016/j.rser.2021.110730 (accessed 15.04.2023).
- [9] García-Gusano D., Garraín D., Dufour J. Prospective life cycle assessment of the Spanish electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, vol. 75, pp.21-34 DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.011 (accessed 01.04.2023).
- [10] Beccali M., Ciulla G., Di Pietra B., Galatioto A., Leone G., Piacentino A. Assessing the feasibility of cogeneration retrofit and district heating/cooling networks in small Italian islands. *Energy*, 2017, vol. 141, pp. 2572-2686 DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.011 (accessed 11.03.2023).
- [11] Pashnin, V.O., Zhirgalova V.O. Povyshenie effektivnosti rayonnoy ko-telnoy G. Kopeyska za schet ustanovki gazoporshnevoy mini-TETs [Improving the efficiency of the district boiler house in Kopeysk by installing a gas-piston mini-CHPP] *Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i sotsialnoy sfere: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh* – [Energy and resource saving in thermal power engineering and social sphere: materials of the International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, Scientists] 2017, vol. 5, no.1, pp. 152-156. (In Russian)
- [12] Lake A., Rezaie B., Beyerlein S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp.417-425 DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.061 (accessed 14.04.2023).
- [13] O. Angelidis, A. Ioannou, D. Friedrich, A. Thomson, G. Falcone District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation // *Energy* 269, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126740 (accessed 17.03.2023).
- [14] Lisin, E., Sobolev, A., Strielkowski, W., Garanin, I. Thermal efficiency of cogeneration units with multi-stage reheating for Russian municipal heating systems. *Energies*, vol. 9, no.4, pp. 269. DOI: 10.3390/en9040269 (accessed 01.03.2023).
- [15] Lucas K. On the thermodynamics of cogeneration. *International Journal of Thermal Sciences*. 2000, vol.39, no.9-11, pp. 1039-1046. DOI: 10.1016/S1290-0729(00)01171-6 (accessed 02.04.2023).
- [16] Zeigarnik Y. A. Some problems with the development of combined generation of electricity and heat in Russia. *Energy*. 2006, vol.31, no.13, pp. 2387-2394. DOI: 10.1016/j.energy.2006.04.003 (accessed 12.04.2023).
- [17] Wang J. Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies. *Applied energy*. 2019, vol. 252, pp. 113445. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113445 (accessed 11.03.2023).
- [18] Nagornov, V.N., Mantserova E.P., Korsak T.F. Ekonomicheskaya effektivnost detsentralizovannogo teplosnabzheniya dlya usloviy Respubliki Belarus [Economic efficiency of decentralized heat supply for the conditions of the Republic of Belarus] *Knowledge Economy: Theory, Practice, Prospects for Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute* [Ekonomika znaniy: teoriya, praktika, perspektivy razvitiya : Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letnemu yubileyu instituta]. Donetsk, 2020, pp. 486-493. (In Russian)
- [19] *Na stroitelstvo gazovoy kotelnoy v Astane vydelyat 5 mlrd tenge* [5 billion tenge will be allocated for the construction of a gas boiler house in Astana]. Atameken business, 2023. Available at: <https://inbusiness.kz/ru/news/nastroitelstvo-gazovoj-kotelnoj-v-astane-videlyat-5-mlrd-tenge> (accessed 10.04.2023).
- [20] Pospelova T., Kuzmich V. Teplosnabzhenie v respublike Belarus: sostoyanie i perspektivy. *Heat supply in the Republic of Belarus: state and prospects* (Brief information). Minsk, 2021
- [21] Kovalyov I. L., Kovalyov L. I. Economic realities and development perspectives of small-scale power generation in the Republic of Belarus. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2013, no.3, pp.71-82.
- [22] Malajchuk L. M. Increase of efficiency of boiler-houses in agroindustrial complex by introduction of cogeneration technologies. *International Conference on Prospects and Directions of the Development of Energetics of the Agroindustrial Complex*, Minsk (Belarus), pp. 22-23 November 2007. – BSATU, 2007.
- [23] Bayrashevskiy B.A. Perevod vodogreynoy kotelnoy v rezhim mini-TETs [Transfer of a hot water boiler to a mini-CHPP mode]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zave-deniy i energeticheskikh obedineniy SNG*. [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. 2011, pp. 85-90.
- [24] Gil'Manshin, I. R., Konahina, I. A., Kashapov, N. F., & Fahreev, N. N. Mini-Central heating and Power Plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014, vol. 69, no. 1, DOI: 10.1088/1757-899X/69/1/012008 (accessed 17.03.2023).

- [25] Samoylenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. pp. 70-75. DOI: 10.24084/repqj18.225. (accessed 02.04.2023).
- [26] Alabugin A. A., Alabugina R. A., Shchelkonogov A. E. Methods for improving the reliability of power supply of enterprises based on the autonomous cogeneration sources. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies.. IEEE*, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602674 (accessed 12.04.2023).
- [27] Andreev V. N., Kulakov A. V. International environmental indicators of sustainable development within Russian energy companies (using the example of PJSC Inter RAO). *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020, vol.1683, no. 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/5/052036 (accessed 10.04.2023).
- [28] Borowski P. F. Management of energy enterprises in zero-emission conditions: Bamboo as an innovative biomass for the production of green energy by power plants. *Energies*. 2022, vol.15, no. 5. DOI: 10.3390/en15051928 (accessed 11.04.2023).
- [29] He, Y., Zhu, L., Fan, J., Li, L., Liu, G. Life cycle assessment of CO₂ emission reduction potential of carbon capture and utilization for liquid fuel and power cogeneration. *Fuel Processing Technology*. 2021, vol. 221. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106924 (accessed 10.04.2023).
- [30] Kerr T. M., Avendano F. Green loans and multinational corporations. *Natural Resources & Environment*. 2020, vol. 35, no. 2, pp. 46-49.
- [31] Dobrokhoto V. I., Zeigarnik Y. A. Cogeneration: Problems and possibilities of realization under present conditions. *Thermal engineering*. 2007, vol. 54, pp. 8-9. DOI: 10.1016/j.energy.2006.04.003 (accessed 18.04.2023).
- [32] Ilyushin P. V., Filippov S. P. Approaches to Voltage Control in Distributed Generation-Enabled Nodes of Distribution Grids. 2021 *International Ural Conference on Electrical Power Engineering.. IEEE*, 2021, pp. 223-228. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901006 (accessed 08.04.2023).
- [33] Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K. Ensuring Dynamic Stability of Voltage in Electric Power Systems under Critical Loads SSRN Electronic Journal. DOI: 10.2139/ssrn.4157004. (accessed 18.04.2023).
- [34] Gil'Manshin I. R. et al. Mini-Central heating and Power Plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2014, vol. 69, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/69/1/012008 (accessed 03.07.2023).
- [35] Beiron, J., Göransson, L., Normann, F., & Johnsson, F. Flexibility provision by combined heat and power plants—An evaluation of benefits from a plant and system perspective. *Energy Conversion and Management*. 2022, vol.16. DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100318 (accessed 18.03.2023).

Сведения об авторах.



Мышкина Людмила Сергеевна, к.т.н., доцент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем, вед. науч. сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета
E-mail: Lsmyshkina@gmail.com



Фролова Яна Андреевна, ст. преподаватель каф. Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.
E-mail: ya.abramova1991@gmail.com



Иванова Елизавета Михайловна, сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета.
E-mail: lizai2000@mail.ru

Methodology for Determining Heat Losses through Translucent Construction

Malyarenko V.¹, Alyokhina S.², Orlova N.³

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

²University of Applied Sciences Technikum Wien, Vienna, Austria,

³Anatoly Pidhorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

Abstract. The purpose of this work is to determine the heat transfer coefficient of translucent fences, considering the number of storeys of buildings, climatic factors, such as wind velocity and outdoor temperature. To achieve this goal, the following tasks were solved: analysis of heat transfer in translucent enclosures as a quasi-stationary process; analysis of heat transfer processes in translucent barriers, which are a combination of solid transparent plates and air gaps connected by a frame structure; determination of the heat transfer coefficient on the glass surface depending on climatic factors and the radiant component. The most important result is the empirical dependence of the heat transfer coefficient on the outer surface of the window block on the Reynolds criterion, the dependences for determining the heat transfer coefficient of window blocks are improved, considering climatic parameters. The heat transfer coefficient of the window block as a whole is presented in the form of analytical ratios, considering the location of the building and its height, changes in wind velocity and outdoor temperature. This methodology was tested on the example of a civil administrative building, for which the heat transfer coefficients of window structures of non-standard series were evaluated. The significance of the research results lies in the possibility of using the obtained dependencies to assess the thermal characteristics of window structures of non-standard shapes. The dependences of the heat transfer coefficient on wind speed and outside air temperature given in the paper can be used in the energy audit of buildings.

Keywords: heat losses; heat transfer coefficient; Nusselt number; Grashof number; window; wind, external disturbances.

DOI:<https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.08>

UDC: 692.82.

Metodologie de determinare a pierderilor de căldură prin structuri de construcție translucide

Maliarenko V.¹, Aliokhina S.², Orlova N.³

¹ Universitatea Națională de Economie Municipală din Harkov, numită după UN. Beketova, Harkov, Ucraina

² Universitatea de Științe Aplicate Technikum Wien, Viena, Austria

Institutul pentru Probleme de Inginerie Mecanică, A. N. Podgorny Academia Națională de Științe a Ucrainei, Harkov, Ucraina

Rezumat. În clădirile moderne, aria structurilor de ferestre de fațadă variază de la 55% la 85% din total, astfel încât sarcina de a îmbunătăți metodologia de determinare a coeficientului de transfer de căldură al structurilor de ferestre este urgentă. Scopul acestei lucrări este de a determina coeficientul de transfer termic al structurilor translucide, având în vedere numărul de etaje ale clădirilor, factorii climatici, precum viteza vântului și temperatura exterioară. Pentru atingerea acestui scop au fost rezolvate următoarele sarcini: analiza transferului de căldură în structurile translucide ca proces cvasi-staționar; analiza proceselor de transfer de căldură în structurile translucide, care sunt o combinație de plăci solide transparente (ochelari) și goluri de aer conectate printr-o structură de cadru; determinarea coeficientului de transfer termic pe suprafața sticlei în funcție de factorii climatici și componenta radiantă. Cel mai important rezultat este dependența empirică a coeficientului de transfer termic pe suprafața exterioară a blocului de ferestre de criteriul Reynolds, dependențele pentru determinarea coeficientului de transfer termic al blocurilor de ferestre sunt îmbunătățite, luând în considerare parametrii climatici. Coeficientul de transfer de căldură al blocului de ferestre în ansamblu este prezentat sub formă de rapoarte analitice, luând în considerare locația clădirii și înălțimea acesteia, modificările vitezei vântului și ale temperaturii exterioare. Semnificația rezultatului cercetării constă în posibilitatea utilizării dependențelor obținute pentru a evalua caracteristicile termice ale structurilor ferestrelor de forme nestandard.

Cuvinte-cheie: pierdere de căldură; coeficient de transfer termic; numărul Nusselt; numărul Grashof; fereastră; vânt, tulburări externe.

Методология определения тепловых потерь через светопрозрачные ограждающие конструкции Маляренко В.¹, Алёхина С.², Орлова Н.³

¹Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков, Украина

²Университет прикладных наук **Technikum Wien**, Вена, Австрия

³Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

Аннотация. В современных зданиях площадь фасадных оконных конструкций составляет от 55 % до 85 % от общей, поэтому актуальной является задача усовершенствования методологии по определению коэффициента теплопередачи оконных конструкций. Цель данной работы – определение коэффициентов теплопередачи светопрозрачных ограждений с учетом этажности зданий, климатических факторов, таких как скорость ветра, температура наружного воздуха. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ теплопереноса в светопрозрачных ограждениях как квазистационарного процесса; анализ процессов теплопереноса в светопрозрачных ограждениях, которые представляют собой комбинацию твердых прозрачных пластин (стекло) и воздушных прослоек, соединенных рамной конструкцией; определение коэффициента теплоотдачи на поверхности стекла в зависимости от климатических факторов, и лучистой составляющей. Наиболее важным результатом являются эмпирические зависимости коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности оконного блока от критерия Рейнольдса, усовершенствованы зависимости для определения коэффициента теплопередачи оконных блоков с учетом климатических параметров. Коэффициент теплопередачи оконного блока в целом представлен в виде аналитических соотношений, с учетом расположения здания и его высоты, изменения скорости ветра и температуры наружного воздуха. Данная методология апробирована на примере гражданского административного здания (общая площадь светопрозрачных ограждений составляет 70 % от общей площади здания), для которого оценивались коэффициенты теплопередачи оконных конструкций нестандартных серий. Значимость результата исследований заключается в возможности использования, полученных зависимостей для оценки теплотехнических характеристик оконных конструкций нестандартной формы. Приведенные в работе зависимости коэффициента теплопередачи от скорости ветра и температуры наружного воздуха могут быть использованы при энергоаудите зданий с большим коэффициентом остекления фасадов здания для определения теплотерь и разработки показателей энергосбережения.

Ключевые слова: тепловые потери; коэффициент теплопередачи; число Нуссельта; число Грасгофа; окно; ветер, внешние возмущающие воздействия.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современная строительная индустрия ориентируется на создание энергоэффективных зданий [1], [2], [3]. Поэтому исследования теплофизических параметров ограждающих конструкций актуальны, поскольку направлены на повышение их теплозащитных качеств [1].

В настоящее время существуют методики определения базового уровня энергопотребления, содержащие процедуру построения многофакторной модели и определяющие ее переменные [4], для которой необходимо уточнение параметров ограждающих конструкций, формирующих основную тепловую нагрузку. Для оценки мероприятий, направленных на снижение энергопотребления первоочередными являются задачи разработки инженерных методов по оценке теплофизических параметров ограждающих конструкций.

В любом здании оконные конструкции являются не только элементом самого здания, а системой обеспечения комфортных

условий. Если при разработке здания основное внимание уделяется его энергоэффективности коэффициент теплопередачи окон должен быть четко определен.

В общей площади стеклопакета на светопропускающие конструкции (стекла) приходится около 70 %, и 30 % на рамную. При этом в общей стоимости 1 м² окна стоимость стеклопакета составляет 70 %, стоимость рамы – 30 %. Таким образом, минимизировать потери разумнее за счет применения конструктивных решений. Для разработки таких энергосберегающих решений необходима методика определения коэффициента теплопередачи с учетом ширины, толщины и высоты стеклопакета, направления ветра, заполнения стеклопакета.

Коэффициенты теплопередачи светопрозрачных конструкций определяются несколькими способами [5]: численным моделированием [6], [7]; определение коэффициентов теплоотдачи по методике, описанной в [8], или по табличным данным [9]. В гражданских зданиях часто

применяются нестандартные оконные конструкции, которые требуют индивидуального подхода для оценки их уровня энергопотребления и проведения мероприятий по энергосбережению.

Окупаемость энергоэффективных стеклопакетов по сравнению с традиционными оценивается в [10].

В ряде работ приводится исследование по разработке окон с повышенной теплозащитой и герметичностью для районов с холодным климатом [11], [12], для которых актуальна оценка как климатических параметров, так и индивидуальных параметров.

В работах [13, 14] представлены экспериментальные и теоретические исследования новых оконных конструкций с тепловыделением в воздушных зазорах, с экранами и жалюзи с теплоотражающими покрытиями, с вентиляцией воздушных зазоров.

Однако представленные исследования не позволяют оценить эффективность мероприятий по реконструкции с уточнением коэффициентов теплопередачи в зависимости от климатических факторов.

Для более корректного определения технико-экономических показателей применения оконных систем с высоким уровнем теплозащиты анализируются перспективы совершенствования оценки их теплотехнических параметров [15], [16]. Однако, представленная методика не может быть применена для оценки мероприятий по энергосбережению с учетом метеофакторов.

Основными параметрами при оценке энергоэффективности зданий являются тепловые свойства материалов. Существующие методы определения тепловых свойств современных светопрозрачных конструкций анализируются в работах [17], [18]. Описан комплексный метод определения фактического значения приведенного сопротивления теплопередаче оконных систем, который основан на измерении средней температуры внутренней поверхности конструкции и определении фактического коэффициента теплопередачи. Однако данный подход требует проведения большого количества измерений, чтобы избежать высокой погрешности.

В работе [18] проведен анализ различных способов повышения сопротивления

теплопередаче стеклопакетов. В результате была предложена зависимость сопротивления теплопередаче энергоэффективных оконных систем от различных факторов, таких как оконное заполнение, эмиссионное покрытие. Однако ветровое воздействие не учитывалось, что существенно снижает эффективность методики.

В работе [19] представлена методика уточнения коэффициента теплопередачи светопрозрачных ограждений по числу Рэлея с учетом умеренных климатических факторов.

На основе метода конечных разностей уточняется конвективный теплообмен в вертикальных слоях воздуха, анализируются изотермы и в результате приводятся средние значения числа Нуссельта по вертикали [20]. Однако для зданий, расположенных в умеренно-континентальном климате, важной составляющей являются скорость ветра и температура наружного воздуха.

Таким образом, необходима методика оценки коэффициента теплопередачи оконных конструкций различной конфигурации с учетом высоты зданий, а также климатических факторов.

Целью данной работы является определение коэффициентов теплопередачи светопрозрачных ограждений с учетом этажности зданий, климатических факторов, таких как скорость ветра, температура наружного воздуха.

По известным данным авторов аналогичные исследования не проводились.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время актуальной проблемой является определение потерь тепла через светопрозрачные конструкции для административных зданий, конструкции которых индивидуальны.

Для разработки методики определения коэффициента теплопередачи через светопрозрачные конструкции рассматривалось административное здание, расположенное в г. Харьков, Украина.

Здание имеет форму параллелепипеда. Окна прямоугольные, однокамерные, разной высоты и ширины.

Конструкция одной из оконных систем показана на рис. 1

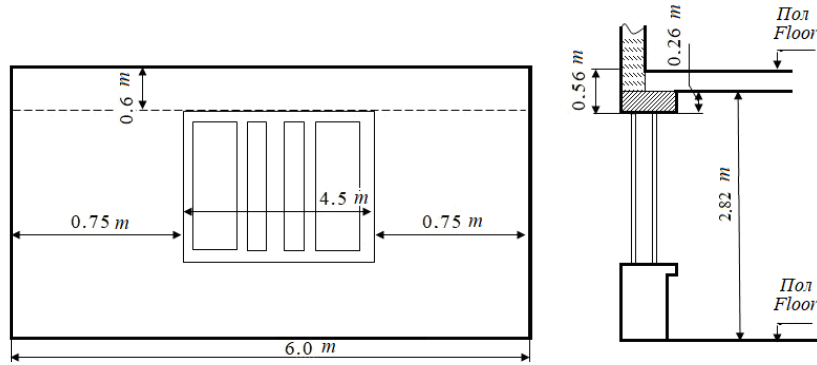


Рис. 1. Схема стены с оконным проемом.
Fig.1. Scheme of a wall with a window opening.

Оконная конструкция рассматриваемого здания представляет собой комбинацию сплошных прозрачных пластин (стеклянных), пространство между которыми заполнено газом и соединенных рамной конструкцией. Теплопередача через оконные конструкции происходит достаточно быстро, поэтому может рассматриваться как квазистационарный процесс. Теплопередача через окно осуществляется теплопроводностью, излучением и конвекцией.

Обтекание зданий воздушным потоком имеет сложный характер, сопровождающийся формированием и взаимодействием областей отрыва с циркуляцией воздуха в них. Наветренной принимается сторона, на которую поток налетает импактно и образовывается область заторможенного потока, в которой скорость движения воздуха близка к нулевой, и градиентного течения; боковой соответственно область образования отрывных зон при обтекании углов здания. Внутри наветренной зоны давление падает в связи с деформацией и разделением ветрового потока, поскольку турбулентные вихри, огибая здание через боковые поверхности, переносят воздушные массы в заветренную вихревую зону аэродинамического следа.

МЕТОДОЛОГИЯ

За счет разности температур, тепло переходит в направлении падения температуры, для анализа коэффициента теплопередачи процессы теплообмена разграничиваются и анализируются отдельно. Коэффициент теплопередачи оконной системы равен

$$K = \frac{1}{R_{in} + \sum_{i=1}^{i-1} R_{gl} + \sum_{i=1}^{i-1} R_{win\ fil} + R_{out}} \quad (1)$$

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad R_{gl} = \frac{\delta_{gl}}{\lambda_{gl}}, \quad R_{win\ fil} = \frac{1}{\alpha_{air}},$$

$$R_{out} = \frac{1}{\alpha_{out}} - \text{термическое сопротивление: на}$$

внутренней поверхности остекления, самого остекления, воздушного зазора и на внешней поверхности остекления соответственно.

Коэффициент теплопроводности оконного стекла можно принять равным $\lambda=0.74+0.001 \cdot t$ W/(m²°C), толщина оконного стекла $\delta=3; 4; 5$ мм. В диапазоне изменения температуры наружного воздуха $-35 \text{ }^\circ\text{C} < t_{out} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициент теплопроводности стекла изменяется не более чем $\pm 3.14 \%$.

Для определения коэффициента теплопередачи температура стекла, расположенного внутри помещения считается средней по толщине, т.е. принимается равной t_1 , а для внешнего t_2 . По данным Эккерта [19] для воздуха переход от ламинарного режима течения к турбулентному на вертикальной поверхности происходит при числе Грасгофа 10^8-10^9 и приравнивается $Gr=10^9$, с учетом $\beta(t)$, g , v , получаем значение координаты перехода к турбулентному режиму течения в пограничном слое, в результате получаем зависимость

$$x_{cr} = (1 + 0.007636 \cdot t)^{2/3} \cdot \left(\frac{\Delta t}{273 + t} \right) \quad (2)$$

Для $t_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_l=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, величина x координата, отсчитываемая для поверхности стекла от верхнего края, будет в диапазоне $x_{cr}\sim 0.883$ м. $H-x_{cr}= 0.467$ м будет турбулентным. Среднее значение коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности прозрачной части окна можно принять как

$$\alpha_{in} = (\alpha_l \cdot x + \alpha_t \cdot (H - x_{cr})) / H \quad (3)$$

где H - высота светопрозрачного остекления

На рис. 2 показано распределение коэффициента теплопередачи на внутренней стороне стеклопакета в зависимости от температуры.

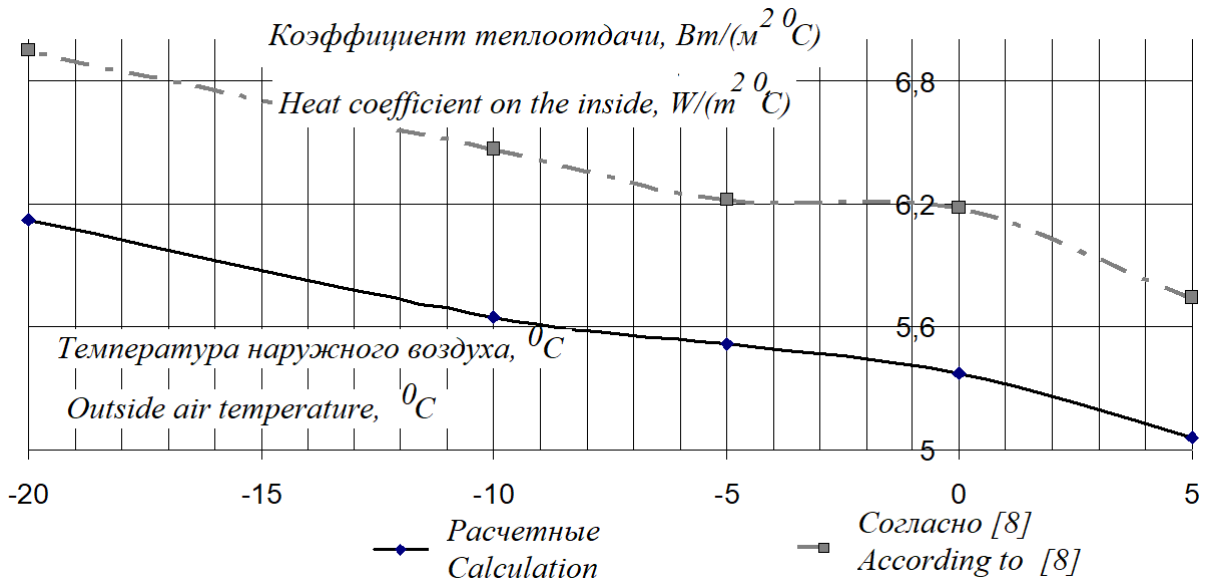


Рис.2. Распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней стороне стеклопакета.
Fig.2. Distribution of the heat convection coefficient on the inside of the double-glazed window.

Как видно из графика в диапазоне температур наружного воздуха от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности остекления варьируется от 5.05 до $6.1\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. Следовательно, коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности может быть принят как среднее значение в данном диапазоне температур наружного воздуха.

Теплообмен в вертикальном герметичном зазоре (в данном стеклопакета заполнение - воздух) зависит от температур на поверхностях стекол t_1 , t_2 и ширины прослойки b . Общий приведенный коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha_{red} = \alpha_{con} + \alpha_{rad} \quad (4)$$

В оконном проеме в зависимости от его ширины происходит конвективный теплообмен, обусловленный перепадами температур на поверхностях светопрозрачного ограждения (стекла).

Движение воздуха может быть ламинарным или турбулентным. Условия теплообмена также зависят от размещения отопительного прибора в помещении. В воздушной прослойке между стеклами, происходит свободная конвекция.

Вблизи внешнего стекла формируется ламинарный пограничный слой, на внутренней поверхности - турбулентный. Схема конвективного теплообмена внутри оконного проема представлена на рис. 3.

Состояние воздуха в оконной герметичной прослойке характеризуется механическим равновесием и отсутствием теплового равновесия (кондуктивный теплообмен) и теплообмена естественной конвекцией при ламинарном и турбулентном движении воздуха и может быть обобщено числом Грасгофа (5)

$$Gr_{cr} = g \cdot \beta \cdot \frac{t_{av} \cdot b^3}{\nu^2} \quad (5)$$

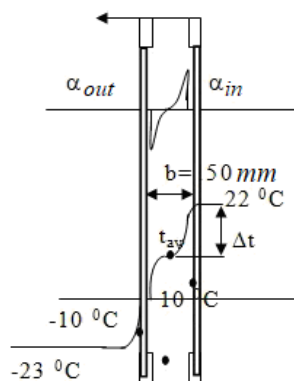


Рис. 3. Схема конвективного теплообмена внутри окна.
 Fig. 3. Scheme of the convective heat transfer inside the window.

Критическое значение числа Грасгофа, соответствующее возникновению конвективных течений в прослойке, составляет $Gr_{cr}=1400$ [21]. Если естественной конвекции в межстекольном пространстве нет, то теплообмен осуществляется теплопроводностью и излучением, температура по ширине прослойки b изменяется линейно. Предельное значение ширины прослойки b^* , при которой конвекция не происходит, в интервале температур $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$b^* \leq 3,00 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 7,64 \cdot 10^{-3} t_{av})^{2/3} \cdot \left(\frac{t_{av} + 273}{t_1 - t_2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Тепловой поток за счет теплопроводности равен

$$\theta = \lambda \cdot (\tau_1 - \tau_2) \cdot \beta \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха при t_{av} .

Если число Грасгофа больше 1400, в прослойке образуются пограничные слои [19]. Воздушный поток у теплой поверхности поднимается, у холодной поверхности опускается. Восходящий и нисходящий пограничные слои можно условно разделить на пристеночные слои с областью изменения скорости от нуля ($U=0$) на поверхности до ее максимального значения ($U=U_{max}$) и ядром течения, формируемым в центральной части прослойки

Возможны два случая развития пограничных слоев на стенках:

- если ширина прослойки b велика, то свободные естественные конвективные течения (пограничные слои) формируются независимо друг от друга на холодной t_2 и теплой t_1 поверхностях, их взаимодействие не наблюдается. Температура воздуха в центре прослойки (ядре) постоянна по высоте и равна t_{cr} , а сумма толщин пограничных слоев δ_{cold} (холодного) и δ_{hot} (теплого) $\delta_{cold} + \delta_{hot} < h$;
- толщины пограничных слоев δ_{cold} и δ_{hot} взаимодействуют друг с другом, т.е. $\delta_{cold} + \delta_{hot} > h$. При этом в центральной области прослойки возникают циркуляционные вихри, количество которых зависит от перепада температур $t_2 - t_1$.

Анализ экспериментальных работ, представленных в [21], [22], показывает, что в диапазоне изменения числа Грасгофа от $1.4 \cdot 10^3$ до 10^7 в воздушной прослойке наблюдается ламинарный режим течения, а при $Gr > 10^7$ турбулентный. Ширина прослойки, соответствующая переходу от ламинарного к турбулентному режиму течения, равна

$$b^{**} \geq 5.778 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 7.64 \cdot 10^{-3} t_{av})^{2/3} \times \left(\frac{t_{av} + 273}{t_1 - t_2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

При расчете теплотерь через окна приведенный коэффициент теплоотдачи воздушной прослойки определяется как среднее по ее ширине и высоте. На основании экспериментально полученной зависимости для воздушного зазора [23]

$$Nu_x = 0.231 \cdot Gr_x^{0.3} \quad (9)$$

где число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda_{air}}$; а число

$$\text{Грасгофа } Gr = g \cdot \beta \cdot \frac{(t-t_2) \cdot x^3}{\nu^2}.$$

Среднее значение числа Нуссельта можно представить в виде [20]

$$\overline{Nu}_H = \frac{1}{H} \int_0^H Nu_x dx \quad (10)$$

В [6] приведено критериальное уравнение ламинарного течения воздуха в межстекольном пространстве, при $5 < (H/b) \leq 20$, $1,4 \cdot 10^3 < Gr < 10^6$ в виде

$$\overline{Nu}_b = 0.119 \cdot Gr^{0.3} \left(\frac{b}{H} \right)^{0.1} \quad (11)$$

где b - ширина воздушного зазора.

Соответственно исследованию [9] приведенный коэффициент теплоотдачи для воздушной прослойки в диапазоне изменения числа Грасгофа от 10^3 to 10^{10} и $(H/b) > 5$ рекомендуется формула при $Pr = 0.71$

$$\overline{Nu}_{av} = 0.165 \cdot Gr_b^{0.25}$$

В результате приведенный коэффициент теплоотдачи в воздушной прослойке для ширины b преобразуется к виду

$$\alpha_{red} = 1.086 \cdot \left(1 - 2.89 \cdot 10^{-4} \cdot t_{av} \right) \times \left[(t_1 - t_2) / (t_{av} + 273) \right] \quad (12)$$

Лучистый теплообмен в оконных конструкциях происходит от внутренних ограждений (потолок, пол, перегородки и др.) к внутренней поверхности остекления. Температура на внутренней поверхности остекления в холодную погоду ниже температуры окружающих поверхностей. Внешняя поверхность оконного остекления отдает лучистое тепло в окружающую среду. Лучистый теплообмен в межстекольном пространстве между обращенными друг к

другу поверхностями остекления, которые с учетом диатермии среды, стационарности процесса, а также приведенного коэффициента излучения $\varepsilon = 0,8815$ и постоянной Стефана-Больцмана для абсолютно черного тела можно определить по уравнению

$$Q_{1-2} = 4.998 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Суммарный тепловой поток определяется в результате действия механизмов конвективного и лучистого теплообмена, последний целесообразно представить в виде $q_{rad} = \alpha_{rad} \cdot (t_1 - t_2)$. Если t_1 изменяется в пределах комфортной температуры воздуха в помещении $t_{вн} = 20-22$ °С, а t_2 наружного воздуха от -40 °С до 10 °С, коэффициент лучистой теплоотдачи можно аппроксимировать зависимостью

$$\alpha_{rad} = 4.548 + 2.25 \cdot \tau_2 \quad (14)$$

На основании анализа условий натекания воздуха на наветренную стену можно отметить, что значительная часть окон попадает в область заторможенного потока, в которой происходит формирование коэффициента теплоотдачи при влиянии пульсирующей составляющей продольной скорости U'

$$\alpha_{dec} = A \cdot U' \quad (15)$$

где величина $A = 23.85$ можно взять из результатов исследований натекания плоской струи на преграду [23] - [26].

Пульсирующая составляющая скорости ветра равна

$$U' = 0.3 \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0} \right)^{n_0} \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h} \right)^n \quad (16)$$

где U_0 - скорость основного воздушного потока на высоте h_0 , h - высота, на которой определяется скорость U' , $\delta_{b.l.}$ - толщина пограничного слоя, n - показатель степени, зависящий от типа местности, для которой рассчитывается скорость, n_0 - показатель степени, зависящий от типа местности, на которой расположен флюгер метеостанции.

Схема натекания воздуха на здание представлена на рис. 4. Скорость воздуха в

формуле (19) по высоте определяется по графику (рис. 5).

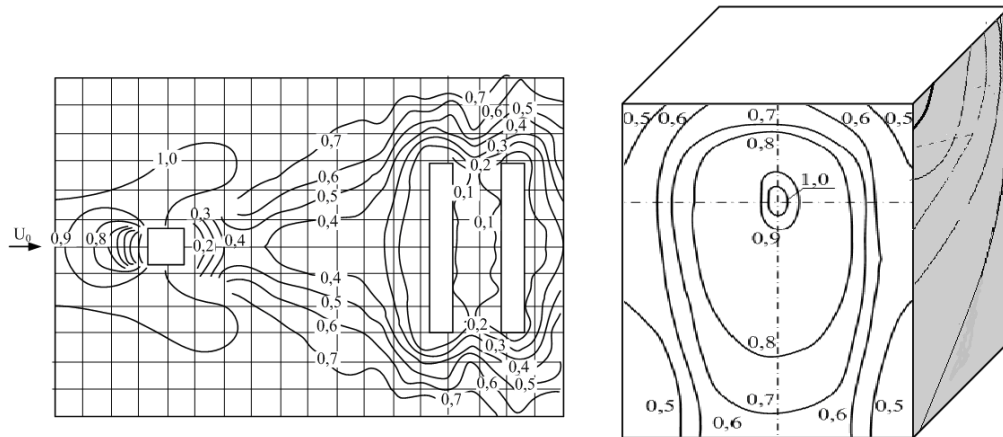


Рис. 4. Схема обтекания здания воздушным потоком.
Fig. 4. Diagram of the airflow around the building.

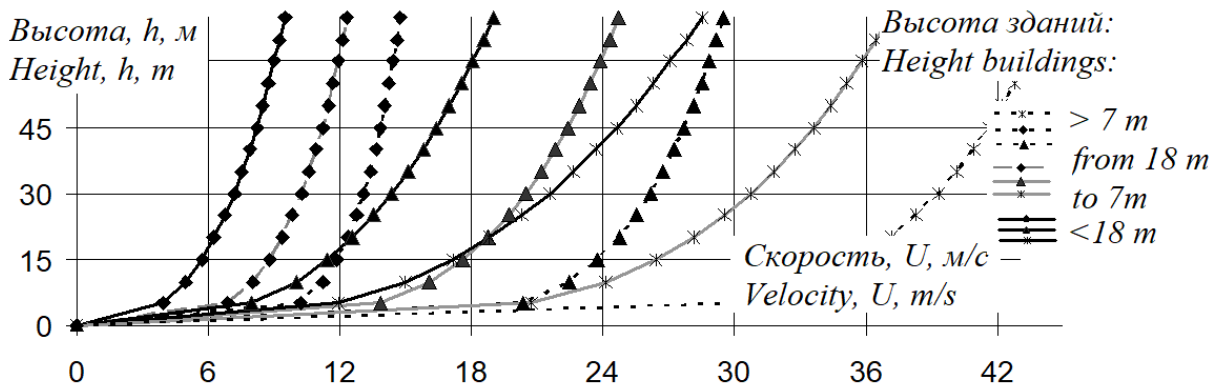


Рис. 5. Изменение скорости ветра по высоте здания.
Fig. 5. Wind velocity changes by the height near the building.

Вблизи боковой поверхности здания на значительной части наблюдается рециркуляция течений, т.е. вблизи угла здания имеется участок, в котором происходит сброс воздушного потока с наветренной стороны. В этом случае значения коэффициентов теплопередачи определяются согласно [21], [27]

$$\alpha_{out}^{grad} = 5.066 \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0}\right)^{n_0} \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h}\right)^n \quad (17)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи на боковой поверхности остекления для окон можно принять равным

$$\bar{\alpha}_{av} = 1.1 \cdot \rho_{air} \cdot U \quad (18)$$

или учитывая скорость отрыва воздушного потока и ее изменение по высоте [25], [28]

$$\bar{\alpha}_{av} = 1.5 \cdot \rho \cdot U_0 \cdot \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h_0}\right)^{n_0} \left(\frac{\delta_{b.l.}}{h}\right)^n \quad (19)$$

В качестве примера рассмотрим распределение коэффициентов теплопередачи оконных конструкций (тип стеклопакета – однокамерный, рис. 1). Температура наружного воздуха -20 °С; $U_0 = 5$ м/с, воздушный поток налетает под углом 90°. Если температура t_2 принимается равной температуре наружного воздуха -20 °С, коэффициент лучистой теплоотдачи равен $\alpha_{rad} = 4.098$ Вт/(м²·°С) в соответствии с приведенными выше формулами. Термическое сопротивление стекла равно $R_{gl} = 0.00418$ (м²·°С)/Вт.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности остекления рассматриваемого здания

представлены на рис. 6, 7. Коэффициент теплоотдачи с высотой увеличивается, поскольку воздушный поток у поверхности Земли затормаживается, а скорость воздушного потока растет. При этом при скорости воздушного потока от 1 м/с до 5 м/с изменение коэффициента теплоотдачи от этажа к этажу незначительно.

Анализ изменения коэффициента теплоотдачи в области торможения и градиентного течения показывает, что при увеличении скорости ветра от 8 м/с до 15 м/с КТО увеличивается более чем в 2 раза по

высоте здания. Теплообмен в светопрозрачных конструкциях осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. При этом у наружной поверхности оконной конструкции наблюдается вынужденная конвекция, вызванная воздействием внешних факторов. Теплопередача происходит в тонком слое, который непосредственно примыкает к наружной поверхности.

Таким образом, необходимо уточнить зависимость КТО не только от скорости ветра, но и от температуры, рис. 8, 9.

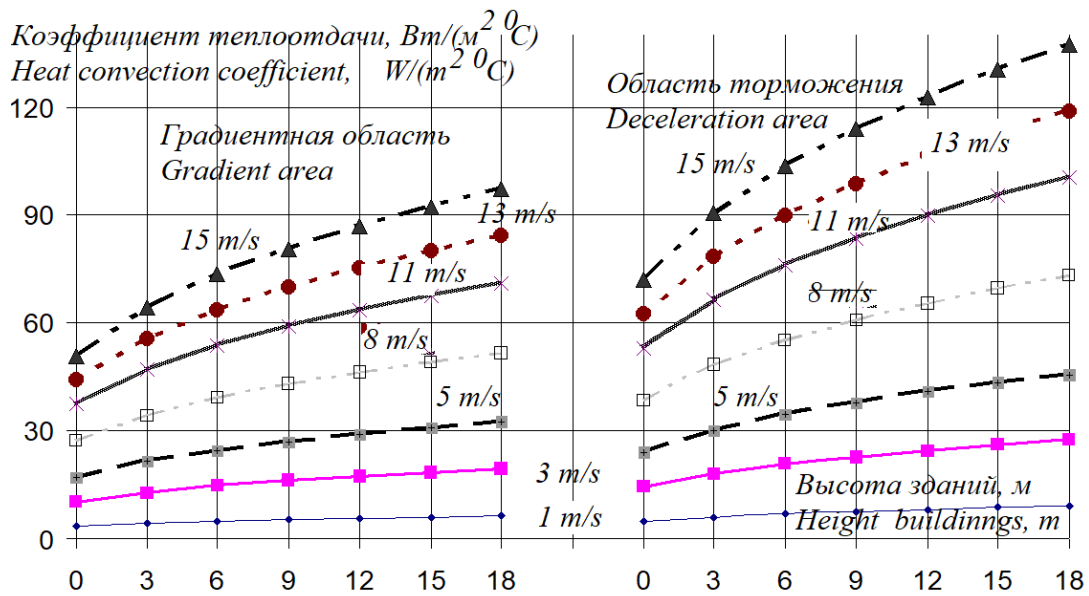


Рис. 6. Изменение коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости ветра по высоте.

Fig. 6. The change in the heat convection coefficient depending on the wind speed in height.

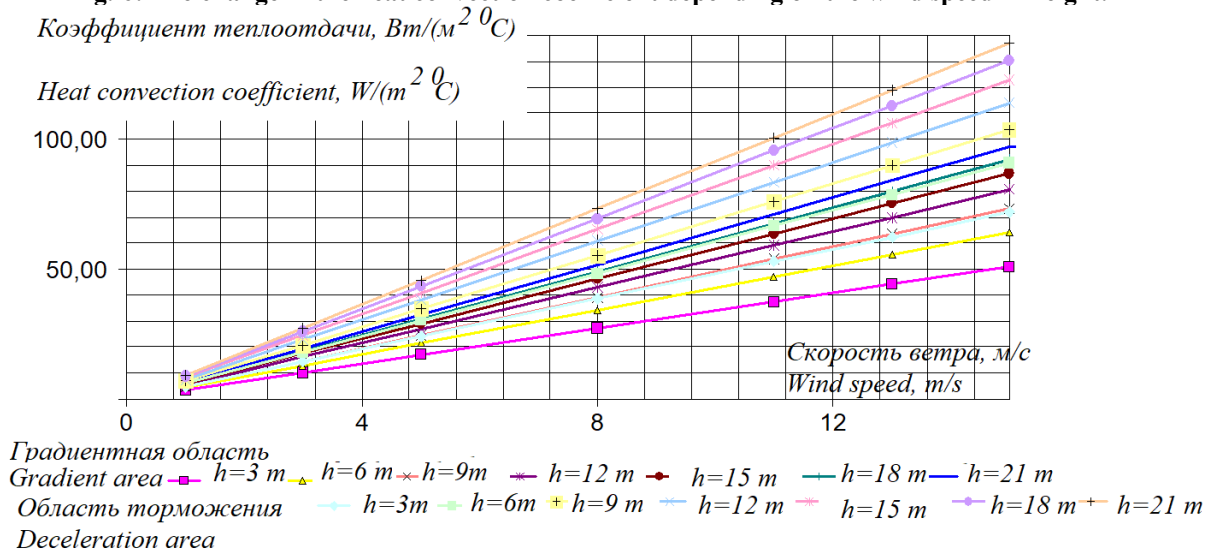


Рис. 7. Изменение коэффициентов теплопередачи в зависимости от скорости ветра по высоте.

Fig. 7. Change in heat convection coefficients depending on the wind speed in height.

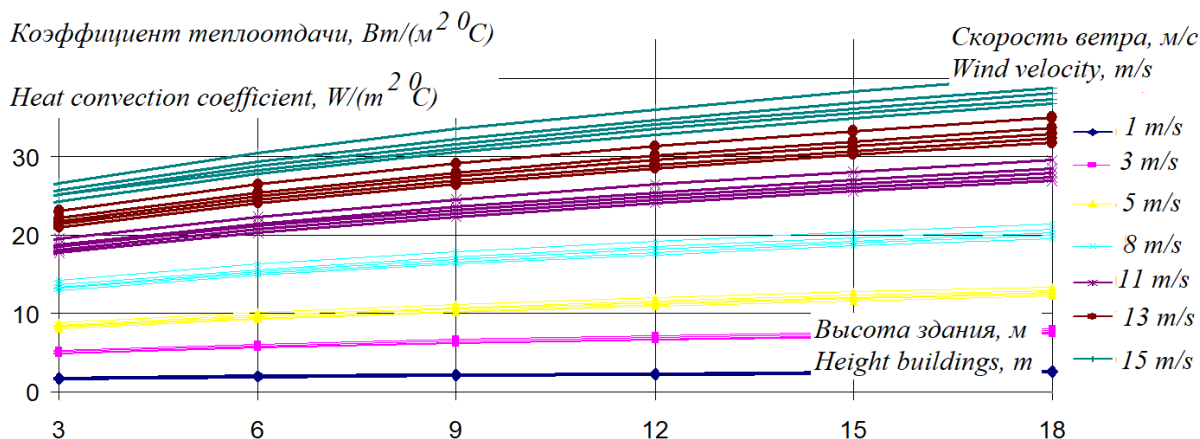


Рис. 8. Изменение коэффициентов теплоотдачи в зависимости от скорости ветра по высоте при различных температурах.

Fig. 8. Change in heat convection coefficients depending on the wind speed in height at different temperatures.

Коэффициенты теплоотдачи определены для температуры наружного воздуха 5 °С, -5 °С, 0 °С, -10 °С, -20 °С.

Из графика следует, что чем ниже температура и скорость, тем больше влияние температуры наружного воздуха, рис. 8. Анализ зависимости коэффициента теплоотдачи показал, что при высоте здания более 18 м необходимо учитывать не только влияние скорости ветра, но и температуры (рис. 10).

На рис. 11 показана зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса. Согласно расчетам режим движения воздуха турбулентный.

Как видно из рис. 11, можно получить зависимость коэффициента теплоотдачи на боковой стороне здания от критерия Рейнольдса, т.е., в конечном счете, от изменения параметров наружного климата

$$\bar{\alpha}_{Re} = -6 \cdot 10^{-15} \cdot Re^2 + 10^{-6} \cdot Re + 0.848 \cdot U_0$$

Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры наружного воздуха следует рассматривать на высоте более 15 м от поверхности земли, в этом случае по температуре

$$\bar{\alpha}_{t_{out}} = \bar{\alpha}_{av}(-0,0038 \cdot t_{out} + 0.9772)$$

по числу Re

$$\bar{\alpha}_{Re} = \bar{\alpha}_{av}(2 \cdot 10^{-8} \cdot Re + 0.4173)$$

Полученная зависимость имеет простой вид, физически обоснована и подтверждается имеющимися результатами других исследователей. Ее можно использовать для оценки энергопотребления, оценки класса энергоэффективности зданий, разработки и оценки мероприятий по энергосбережению в зависимости от параметров наружного климата.

$$\bar{k} = k \cdot (-5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{out}^2 - 0.0046 \cdot t_{out} + 0.9776)$$

На основании полученных результатов рассчитаны коэффициенты теплопередачи оконной конструкции с использованием описанного выше подхода (рис. 12- рис.17).

Как видно из графика, на коэффициент теплоотдачи существенное влияние оказывает скорость ветра, но и зона натекания. Коэффициент теплоотдачи в градиентной области на высоте 6 м изменяется от 1.82 Вт/(м²·°С) до 2.8 Вт/(м²·°С), в зоне торможения от 2.05 Вт/(м²·°С) to 2.83 Вт/(м²·°С), на боковой поверхности 1.15 Вт/(м²·°С) до 2.64 Вт/(м²·°С). Таким образом, скорость ветра оказывает существенное влияние на тепловой режим помещения, в случае использования усредненных значений происходит недогрев или перегрев

помещения, в любом случае это приводит к увеличению энергозатрат.

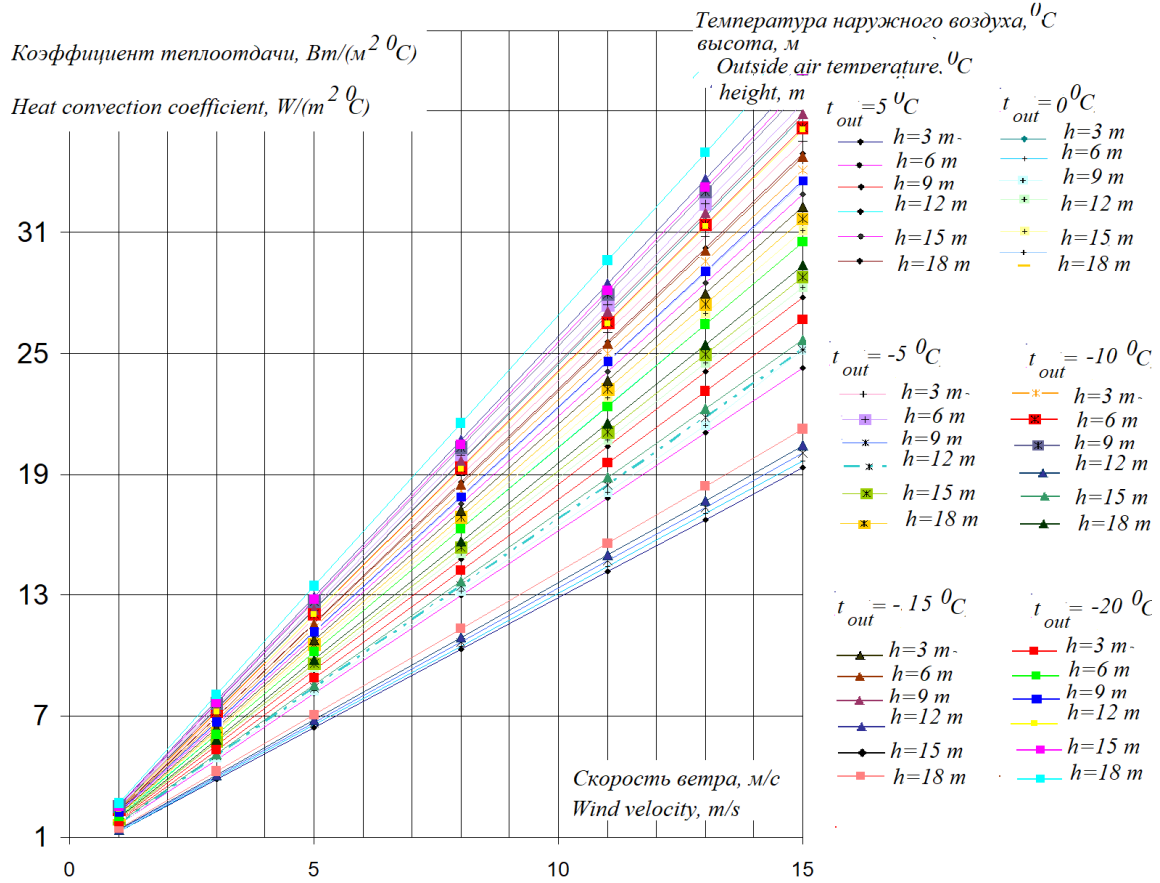


Рис. 9. Коэффициенты теплоотдачи в зависимости от скорости и температуры на высоте от 3 м до 21 м.

Fig. 9. The heat convection coefficient depending on the speed and temperature at a height of 3 m to 21 m.

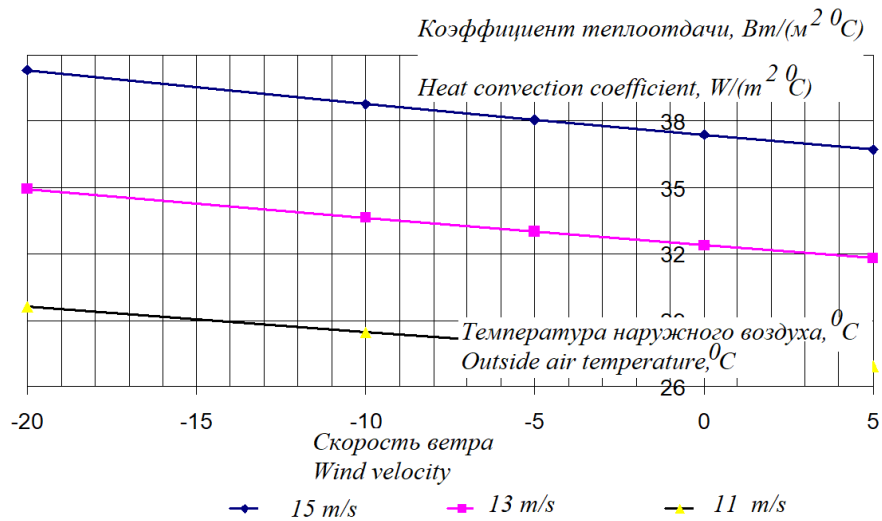


Рис 10. Коэффициенты теплоотдачи в зависимости от температуры на высоте 18 м.
Fig. 10. Heat convection coefficient depending on the temperature at a height of 18 m.

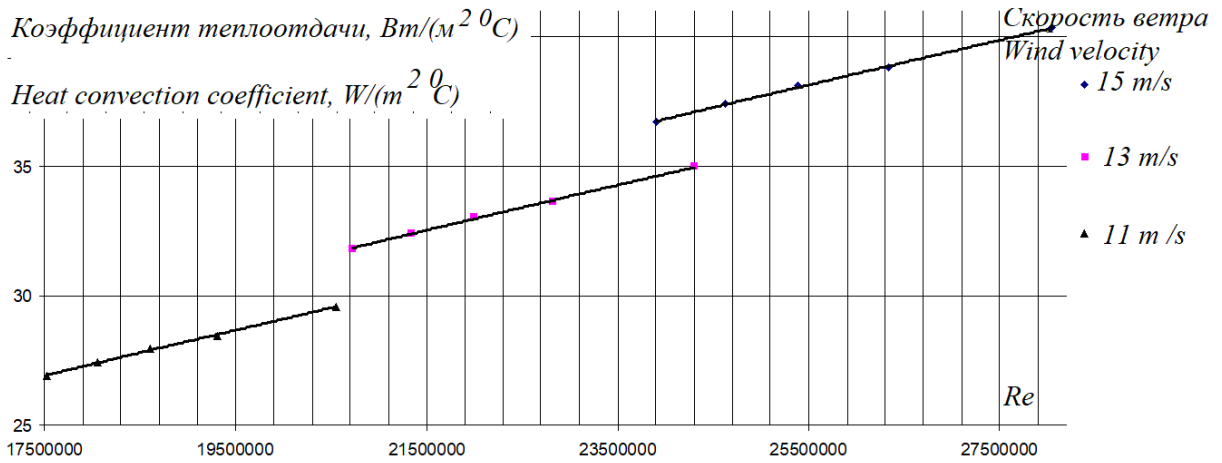


Рис. 11. Коэффициенты теплоотдачи на боковой ячейке в зависимости от критерия Re .
 Fig. 11. The heat convection coefficient on the side cell depending on criterion Re .

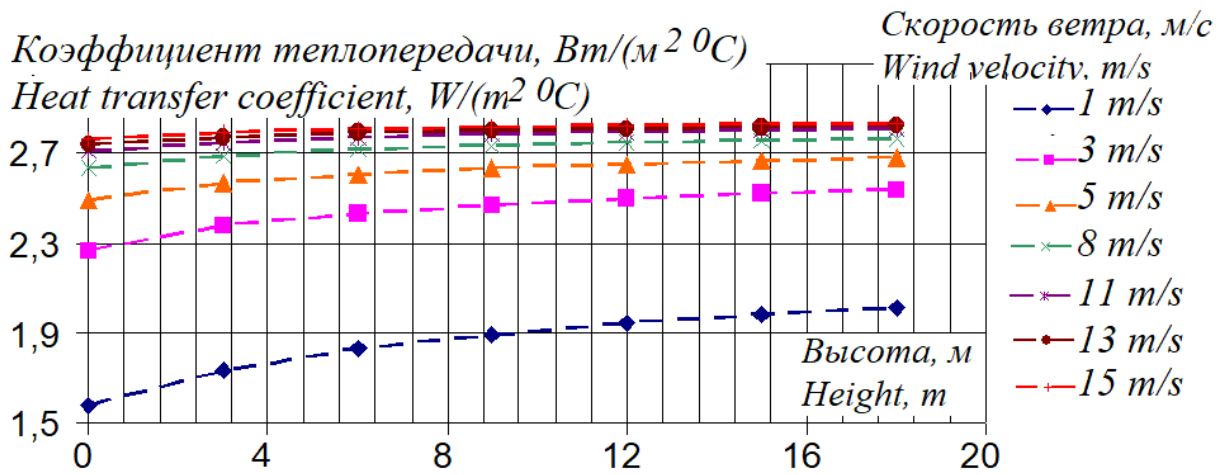


Рис. 12. Коэффициент теплопередачи окна в градиентной области.
 Fig. 12. . The heat transfer coefficient of the window in the gradient area.

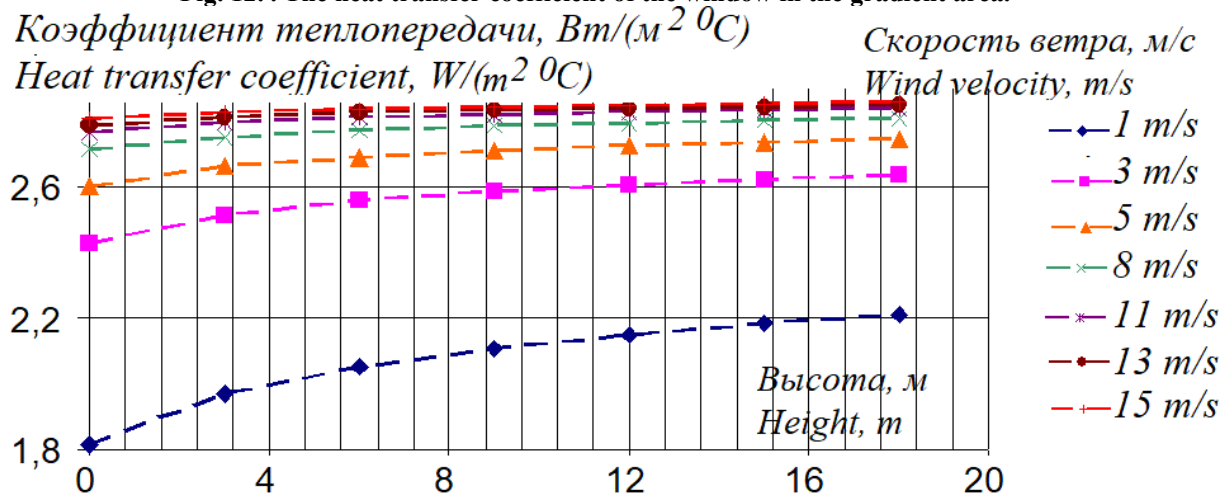


Рис. 13. Коэффициент теплопередачи окна в области торможения.
 Fig. 13. . The heat transfer coefficient of the window in the deceleration area.

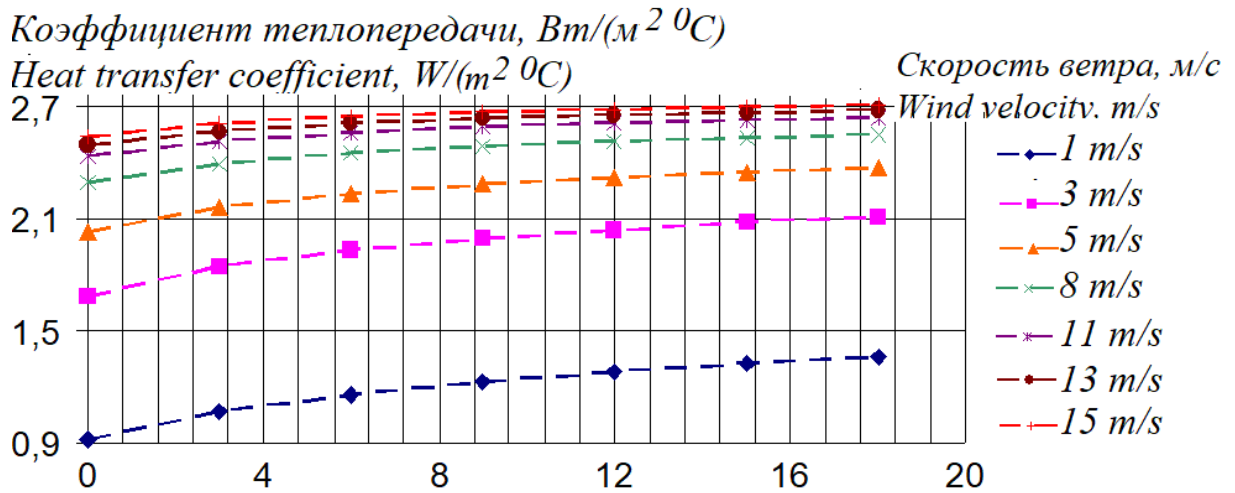


Рис. 14. Коэффициент теплопередачи окна на боковой стороне здания.
Fig. 14. . The heat transfer coefficient of the window on the side.

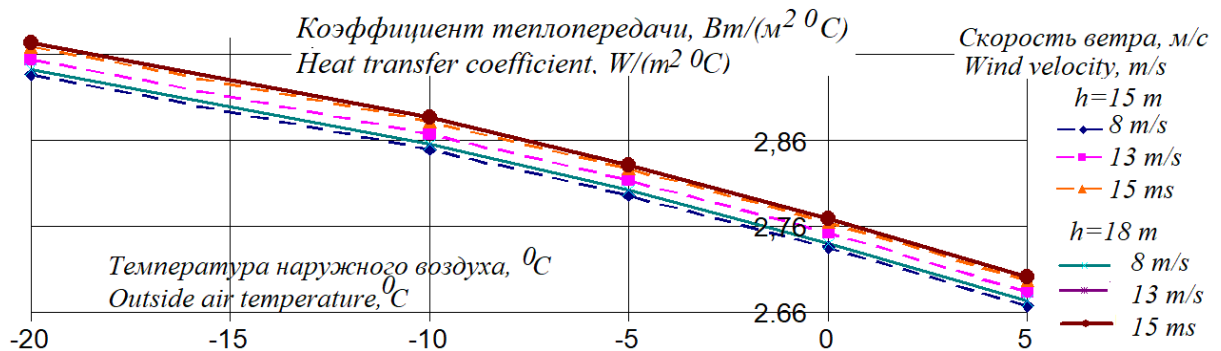


Рис. 15. Коэффициент теплопередачи в градиентной области с учетом изменения температуры наружного воздуха.
Fig. 15. The heat transfer coefficient in the gradient area considering changes in outdoor temperature of the window.

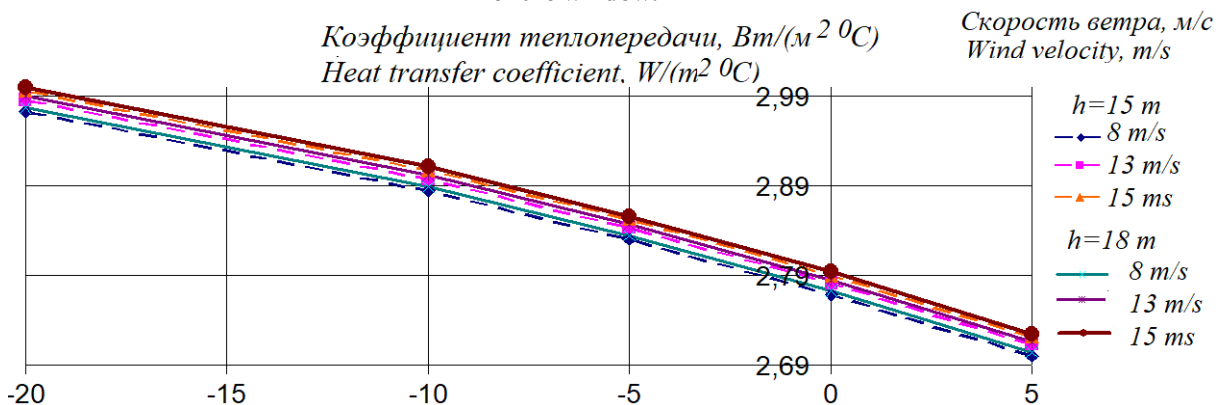


Рис. 16. Коэффициент теплопередачи в области торможения с учетом изменения температуры наружного воздуха.
Fig. 16. The heat transfer coefficient in the deceleration area considering changes in outdoor temperature of the window.

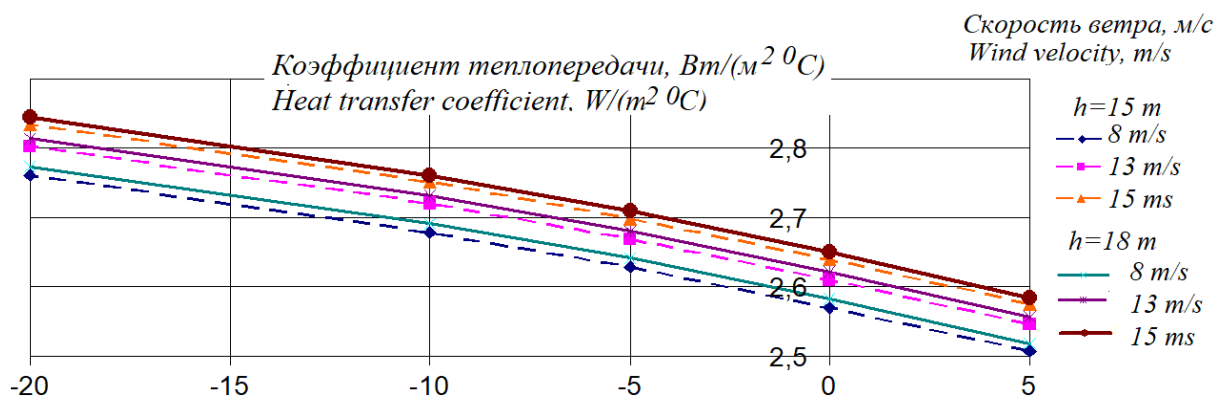


Рис. 17. Коэффициент теплопередачи на боковой стороне здания с учетом изменения температуры наружного воздуха

Fig. 17. The heat transfer coefficient on the side considering changes in outdoor temperature of the window.

Для учета всех параметров наружного климата необходимо корректировать коэффициент теплопередачи в зависимости от метеопараметров.

В результате исследований установлено, что с наветренной стороны здания на высоте более 15 м от поверхности земли, при скорости воздуха 11 м/с и температуре наружного воздуха 10 °С в зоне торможения коэффициент теплоотдачи 2.9 Вт/(м²·°С), в градиентной области 2.8 Вт/(м²·°С), на боковой 2.6 Вт/(м²·°С). Согласно представленным зависимостям при скоростях ветра до 5 м/с этажность здания имеет слабое влияние на коэффициент теплопередачи. При этом корректировку коэффициентов теплоотдачи по температуре наружного воздуха рекомендуется делать для зданий более 15 м от поверхности земли.

ВЫВОДЫ

Получены эмпирические зависимости для определения теплозащитных свойств современных светопрозрачных конструкций от текущих параметров наружного воздуха. Зависимость имеет простой вид, физически обоснована и подтверждается имеющимися результатами других исследователей. Ее можно использовать для более точной оценки годового энергопотребления зданий и оценки энергосбережения, в случае использования современных стеклопакетов.

Представленные эмпирические зависимости коэффициента теплопередачи от скорости ветра и температуры наружного воздуха позволяют оценить теплозащитные качества оконных конструкций в процессе

эксплуатации с учетом изменения внешних и внутренних возмущений.

Как следует из полученных в работе результатов, коэффициенты теплопередачи в зависимости от стороны здания различаются на 15-20 %, что существенно, так как потери тепла через светопрозрачные конструкции составляют 55-65 % от суммарных [29].

Теплофизические параметры оконных конструкций оказывают существенное влияние не только на микроклимат помещений, но и на долговечность зданий, поэтому так важно их корректное определение.

Библиография (References)

- [1] Energy audit and potential energy saving in an office building in riyadh, saudi arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 21(2), 65-74. doi:10.1016/S1018-3639(18)30510-5
- [2] Bolharova, N., Ruchynskiy, M., Skochko, V., & Lesko, V. . Infographic modeling of heat exchange of energy-efficient building. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations*, June 2020, (pp.555-569). doi:10.1007/978-3-030-42939-3_55
- [3] Energy Efficient Building Design, ISBN 978-3-030-40670-7, A-M. Dabija (Ed.), 281 p., Springer Nature Switzerland AG, April 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40671-4>
- [4] Davydenko L., Davydenko N., Deja A., Wi'snicki B., Dzhuguryan T. Efficient Energy Management for the Smart Sustainable City Multifloor Manufacturing Clusters: A Formalization of the Water Supply System Operation Conditions Based on Monitoring Water Consumption Profiles. *Energies* 2023, 16, 4519, p.p. 1-25. DOI:10.3390/en16114519

- [5] Tian, G., Fan, Y., Gao, M., Wang, H., Zheng, H., Liu, J., Liu C. Indoor thermal environment of thin membrane structure buildings. A review. *Energy and Buildings*, Volume 234, 1 March 2021, 110704. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820334903?via%3Dihub>. doi:10.1016/j.enbuild.2020.110704 (2021).
- [6] Wang, Z., Tian, Q., and Jia, J. The convective heat transfer performance and structural optimization of the cavity in energy-saving thermal insulation windows under cold air penetration condition. *Energies*, 15. 2481, pp. 2-23. Doi:10.3390/en15072481 (2022).
- [7] Li, L., Zhang, C., Xu, X., Yu, J., Wang, F., Gang, W., and Wang, J. "Simulation study of a dual-cavity window with gravity-driven cooling mechanism." *Building Simulation* 15(7): 1339-1352 (2022). DOI:10.1007/s12273-021-0848-x
- [8] ISO 10077:2017 "Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance."
- [9] Manju, M., Nagarajan, R. V., Satheesh Kumar, P., and Jeganathan, M. Determination of heat resistant in building structures. A case study. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 11(2), 2020, pp. 94-105. doi:10.34218/IJARET.11.2.2020.011
- [10] Kirankumar, G., Saboor, S., Vali, S. S., Mahapatra, D., Talanki Puttaranga Setty, A. B., and Kim, K. Thermal and cost analysis of various air filled double glazed reflective windows for energy efficient buildings. *Journal of Building Engineering* 28, 2020. Doi:10.1016/j.jobe.2019.101055.
- [11] Pourghorban, A., Asoodeh, H. The impacts of advanced glazing units on annual performance of the trombe wall systems in cold climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51(3):101983 (2022). doi:10.1016/j.seta.2022.101983.
- [12] Thalfeldt, M., Pikas, E., Kurnitski, J., Voll, H. Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. *Energy and Buildings* 67: 309-321 (2013). doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.027.
- [13] Baiburina A.Kh., Rybakova M.M., Vatinb N.I. Heat loss through the window frames of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. 85(1). Pp. 3-14 Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/heat-loss-through-the-window-frames-of-buildings/viewer>
- [14] Jorge Luis Aguilar-Santana, Hasila Jarimi, Mariana Velasco-Carrasco and Saffa Riffat Review on window-glazing technologies and future prospects. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020, 15, pp.112-120. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2020, 15, 112-120.
- [15] Mohasseb, S., and Ghazanfari, N. "Advanced techniques for the design of zero energy buildings." *Advanced techniques for the design of zero energy buildings* (2021).
- [16] Sala Lizarraga, J. M. P., and Picallo-Perez, A. Exergy analysis and thermoeconomics of buildings. *Design and analysis for sustainable energy systems*. 1st Edition - September 27, 2019. Doi:10.1016/C2018-0-01196-2.
- [17] Wendt, U. *Engineering materials and their properties*, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2021. Doi:10.1007/978-3-030-47035-7_8
- [18] Strobach, E., Bhatia, B., Zhao, L., and Wang, E. N. Thermal performance of high-efficiency window technologies. *Annual Review of Heat Transfer*, V.2, January 2019. Doi:10.1615/ANNUALREVHEATTRANSFER.2019030886
- [19] Wright J.L. A correlation to quantify convective heat transfer between vertical window glazings // *ASHRAE Trans.* 1996. vol. 102, pp.940-946.
- [20] Korpela S.A., Lee Y., Drummond J.E. Heat transfer through a double pane window. *J. Heat Transfer*, 1982. V.104. pp. 539-544.
- [21] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th Edition, December 2018, 992 p. ISBN: 978-1-119-35388-1.
- [22] Tao, Y., Zhang, H., Yan, Y., Tu, J., & Shi, L. CFD analysis of environmental impacts on a thermochromic smart window. *Energy and Buildings*, Volume 263, 2022, 112027. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112027.
- [23] Брдлик П.М., Савин В.К.Т Теплообмен между осесимметричной струей и пластиной расположенной нормально к потоку//ИФЖ. - Т. 8, №2.-1965. - С.145-155.
- [24] Sogin H.H., Burkhard., Richardson P. D. Heat Transfer in Separated Flow/*Part I: Preliminary Experiments on Heat Transfer from an Infinite. Blurt Plate to an Air Stream, ARL 4, Brown University*, Jan 1961 - 132-140 P.P.
- [25] Daniels K. The Technology of Ecological Building. - *Birkhauser*. - 1997.- 89 p
- [26] Jensen M. and Franck N. Model-Scale Tests in Turbulent Wind: Part I, Phenomena Dependent on the Wind Speed: Shelter at Houses - *Dispersal of Smoke. Copenhagen: The Danish Technical Press* - 1963- p.102.
- [27] Gandemer J. Wind Environment Around Building. // *Aerodynamic Concept in proceeding of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. - London. - 1975. - P.423-432.
- [28] Isyumov N., Davenport A. G. The Group Level Wind Environment in Build-Up Areas //In Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effect on Building and

Structures. - London: Cambridge Univ.Press. - 1976. - P. 403-422.

- [29] Zhu, M., Diao, R., Fu, J., Jiang, X., and Zhang, Y. Study on the influence of key parameters of exterior window structure on building energy saving effect. Paper presented at the IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science 675, 2021. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/675/1/012051/pdf>. Doi:10.1088/1755-1315/675/1/012051

Информация об авторах



**Малыренко
Виталий
Андреевич,** Доктор
технических наук,
профессор. Область
научных интересов: анализ
состояния и повышения
эффективности
энергоустановок, разработка
теоретических основ
теплофизики зданий и
энергосбережения, создания
современной концепции
развития ЖКХ. E-mail:
vitaliy.malyarenko@kname.edu.ua



**Орлова
Наталья
Александровна,** кандидат
технических наук,
старший научный
сотрудник. Область
научных интересов:
моделирование
процессов теплообмена
на наружных
конструкциях, разработка
новых подходов по
определению уровня
энергопотребления для
разработки методологий
энергосбережения. E-
mail: naorl@ukr.net



**Алехина
Викторовна,** Светлана
доктор
технических наук,
старший научный
сотрудник. Область
научных интересов: разработка
научных основ в сфере
энергетики,
усовершенствование научных
основ энергоэффективности
элементов энергетического
оборудования. E-mail:
svitlana.alyokhina@technikum-wien.at

Energy-Efficient Modes of Dehydration of Pome Fruits during Microwave Treatment in Combination with Convection

Popescu V., Vișanu V., Balan M., Melenciuc M., Volconovici O., Balan T.

Technical University of Moldova

Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The aim of the work is to significantly increase the efficiency of the dehydrating process of fruits with seeds, by treating it with microwaves in combination with convection. To achieve the purpose, an electrical installation was designed, produced, tested, optimized and implemented, which applies the combined technological treatment method in the dehydration process. Pears were selected as the object of the research in particular, because currently the production of these seeded fruits is not fully exploited, but they are of an increased interest for the agricultural producers and for specialized enterprises, and their dehydration by the methods currently used is difficult, especially because of the browning effect that occurs in the heat treatment process. The essential results obtained based on the research carried out, regarding the application of the elaborated installation, are: reduction of electricity consumption and treatment duration, increase in productivity and quality of dehydrated fruits. At the same time, the developed installation is simple in construction, has low cost and is easy to use, and during fruit processing it allows strict monitoring of the technological parameters, and researches demonstrated a high level of safety in operation. The significance of the obtained results lies in the solution to a series of problems, which are currently faced by the enterprises specialized in fruit processing, in particular by significantly increasing the efficiency of the process of dehydration of pears, based on the proposed method of combined treatment, predominantly with increasing the speed of dehydration, energy efficiency, quality of final products and profitability.

Keywords: electrical installation, dehydration process, fruit with seeds, energy efficiency, microwave, convection.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.09>

UDC: 664.8.047.38:634.25

Regimurile energoeficiente de deshidratare a fructelor cu semințe prin tratarea cu microunde în combinație cu convecția

Popescu V., Vișanu V., Balan M., Melenciuc M., Volconovici O., Balan T.

Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul lucrării constă în determinarea regimurilor eficienți ai procesului de deshidratare a fructelor cu semințe, prin tratarea cu microunde în combinație cu convecția. Pentru atingerea scopului propus, a fost proiectată, elaborată, testată, optimizată și implementată o instalație electrică, care aplică în procesul de deshidratare, anume procedeul de tratare tehnologică, care combină microundele și convecția. Au fost selectate în calitate de obiect al cercetărilor în mod special perele, deoarece, actualmente, producția de aceste fructe semințoase nu este valorificată pe deplin, dar ele totuși prezintă un interes sporit pentru producătorii agricoli și pentru întreprinderile din industria de procesare, iar deshidratarea lor prin metodele utilizate în prezent este dificilă, îndeosebi din cauza efectului de brunificare, care apare frecvent în procesul de tratare termică. Rezultatele esențiale obținute în baza cercetărilor realizate, privind aplicarea instalației elaborate la deshidratare perelor, sunt: reducerea consumului de energie electrică și a duratei de tratare termică, creșterea productivității și a calității fructelor deshidratate. Instalația elaborată este simplă din punct vedere constructiv, are cost redus și este ușor de utilizat, iar la procesarea fructelor permite monitorizarea strictă a parametrilor tehnologici și pe durata cercetărilor a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare. Semnificația rezultatelor obținute constă în soluționarea la o serie de probleme, cu care se confruntă actualmente întreprinderile specializate în prelucrarea fructelor, în deosebi privind creșterea semnificativă a eficienței procesului de deshidratare a perelor, în baza procedeului propus de tratare combinată, preponderent cu sporirea vitezei de deshidratare, a eficienței energetice, a calității produselor finite și a rentabilității.

Cuvinte-cheie: instalație electrică, proces de deshidratare, fructe cu semințe, eficiență energetică, microunde, convecție.

Энергоэффективные режимы обезвоживания семечковых плодов при обработке СВЧ в сочетании с конвекцией**Попеску В., Вишану В., Балан М., Меленчук М., Волконович О., Балан Т.**

Технический университет Молдовы

Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Целью данной работы является значительное повышение эффективности процесса обезвоживания плодов с семенами, путем обработки их микроволнами в сочетании с конвекцией. Для достижения поставленной цели была спроектирована, разработана, испытана, оптимизирована и внедрена электроустановка, применяемая в процессе обезвоживания фруктов, а именно метод технологической обработки, сочетающий микроволны и конвекцию. В качестве объекта исследования были выбраны именно груши, так как, на данный момент, производство этих семечковых плодов освоено не в полной мере, но они по-прежнему представляют повышенный интерес для сельхозпроизводителей и для специализированных предприятий в области перерабатывающей промышленности фруктов, и их сушка используемыми в настоящее время способами затруднена и проблематична из-за неблагоприятных эффектов, которые часто возникают в процессе термической обработки, особенно эффекта потемнения, который неизбежно возникает в процессе. Существенными результатами, полученными на основе проведенных исследований по применению разработанной установки для сушки груши, являются: снижение энергозатрат и продолжительности термической обработки, повышение производительности и качества сушеных плодов. При этом разработанная установка проста с конструктивной точки зрения, имеет невысокую стоимость и удобна в эксплуатации, а при переработке плодов позволяет строго контролировать технологические параметры и в ходе исследований показала высокий уровень безопасности при использовании. Значимость результатов, полученных на основе проведенных исследований, заключается в решении ряда насущных проблем, с которыми в настоящее время сталкиваются специализированные предприятия в области переработки фруктов, особенно в части значительного повышения эффективности процесса обезвоживания плодов с семенами, на основе предлагаемого метода обработки путем сочетания микроволн и конвекции, что в основном повышает скорость обезвоживания, энергоэффективность, качество готовой продукции и рентабельность.

Ключевые слова: электроустановка, процесс обезвоживания, фрукты с семенами, энергоэффективность, микроволны, конвекция.

Introducere

În prezent, instalațiile de deshidratare a produselor agricole sunt bazate pe tehnologii cu eficiență scăzută, care necesită în prim plan un timp îndelungat pentru tratarea termică.

Acest fapt influențează negativ asupra calității produselor finite și contribuie nemijlocit la sporirea consumului de energie electrică. Astfel, pentru eficientizarea procesului de deshidratare, este nevoie ca în cadrul întreprinderilor specializate din domeniul industriei de procesare a produselor agricole, de implementat instalații bazate pe noi metode de prelucrare tehnologică [4-8, 12-14, 21-24, 28, 37].

Trebuie de menționat faptul că perfecționarea instalațiilor de procesare, tot timpul a fost în vizorul cercetătorilor din domeniu, atât din țară cât și din străinătate, iar problemele țintite mereu au fost creșterea productivității, a calității produselor finite, a eficienței energetice, a simplității constructive, a siguranței de funcționare a utilajului, etc.

Toate aceste probleme descrise au rămas încă nesoluționate definitiv și sunt și în prezent abordate în multe exemple de studiu și în

literatura de specialitate [10-12, 17-22, 29-33, 35-36]

Problemele menționate se evidențiază în cazul deshidratării în rondele a fructelor semănțoase cu conținut bogat în fier, cum sunt și perele, deoarece viteza redusă și durata mare a procesului, în baza metodelor de tratare aplicate la moment, provoacă efecte adverse, cum este brunificarea, preponderent cu oxidarea stratului superficial și reducerea calității produselor finite [2-5, 23-27, 30-34].

După cum remarcă mulți savanți din domeniu respectiv, creșterea vitezei de deshidratare și reducerea duratei procesului de prelucrare tehnologică, nemijlocit împiedică apariția efectelor adverse, care afectează calitatea produselor finite [1-3, 7-9, 11-13, 15-18].

Studiile efectuate până acum nu au evaluat în mod suficient eficiența procesului, privind performanțele sau avantajele și dezavantajele uscării fructelor semănțoase în rondele, cu combinarea convecției și a microundelor, cu atât mai mult nu a fost abordat exemplul perelor, care sunt extrem de sensibile, atât la procesul de prelucrare, cât și cel de păstrare. Îndeosebi nu sunt studiate particularitățile de procesare tehnologică

a acestor fructe prin metoda propusă și nu sunt stabilite regimurile eficiente de tratare, cu indicarea parametrilor tehnologici optimali pentru asigurarea calității rondelor de fructe prelucrate [26-29, 32-36].

În primul rând, cercetările realizate până la moment, au scos în evidență unele contradicții cu referire la indicatorii de calitate a rondelor de fructe uscate prin diverse metode. Unii cercetători afirmă că fructele deshidratate prin convecție au calitate mai ridicată față de cele procesate prin tratarea cu microunde, însă alții remarcă că la convecție predomină frecvent efectele adverse precum carbonizarea, în cazul creșterii temperaturii pentru sporirea vitezei procesului și pentru reducerea efectului de oxidare a substratului, iar la microunde procesul de deshidratare la viteze mari se transformă în preferbere [22-24, 31-34]. Din acest punct de vedere nu se asigură indicatorii de calitate, conform cerințelor impuse de piață și necesitățile consumatorilor cu referire la proprietățile organoleptice corespunzătoare pentru comercializare și consum, cum ar fi: aspectul rondelor, culoare, miros și gust.

Astfel, după cum remarcă mulți savanți din domeniu respectiv, creșterea eficienței procesului de deshidratare a fructelor, poate fi realizată numai prin studii ample, din punct de vedere cantitativ și calitativ, în vederea eficientizării procesului, ceea ce ar permite evitarea efectelor adverse, sporind astfel calitatea produselor finite [14-18, 30-32, 34-36].

Așadar, cercetările realizate în cazul acestei lucrări au fost focusate spre atingerea scopului de identificare a soluțiilor cu privire la sporirea eficienței procesului de deshidratare a diferitor specii de fructe sensibile și cu dificultăți la prelucrare, cum sunt ca exemplu perele în cazul respectiv, selectate ca obiect de cercetare în acest studiu. Pentru atingerea acestui scop a fost proiectată, elaborată, testată și implementată o instalație experimentală pentru uscarea perelor în runde, cu aplicarea tratării prin combinarea microundelor și a convecției, în baza căreia au fost realizate cercetările și au fost stabilite regimurile optime de tratare tehnologică.

Instalația experimentală a fost elaborată ca rezultat al colaborării dintre cercetătorii din cadrul Departamentelor Inginerie electrică, Ingineria fabricației și Inginerie mecanică, a Universității Tehnice a Moldovei, preocupați de problemele descrise în realizarea cercetărilor comune în direcția identificării soluțiilor privind eficientizarea procesului de deshidratare a

fructelor cu sensibilitate mare și cu dificultăți la procesare.

Cercetările au fost realizate pe exemplul mai multor specii pomicole de fructe seminoase, însă preocupările principale, după cum s-a evidențiat, au fost axate pe exemplul perelor, deoarece aceste fructe la moment prezintă interes și după cum s-a menționat, sunt mult mai sensibile la prelucrare, iar în procesul de deshidratare prin metodele aplicate tradițional, apar inevitabil efecte adverse care reduc considerabil calitatea, cum este ca exemplu frecvent anume efectul de brunificare.

Rezultatele obținute în baza instalației elaborate, au demonstrat că, aplicarea metodei propuse cu combinarea convecției și a microundelor la deshidratarea perelor în runde, permite: creșterea vitezei deshidratării, micșorarea timpului de prelucrare tehnologică, sporirea eficienței energetice, creșterea calității rondelor de fructe ca produse finite și reducerea costurilor de procesare.

Atingerea acestor rezultate a fost posibilă prin sporirea eficienței procesului de tratare tehnologică, cu majorarea ratei de evacuare a umidității din produs în timpul tratării termice, prin intensificarea aportului de încălzire a produsului, atât din interior, cât și din exterior, prin aplicarea tratării cu microunde în combinație cu convecția. Acest fapt a permis de a crește esențial viteza deshidratării și de a reduce semnificativ durata prelucrării termice, cu asigurarea temperaturii și încălzirii uniforme în fiecare punct al zonei de tratare și prevenirea efectelor adverse.

Mai mult decât atât, instalația propusă de autori este simplă constructiv, are cost redus și se utilizează ușor.

Totodată, instalația permite monitorizarea riguroasă a parametrilor tehnologici ai procesului, iar pe parcursul cercetărilor realizate, atât în condiții de laborator, cât și în condiții reale la implementarea în cadrul unei întreprinderi specializate din domeniul, a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare.

Astfel, se poate de evidențiat faptul, că rezultatele obținute în baza cercetărilor efectuate, au contribuit nemijlocit la soluționarea unor probleme actuale stringente, cu care se confruntă întreprinderile din domeniul industriei produselor agricole, prin sporirea eficienței procesului de deshidratare în runde a fructelor de specii pomicole sensibile cum sunt perele, preponderent cu creșterea eficienței energetice, micșorarea

cheltuielilor de procesare și creșterea calității produselor finite.

MATERIALE ȘI METODE

În această lucrare, metodologia de cercetare este bazată pe metode standard de analiză și studiu.

Inițial, seriile de experimente realizate la primele etape ale cercetărilor, au fost efectuate în condiții de laborator, iar ulterior au fost continuate în condiții reale, în cadrul unei întreprinderi specializate, pentru a estima eficiența instalației elaborate privind implementarea ei în practică.

Așadar, seriile de experimente privind cercetarea procesului de deshidratare au fost realizate în baza instalației experimentale elaborate, care este prezentată în figura 1.

Această instalație experimentală elaborată de autori, oferă posibilitatea de a cerceta procesul de deshidratare a fructelor atât după metoda clasică, cât și după metoda propusă – cu aplicarea tratării prin combinarea microundelor și a convecției.

Pentru a monitoriza toți parametrii tehnologici caracteristici procesului de deshidratare a fructelor semințoase, la instalația elaborată este prevăzută conexiunea la calculator, care aplică softul specializat IgiCOM&UTDryer-V.2.0.2, pentru înregistrarea și prelucrarea datelor experimentale.



1 - blocul convectiv; 2 - blocul de microunde.

Figura 1. Instalația experimentală elaborată pentru cercetarea procesului de deshidratare a fructelor cu semințe.

1 - the convective block; 2 - the microwave block.

Fig. 1. The experimental plant developed for the research of the process of dehydration of fruits with seeds.

Astfel, calculatorul conectat la instalație, recepționează și prelucrează informația primită de la traductoarele instalației, care monitorizează parametrii procesului tehnologic.

În calitate de obiect al cercetărilor au fost selectate anume perele, deoarece după cum s-a menționat, aceste fructe semințoase sunt extrem de sensibile la procesul de deshidratare, cauzând apariția efectelor adverse cum este brunificarea, iar la momentul actual ele prezintă interes pentru mulți producători agricoli și pentru întreprinderile specializate din domeniul industriei prelucrătoare.

La efectuarea experimentelor, perele supuse deshidratării au fost tăiate în runde cu diverse grosimi în diapazonul 2-10 mm și au fost deshidratate pentru comparație, atât după metoda clasică, cât și după metoda propusă – cu aplicarea tratării prin combinarea microundelor și a convecției, iar fructele au fost supuse procesului de deshidratare de la valoarea maximală inițială de $89 \pm 0,5\%$, până la cea finală minimală de $19\% \pm 0,5\%$, stabilită ca optimală pentru păstrare și comercializare.

Așadar, pentru fiecare metodă examinată, au fost urmăriți următorii parametri: viteza deshidratării, timpul de procesare tehnologică, consumul de energie electrică și calitatea produselor finite.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Astfel, în baza experimentelor realizate, s-a constatat că, pentru a crește viteza deshidratării și pentru a reduce durata prelucrării fructelor, este necesar de a spori rata de evacuare a umidității din produs în timpul procesării tehnologice. Acest fapt s-a dovedit de a fi posibil doar prin intensificarea aportului de încălzire a produsului, atât din interior, cât și din exterior, iar acest mecanism a fost posibil numai prin aplicarea tratării cu microunde în combinație cu convecția.

Astfel, pentru stabilirea parametrilor tehnologici optimali ai procesului cu eficiență maximă, s-a examinat procesul de deshidratare a perelor cu aplicarea metodei clasice și a celei propuse, realizându-se multiple serii de experimente repetate, efectuate pentru: diferite regimuri de temperatură ale aerului în diapazonul 30-90°C, diferite viteze ale aerului în diapazonul

0,5-3,0 m/s, diferite grosimi ale rondelilor în diapazonul 2-10 mm și diferite regimuri ale microundelor 50-500 W.

În timpul experimentelor realizate, s-a evidențiat faptul, că, eficiența prelucrării și calitatea produselor finite sunt într-o strânsă dependență de viteza deshidratării și durata procesării, care la rândul lor depind de procedeul de deshidratare aplicat și de intensitatea parametrilor tehnologici.

Așadar, în figura 2 se prezintă, curbele de viteză a deshidratării prin metoda clasică, pentru perele cu grosimea optimă a rondelilor stabilită de 4 mm, la viteza optimă a aerului de 2,0 m/s, pentru 5 regimuri de temperatură selectate pentru exemplificare – 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, din seria celor examinate.

Astfel, analizând cinetica deshidratării perelor prin metoda clasică, pentru diferite regimuri de temperatură, s-a observat o reducere uniformă a umidității în timp, iar durata deshidratării de la valoarea maximală inițială până la cea finală optimă, variază în funcție de regimul de temperatură examinat.

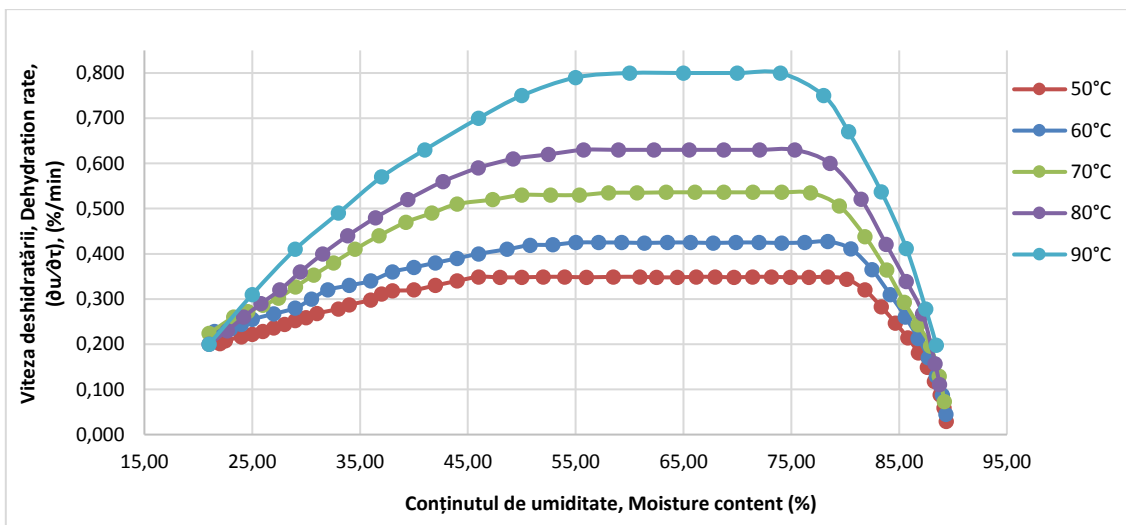


Figura 2. Curbele de viteză a deshidratării prin metoda clasică.
Fig. 2. Dehydration velocity curves by the classical method.

Ca exemplu, pentru grosimea optimă a rondelii stabilită de 4 mm s-a observat că: pentru regimul termic de 50°C – durata deshidratării este de 259 minute, pentru regimul cu intensitatea de 60°C – durata deshidratării este de 216 minute, pentru regimul de 70°C – durata este 173 minute, pentru 80°C – durata este 152 minute și respectiv

pentru regimul cu intensitatea maximă de 90°C – durata deshidratării este 108 minute.

În baza studiilor de cinetică realizate, s-a evidențiat faptul că durata deshidratării este invers proporțională cu intensitatea regimului termic și variază în limitele 108 minute și 259 minute.

În camera temperatura este uniformă. Mai mult ca atât, s-a observat că la viteze mici de

deshidratare pentru regimurile cu intensitate redusă și darata mai mare a procesării termice, apar efecte adverse evidente de brunificare, iar la creșterea vitezei deshidratării cu scopul de a combate efectul de brunificare, pentru regimurile cu intensitate sporită și cu durată mai mică de prelucrare, apar defecte pronunțate de carbonizare a stratului superficial al produsului și astfel nici un regim nu s-a evidențiat ca fiind eficient din punct de vedere a calității finale obținute, însă, se poate de menționat că rezultate mai satisfăcătoare obținându-se pentru regimul de 60°C.

Așadar, s-a confirmat că, la majorarea temperaturii pentru creșterea vitezei procesului și pentru evitarea efectului de brunificare, apare ca rezultat alt efect advers precum carbonizarea stratului superficial, fapt ce înrăutățește semnificativ calitatea produsului final.

Totodată, analizând procesul de uscare cu diferite viteze ale aerului în diapazonul 0,5-3,0 m/s, s-a confirmat că, odată cu creșterea vitezei aerului, crește și viteza de deshidratare, însă valoarea optimă a vitezei aerului pentru deshidratarea eficientă, constituie 2,0 m/s, pentru că la viteze mai mari, are loc scăderea calității produselor prin deformarea rondelilor și totodată se reduce eficiența energetică a procesului, din cauza intensificării evacuării energiei termice din

camera de uscare odată cu evacuarea umidității din produse.

Examinând procesul de uscare pentru diferite grosimi ale rondelilor în diapazonul 2-10 mm, s-a confirmat că, cu cât grosimea rondelilor este mai redusă, crește viteza deshidratării și se reduce timpul de prelucrare tehnologică, însă grosimea optimă s-a dovedit a fi cea de 4 mm, pentru că la grosimea mai mică, are loc reducerea calității produselor și apariția reacțiilor adverse, precum preuscarea și carbonizarea stratului superficial.

Pentru identificarea soluțiilor privind ameliorarea problemelor mai sus menționate, la următoarele etape ale cercetărilor realizate, s-a examinat cinetica deshidratării perelor, cu aplicarea metodei propuse de tratare cu microunde în combinație cu convecția.

Așadar, în figura 3 se prezintă, ca exemplu, curbele de viteză a deshidratării perelor, cu aplicarea metodei propuse, pentru 5 regimuri selectate pentru exemplificare – 180W, 225W, 270W, 315W, 360W, din seria celor examinate în diapazonul 50-500W.

Ceilalți parametri tehnologici stabiliți ai procesului cu eficiența maximă în cazul dat au constituit: viteza optimă a aerului 2,0 m/s, temperatura optimă a aerului 60°C, grosimea optimă a rondelilor de 4 mm.

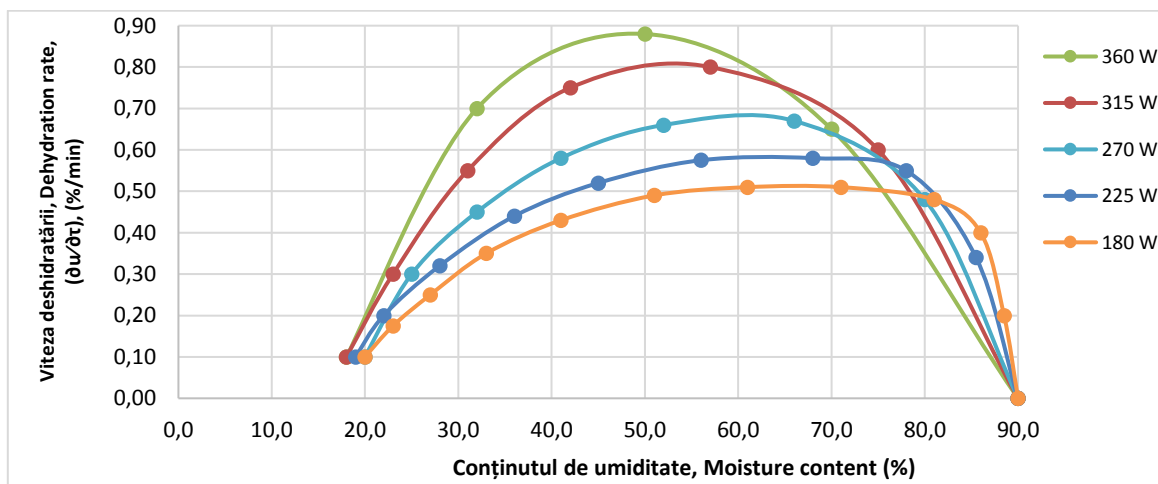


Figura 3. Curbele de viteză a deshidratării prin metoda propusă.
Fig. 3. Dehydration velocity curves by the proposed method.

Astfel, examinând cinetica deshidratării în baza metodei noi, s-a constatat că, durata deshidratării perelor de la umiditatea inițială de 89 ± 0,5%, până la cea finală de 19 ± 0,5%, depinde de regimul tehnologic de tratare în felul următor: pentru 360W – durata deshidratării este de 72

minute, pentru 315W – este 113 minute, pentru 270W – 152 minute, pentru 225W – este de 194 minute, iar pentru 180W - durata deshidratării este de 251 minute.

Așadar, la deshidratarea prin tratarea cu microunde în combinație cu convecția, conform

studiilor de cinetică realizate, s-a evidențiat faptul că durata deshidratării este invers proporțională cu intensitatea regimului și variază în diapazonul 72 și 251 de minute, fiind semnificativ mai mică față de metoda clasică, datorită sporirii vitezei deshidratării prin metoda propusă.

S-a observat că, la intensificarea regimului de tătare pentru creșterea vitezei procesului apar efecte adverse precum preferbarea și modificarea structurii poroase, fapt ce înrăutățește calitatea produsului final, iar regimul optim al microundelor pentru prelucrarea eficientă s-a stabilit că este 315 W.

Astfel, în urma realizării a mai multor serii de experimente și examinând mai multe regimuri pentru ambele metode de tratare, s-au stabilit regimurile cu eficiență maximală și parametrii tehnologici optimali ai procesului: grosimea optimală a rondelilor – 4 mm, viteza optimală a aerului – 2,0 m/s, temperatura optimală – 60°C, puterea optimală a microundelor – 315 W, durata optimală de procesare – 113 minute.

Mai mult decât atât, comparând consumul de energie electrică la deshidratarea perelor prin ambele metode examinate în baza instalației elaborate, s-a stabilit experimental, că, utilizând metoda clasică la uscarea probelor de fructe de la umiditatea inițială de $89 \pm 0,5\%$, până la cea finală de $19 \pm 0,5\%$, pentru regimul cu eficiență maximă (cu grosimea optimală a rondelilor de 4 mm, la o viteză optimală a aerului de 2,0 m/s și la temperatura optimală de 60°C), consumul de energie electrică este cu circa 37% mai mare ca și în cazul uscării acelorași probe similare, cu aplicarea metodei de tratare propuse, pentru parametrii optimali stabiliți ai regimului cu eficiența maximă (grosimea optimală a rondelilor

– 4 mm, viteza optimală a aerului – 2,0 m/s, temperatura optimală – 60°C, puterea optimală a microundelor – 315 W).

Consumul mai redus de energie electrică, în cazul metodei propuse pentru uscarea fructelor, a fost confirmat de toate experimentele realizate și se datorează eficientizării procesului de tratare termică, cu sporirea ratei de evacuare a umidității din produs în timpul procesării tehnologice și prin intensificarea aportului de încălzire a produsului, atât din interior, cât și din exterior, datorită aplicării tratării cu microunde în combinație cu convecția.

Totodată, pentru analiza comparativă a calității produselor finite, perele deshidratate prin ambele metode cercetate, au fost examinate din punct de vedere a indicatorilor de calitate și a proprietăților organoleptice.

Așadar, probele de pere deshidratate, atât prin metoda clasică cât și prin metoda propusă, au fost examinate în prim plan, din punct de vedere al proprietăților organoleptice principale, ca: forma și suprafața produselor finite, culoarea, mirosul și gustul perelor procesate.

Astfel, ca exemplu, în figura 4, se prezintă analiza comparativă a probelor de pere deshidratate prin ambele metode examinate: metoda clasică (a) și metoda propusă – cu combinarea microundelor și a convecției (b).

Așadar, examinând multiple probe de produse finite, s-a constatat că, metoda propusă sporește calitatea perelor deshidratate în raport cu metoda clasică, cu ameliorarea îndeosebi a proprietăților organoleptice principale, ca: culoarea produselor finite, forma, suprafața, mirosul și gustul.



a) Probă procesată prin metoda clasică.
a) Sample processed by the classic method.



b) Probă procesată prin metoda propusă.
b) Sample processed by the proposed method.

Figura 4. Analiza comparativă a produselor finale procesate prin ambele metode examinate.

Fig. 4. Comparative analysis of final products processed by both methods examined.

În baza rezultatele obținute în acest studiu s-a constatat că, utilizarea instalației elaborate la deshidratarea perelor cu aplicarea tratării cu

microunde în combinație cu convecția, reduce gradul de oxidare a stratului superficial a rondelilor, deoarece crește viteza procesului și

reduce durata de prelucrare termică, contribuind la creșterea productivității și a calității produselor procesate.

Totodată, după cum s-a evidențiat, tehnologia propusă permite reducerea consumului de energie electrică cu circa 37% față de tehnologia clasică, fapt ce oferă posibilitatea de a micșora costurile de procesare.

Reducerea consumului de energie electrică, la procesarea prin metoda propusă, în raport cu aplicarea metodei clasice, se datorează faptului că, în procesul de prelucrare tehnologică, aportul convecției la prelucrarea termică este suplinit cu aportul microundelor, fapt ce sporește eficiența procesului, iar prelucrarea necesită un timp mai mic pentru atingerea umidității finale.

Aceasta are loc grație faptului că, anume prelucrarea rondelelor sub acțiunea combinată a agenților de tratare termică, permite esențial eficientizarea procesului tehnologic, cu sporirea gradului de intensificare a deshidratării, ceea ce contribuie nemijlocit la creșterea vitezei și reducerea duratei procesului.

Mai mult decât atât, instalația propusă de autori pentru deshidratarea fructelor, este simplă constructiv și este ușor de utilizat, are cost redus și permite realizarea monitorizării riguroase a parametrilor tehnologici ai procesului de deshidratare, iar pe durata experimentelor realizate, atât în condiții de laborator, cât și în condiții reale de exploatare în cadrul unei întreprinderi specializate din domeniul deshidratării fructelor a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare.

CONCLUZII

Rezultatele cercetărilor efectuate au demonstrat că instalația elaborată pentru deshidratarea fructelor semințoase cu aplicarea tratării cu microunde în combinație cu convecția, permite eficientizarea procesului tehnologic cu creșterea vitezei deshidratării și reducerea duratei de procesare.

Totodată, tehnologia propusă permite creșterea calității produselor procesate în comparație cu tehnologia clasică și în afară de aceasta, instalația elaborată este simplă constructiv, este ușor de utilizat, are cost redus și permite monitorizarea strictă a parametrilor tehnologici ai procesului de deshidratare, iar pe durata experimentelor realizate atât în condiții de laborator cât și în condiții reale de exploatare în cadrul unei întreprinderi specializate în deshidratarea fructelor, a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare.

Așadar, datorită eficientizării procesului de deshidratare, cu sporirea vitezei de deshidratare și reducerea duratei de prelucrare tehnologică, consumul de energie electrică la uscarea fructelor cu aplicarea metodei propuse, este cu circa 37% mai mic față de cel al metodei clasice, iar acest fapt permite reducerea semnificativă a cheltuielilor de prelucrare tehnologică și a costului produselor procesate.

BIBLIOGRAFIE (REFERENCES)

- [1] Zhu H., Zhou Z., Yang R., Yu A. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, nr. 13, pp. 3378–3396, doi: 10.1016.2006.12.089.
- [2] Esposito B., Sessa M., Sica D., Malandrino O. Towards Circular Economy in the Agri-Food Sector. *Sustainability*, 2020, vol. 12, nr. 18, pp. 95–107, doi: 10.3390/su12187401.
- [3] Panzella L., Moccia F., Nasti R., Marzorati S., Verotta L., Napolitano A., Bioactive Phenolic Compounds From Agri-Food Wastes. *Frontiers in Nutrition*, 2020, vol. 7, pp. 60–68, doi: 10.3389/fnut.2020.00060.
- [4] Jajcevic D., Siegmann E., Radeke C., Khinast J. Large-scale CFD–DEM simulations of fluidized granular systems. *Chemical Engineering Science*, 2013, vol. 98, pp. 298–310.
- [5] Doymaz I. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 2007, nr. 78, pp. 1291–1297.
- [6] Horabik J., Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials. *Biosystems Engineering*, 2016, vol. 147, pp. 206–225. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017.
- [7] Pagotto M., Halog A. Towards a Circular Economy in Australian Agri-food Industry. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, vol. 20, nr. 5, pp. 1176–1186, doi: 10.1111/jiec.12373.
- [8] Doymaz I. Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, 47, pp. 914–919.
- [9] Oliveira S., Brandão T., Silva C. Influence of drying processes and pretreatments on nutritional and bioactive characteristics of dried vegetables: a review. *Food Engineering Reviews*, 2016, vol. 8, nr. 2, pp. 134–163.
- [10] Paiva T., Ribeiro M., Coutinho P. Collaboration, Competitiveness Development, and Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2020, vol. 6, nr. 4, pp. 416–424, doi: 10.3390/joitmc6040116.
- [11] Singh K. Development of a small capacity dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 1994, nr. 21, pp. 19–30.
- [12] Feng H., Tang J., Cavalieri R. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples:

- Effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature. *Drying Technology: An International Journal*, 1999, nr. 17, pp. 1981–1998.
- [13] Scram J., Hall D., Stuckey D. Bioethanol from grapes in the European community. *Biomass and Bioenergy*, 1993, vol. 5, nr. 5, pp. 347–358, doi: 10.1016/0961-9534(93)90014.
- [14] Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 2010, nr. 98, pp. 461–470.
- [15] Ranjbaran M., Zare D. Simulation of energetic and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*, 2013, vol. 59, pp. 484–493, doi: 10.1016/j.energy.2013.06.057.
- [16] Daud W. Fluidized Bed Dryers — Recent Advances. *Advanced Powder Technology*, 2008, vol. 19, nr. 5, pp. 403–418, doi: 10.1016/S0921-8831(08)60909-7.
- [17] Chou S., Chua K. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, vol. 12, p. 359–369, Bucharest, doi: 10.1016/S0924-2244(01)00102-9.
- [18] Haseeb M., Zandi G., Hartani H., Pahi M., Nadeem S. Environmental Analysis of the Effect of Population Growth Rate on Supply Chain Performance and Economic Growth of Indonesia. *Ekoloji*, 2019, vol. 28, nr. 107, pp. 417–426.
- [19] Kaya A., Aydin O., Demirtaş C. Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering*, 2007, nr. 96, pp. 517–524.
- [20] Jittanit W., Srzednicki G., Driscoll R., Seed Drying in Fluidized and Spouted Bed Dryers. *Drying Technology*, 2010, vol. 28, nr. 10, pp. 1213–1219, doi: 10.1080/07373937.2010.483048.
- [21] Tsuji Y., Kawaguchi T., Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. *Powder Technology*, 1993, vol. 77, nr. 1, pp. 79–87, doi: 10.1016/0032-5910(93)85010-7.
- [22] Roberts J., Kidd D., Padilla-Zakour o. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 89, nr. 4, pp. 460–465, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030.
- [23] Ozbek B., Dadali G. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 2007, nr. 83, pp. 541–549.
- [24] Kaya A., Aydin O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 2009, nr. 50, pp. 118–124.
- [25] Kahyaoglu L., Sahin, S., Sumnu, G. Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat. *Food and Bioproducts Processing*, 2012, nr. 90, pp. 301–308.
- [26] Ranjbaran M., Emadi B., Zare D. Simulation of Deep-Bed Paddy Drying Process and Performance. *Drying Technology*, 2014, vol. 32, pp. 919–934, doi: 10.1080/07373937.2013.875561.
- [27] Sharma Y., Mangla S., Patil p., Liu S., When challenges impede the process: For circular economy-driven sustainability practices in food supply chain. *Management Decision*, 2019, vol. 57, nr. 4, pp. 995–1017, doi: 10.1108/MD-09-2018-1056.
- [28] Jin G., Zhang M., Fang Z., Cui Z., Song C. Numerical Investigation on Effect of Food Particle Mass on Spout Elevation of a Gas–Particle Spout Fluidized Bed in a Microwave–Vacuum Dryer. *Drying Technology*, 2015, vol. 33, nr. 5, pp. 591–604, doi: 10.1080/07373937.2014.965317.
- [29] Castrica M., Rebucci R., Giromini C., Tretola M., Cattaneo D., Baldi A. Total phenolic content and antioxidant capacity of agri-food waste and by-products. *Italian Journal of Animal Science*, 2019, vol. 18, nr. 1, pp. 336–341, doi: 10.1080/1828051X.2018.1529544.
- [30] Lane W., Storlie C., Montgomery C., Ryan E. Numerical modeling and uncertainty quantification of a bubbling fluidized bed with immersed horizontal tubes. *Powder Technology*, 2014, vol. 253, pp. 733–743, doi: 10.1016.2013.11.037.
- [31] Doymaz I. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering*, 2006, nr.76, pp. 212–217.
- [32] Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22, nr. 15, pp. 1763–1775, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00079-0.
- [33] Goksu E., Sumnu G., Esin A. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *Journal of Food Engineering*, 2005, nr. 66, pp. 463–468.
- [34] Pagotto M., Halog A. Towards a Circular Economy in Australian Agri-food Industry. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, vol. 20, nr. 5, pp. 1176–1186, doi: 10.1111/jiec.12373.
- [35] Matsen J., Hovmand S., Davidson J. Expansion of fluidized beds in slug flow. *Chemical Engineering Science*, 1969, vol. 24, nr. 12, pp. 1743–1754, doi: 10.1016/0009-2509(69)87018-1.
- [36] Lane W., Storlie C., Montgomery C., Ryan E. Numerical modeling and uncertainty quantification of a bubbling fluidized bed with immersed horizontal tubes. *Powder Technology*, 2014, vol. 253, pp. 733–743, doi: 10.1016.2013.11.037.
- [37] Ozbek B., Dadali G. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 2007, nr. 83, pp. 541–549.
- [38] Jing Sun, Wenlong Wang, Qinyan Yue. Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies. *Materials*, 2016, pp. 231. DOI: 10.3390/ma904023
- [39] Meda V., Orsat V., Raghavan V. Microwave heating and the dielectric properties of foods. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, 2017, pp. 23–43.

[40] Radha Raman Mishra, Apurbba Kumar Sharma. Microwave–material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, February 2016, vol. 81, pp. 78–97.

[41] Nguyen TVL., Nguyen PBD., Tran TTV., Tran B.L., Huynh TP. Low-Temperature Microwave-Assisted Drying of Sliced Bitter Melon: Drying

Kinetics and Rehydration Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, vol. 45, no. 12. doi: 10.1111/jfpe.14177.

Date despre autori:



Popescu Victor Serghei.

Doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Facultatea Energetică și Inginerie electrică, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie identificarea soluțiilor de asigurare a fiabilității sistemelor electrice și perfecționarea electrotehnologiilor din sectorul agroindustrial.

E-mail:

victor.popescu@ie.utm.md



Vișanu Vitali Valeriu.

Doctorand, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie identificarea căilor de asigurare a fiabilității utilajelor și perfecționarea tehnologiilor și instalațiilor de prelucrare primară și păstrare a produselor agroalimentare de origine vegetală.

E-mail:

vitali.visanu@pmai.utm.md



Balan Mihail Mihail.

Doctor în științe inginerești, lector, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie perfecționarea tehnologiilor și utilajelor de prelucrare primară a produselor agroalimentare cu aplicarea metodelor inovative de procesare.

E-mail:

mihail.balan@pmai.utm.md



Melenciuc Mihail Gheorghe.

Doctorand, lector, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie perfecționarea și eficientizarea tehnologiilor și utilajelor de prelucrare și păstrare a produselor agroalimentare de origine vegetală.

E-mail:

mihail.melenciuc@pmai.utm.md

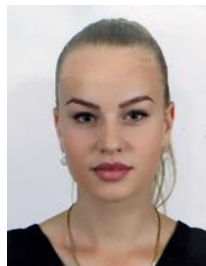


Volconovici Onorin Liviu.

Doctorand, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie perfecționarea tehnologiilor și utilajelor de prelucrare primară și păstrare a produselor agricole.

E-mail:

onorin.volconovici@if.utm.md



Balan Tatiana Victor.

Doctorand, Universitatea Tehnică a Moldovei. Domeniul de activitate științifică îl constituie eficientizarea proceselor din industria agroalimentară și auditul întreprinderilor de procesare și păstrare a produselor agricole.

E-mail:

tatiana.balan@ie.utm.md

Development of a New Approach to the Problem of Detecting the Integrity Violations of a Digital Image

Bobok I., Kobozeva A.

Odesa Polytechnic National University
Odesa, Ukraine

Abstract. The energy sector is an integral part of the critical infrastructure of any state and is particularly sensitive to the quality of information security systems. Due to the diversity of activities of various organizations in the energy industry, almost all threats to information security are relevant to them, in particular, unauthorized changes in information content. The aim of the work is to develop the new approach to the examination of the integrity of images, which will provide the possibility of building universal methods for detecting its violations, effective regardless of the strength and type of influences that change them. The aim was achieved by: introducing the concept of “frequency index” for the singular vector of the image matrix, and study of the properties of the dependence of the frequency index of a singular vector on its number. The most important result of the work is the almost constant rate of increase the trend of the studied function, which results in the linearity of the frequency index of singular vectors for digital images, the integrity of which is not violated. This characteristic is sensitive to any changes in the image matrix. The significance of the obtained result lies in the fact that the use of the established properties for the function of the dependence of the frequency index of singular vectors on its number makes it possible to develop universal integrity examination methods that are effective regardless of the strength and type of disturbances that violated the integrity of the image.

Keywords: digital image, integrity violation, singular vector, frequency index, sensitivity.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.10>

UDC: 004.056

Elaborarea unei noi abordări a problemei detectării unei încălcări a integrității unei imagini digitale

Bobok I., Kobozeva A.

Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Odesa, Ucraina

Rezumat. Sectorul energetic este o parte integrantă a infrastructurii critice a oricărui stat și este deosebit de sensibil la calitatea sistemelor de securitate a informațiilor. Datorită diversității activităților diferitelor organizații din industria energetică, aproape toate amenințările la adresa securității informațiilor sunt relevante pentru acestea, în special modificările neautorizate ale conținutului informațiilor. În această lucrare, imaginile digitale sunt considerate conținut informațional. Metodele experte devin extrem de relevante astăzi, a căror eficacitate nu depinde de specificul influenței perturbatoare utilizate, inclusiv de puterea acesteia. Cu toate acestea, metodele universale sunt practic absente în domeniul activității experților, ceea ce se datorează complexității semnificative a sarcinii în sine și lipsei unei baze matematice universale. Scopul lucrării este de a elabora o nouă abordare a examinării integrității imaginilor, care să ofere posibilitatea construirii unor metode universale de detectare a încălcărilor acesteia, eficiente indiferent de puterea și tipul de influențe care le modifică. Scopul a fost atins prin: introducerea conceptului de „indice de frecvență” pentru vectorul singular al matricei imaginii și studiul proprietăților dependenței indicelui de frecvență al unui vector singular de numărul acestuia. Cel mai important rezultat al lucrării este rata aproape constantă de creștere a tendinței funcției studiate, ceea ce are ca rezultat liniaritatea indicelui de frecvență al vectorilor singulari pentru imagini digitale, a căror integritate nu este încălcată. Această caracteristică este sensibilă la orice modificări ale matricei imaginii. Semnificația rezultatului obținut constă în faptul că utilizarea proprietăților stabilite pentru funcția de dependență a indicelui de frecvență al vectorilor singulari de numărul acestuia face posibilă elaborarea unor metode universale de examinare a integrității care sunt eficiente indiferent de puterea și tipul de tulburări care au încălcat integritatea imaginii.

Cuvinte-cheie: imagine digitală, încălcarea integrității, vector singular, indice de frecvență, sensibilitate.

Разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности цифрового изображения

Бобок И.И., Кобозева А.А.

Национальный университет «Одесская политехника», Одесса, Украина

Аннотация. Энергетическая сфера - составная часть критической инфраструктуры любого государства, является особенно чувствительной к качеству систем защиты информации. В связи с разнообразием деятельности различных организаций энергетической отрасли для них актуальны практически все угрозы информационной безопасности, в частности несанкционированные изменения информационных контентов, в качестве которых в работе рассматриваются цифровые изображения. Критически актуальными на сегодняшний день становятся экспертные методы, эффективность которых не зависит от конкретики использованного возмущающего воздействия, в том числе его силы – универсальные методы, которые практически отсутствуют в поле деятельности экспертов, что связано со значительной сложностью самой задачи, отсутствием универсального математического базиса. Целью работы является разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности изображений, который обеспечит возможность построения универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида изменяющих изображения воздействий. Поставленная цель была достигнута путем решения следующих задач: выбора для сингулярного вектора матрицы изображения такого количественного параметра – частоты, который дает возможность учета поведения всех сингулярных векторов при экспертизе целостности изображения; исследования свойств функции зависимости частоты сингулярного вектора от его номера. Наиболее важным результатом работы является установленная в ходе исследования практически постоянная скорость возрастания тренда упомянутой функции, следствием чего является линейность частоты сингулярных векторов для цифровых изображений, целостность которых не нарушена. Данная характеристика является чувствительной к любым изменениям матрицы изображения. Значимость полученного результата заключается в том, что использование установленных свойств для функции зависимости частоты сингулярных векторов от его номера позволяет разработать универсальные методы экспертизы целостности, эффективные, независимо от силы и вида возмущающих воздействий, повлекших нарушение целостности изображения.

Ключевые слова: цифровое изображение, нарушение целостности изображения, сингулярный вектор, частота, чувствительность.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из главных, наиболее дорогих результатов человеческой деятельности во всех ее сферах является информация, а задача защиты информации от несанкционированного доступа, несанкционированного изменения становится все более сложной, критически важной [1,2]. Очевидно, что энергетическая сфера – составная часть критической инфраструктуры любого государства, является особенно чувствительной к качеству систем защиты информации, высокая цена ошибки заставляет подходить к вопросам защиты данных здесь с максимальной ответственностью. В связи с разнообразием деятельности различных организаций энергетической отрасли для них актуальны практически все угрозы информационной безопасности, в частности несанкционированные изменения информационных контентов, своевременное выявление которых в таких компаниях является жизненной необходимостью.

Одним из самых распространенных способов представления информации в современном мире является цифровое изображение (ЦИ). Существующие и разрабатываемые программные средства, используемые сегодня в процессе изменения ЦИ, становятся все более совершенными, такими, для выявления результатов которых имеющийся арсенал экспертных методов является недостаточным [3-5]. Нарушение целостности ЦИ, в качестве которого в работе рассматривается любое изменение его матрицы, может происходить в результате различных возмущающих воздействий: наложения шума, фильтрации, сжатия с потерями, стеганообразования и т.д., которые оставляют свои «уникальные отпечатки» на оригинальном изображении.

Вопросы, касающиеся экспертизы целостности ЦИ, активно решаются сегодня учеными. Все экспертные методы принято разделять на две группы: активные, требующие информацию об оригинальном ЦИ, использующие, как правило, электронную цифровую подпись или цифровые водяные знаки, и пассивные

(«слепые»), для которых информация об оригинальном изображении не нужна [6,7]. На сегодняшний день именно пассивные экспертные методы занимают приоритетные позиции [5,7]. При этом, в свою очередь, в зависимости от информации, которая присутствует у эксперта, их можно разделить на направленные (настроенные на конкретные возмущающие воздействия, учитывающие особенности, свойства возмущений, которые является результатом таких воздействий) и универсальные (настроенные на выявления наличия отличий исследуемого контента от оригинального независимо от того, каким образом эти изменения были получены). Направленные методы, как правило, являются более эффективными при выявлении того действия, на которое они настроены, чем универсальные в тех же условиях применения. Однако на практике очень часто основной является задача отделения оригинального ЦИ от такого, целостность которого нарушена, без определения конкретного источника, способа изменения изображения. Так для возможности использования ЦИ в судебных расследованиях в качестве вещественных доказательств, в средствах массовой информации для формирования общественного мнения и т.д. критическим является вопрос оригинальности ЦИ, установления факта отсутствия какой-либо его обработки. Кроме того, при осуществлении экспертизы целостности ЦИ эксперт, как правило, не имеет достоверной информации о характере, силе, конкретике возмущающего воздействия (ВВ), которому оно подверглось. И даже наличие такой информации, с учетом бесконечного многообразия различных возмущающих воздействий, но конечности имеющихся экспертных (программных, аппаратных) средств, на практике не гарантирует наличие у эксперта такого средства, которое будет ориентировано на выявления результатов конкретного произошедшего воздействия. Все вышеизложенное говорит о критической актуальности на сегодняшний день экспертных методов, способных эффективно выявлять нарушение целостности изображения независимо от специфики примененного ВВ, зафиксировать результат несоответствия параметров измененного ЦИ их состоянию для оригинального

изображения – универсальных методов. И хотя разработки в этом направлении ведутся [8], при этом чаще всего – в пределах стеганоанализа [9,10], на сегодняшний день универсальные методы выявления нарушений целостности ЦИ практически отсутствуют, что объясняется крайней сложностью задачи их разработки, особенно обеспечения их эффективности в условиях незначительных изменений контента, а усилия ученых чаще всего все же направлены на выявление результатов конкретных возмущающих воздействий, поиска их «уникальных отпечатков» [11-13]. Так, в [14] предложен экспертный метод, ориентированный на выявление результатов наложения на ЦИ мультипликативного шума – часто используемого возмущающего воздействия при неавторизованных изменениях изображения. Метод основан на анализе высокочастотных коэффициентов дискретного косинусного преобразования блоков, полученных в результате стандартного разбиения матрицы изображения [15], а именно, на анализе разности между максимальным и минимальным значениями таких коэффициентов. Алгоритмическая реализация метода подтверждает его высокую эффективность, но условия его применения ограничены мультипликативным шумом. Экспертный метод, разработанный в [16], ориентирован на выявление результатов применения к ЦИ шума Перлина, который широко используется для создания таких визуальных эффектов, как дым, облака, туман, огонь и т. д. Метод, предложенный в [17], направлен на выявление искусственного повышения резкости изображения путем анализа близких пар цветов и является недееспособным в случае другого ВВ. Существует целый ряд методов, которые применяются для экспертизы ЦИ в формате *Jpeg*, основанных на выявлении «эффекта двойного квантования», который возникает в гистограммах частотных коэффициентов изображения при первоначальном и повторном его сохранении в *Jpeg*. Данные методы имеют сегодня значительное распространение в силу широкого использования этого формата для хранения ЦИ [18,19], но очевидно, что ориентированность на формат *Jpeg*, а также зависимость их эффективности от соотношения коэффициентов качества

первичного и повторного сжатия с потерями значительно ограничивает область применения таких методов для экспертизы целостности и не дает возможности отнести их к группе универсальных.

Одним из немногочисленных существующих сегодня эффективных универсальных методов выявления нарушения целостности ЦИ является метод, разработанный в [8]. Основой метода является доказанное для большинства $l \times l$ -блоков оригинального ЦИ, полученных стандартным разбиением его матрицы, соотношение:

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^\circ, e_1), \quad (1)$$

где u_1, v_1 – ортонормированные левый и правый сингулярные векторы (СНВ) блока, которые соответствуют его наибольшему сингулярному числу σ_1 ; $\bar{\sigma} = \sigma / \|\sigma\|$, где $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$ – сингулярные числа (СНЧ) блока; $\|\sigma\|$ – норма вектора σ ;

$$n^\circ = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l \quad (2)$$

– n -оптимальный вектор пространства R^l , $\angle(u_1, \bar{\sigma})$, $\angle(v_1, \bar{\sigma})$, $\angle(n^\circ, e_1)$ – величины углов между векторами u_1 и $\bar{\sigma}$, v_1 и $\bar{\sigma}$, n° и вектором стандартного базиса $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$ пространства R^l соответственно. Соотношение (1) нарушается для ЦИ, не являющихся оригинальными. Предложенный метод хорошо зарекомендовал себя при выявлении результатов различных возмущающих воздействий (наложение шума, фильтрация, размытие и т.д.), в том числе и в качестве стеганоаналитического. Однако в случаях возмущающего воздействия незначительной силы эффективность метода существенно снижается, что оставляет актуальной задачу поиска и разработки новых подходов, новых математических решений проблемы выявления нарушений целостности ЦИ, дееспособных независимо от конкретики и силы ВВ.

Целью настоящей работы является разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности ЦИ,

который обеспечит возможность построения универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида возмущающего воздействия.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Универсальность искомого подхода обязана базироваться на универсальности математического представления нарушения целостности ЦИ, свободного от ориентированности/необходимости учета каких-либо особенностей того или иного ВВ. С учетом этого результат любого изменения изображения с $n \times n$ -матрицей F будем представлять в виде:

$$\bar{F} = F + \Delta F, \quad (3)$$

где $\bar{F}, \Delta F$ – $n \times n$ -матрицы измененного ЦИ и возмущающего воздействия соответственно, при этом количественной оценкой силы ВВ выступает норма матрицы ΔF : $\|\Delta F\|$. Необходимо отметить, что рассмотрение в качестве формального представления ЦИ одной матрицы F никак не ограничивает общность последующих рассуждений: в случае цветного изображения в качестве F может выступать произвольная цветовая составляющая (схема RGB) либо матрица яркости (схема YUV).

Пусть

$$F = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (4)$$

– однозначно определяемое нормальное сингулярное разложение F [20], где U, V – ортогональные $n \times n$ -матрицы, столбцы которых $u_i, v_i, i = \overline{1, n}$, – левые и правые СНВ F соответственно, при этом левые СНВ дополнительно являются лексикографически положительными [20]; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ – СНЧ F ; правая часть (4) дает представление сингулярного разложения в форме внешних произведений. Нарушение целостности ЦИ приведет к возмущениям как СНЧ, так и СНВ матрицы F . Ранее авторами показано, что результат любого изменения ЦИ может быть формально представлен в виде совокупности возмущений СНВ и СНЧ его матрицы, а в качестве характеристик возмущающего воздействия могут

рассматриваются характерные свойства полученных возмущений СНЧ и СНВ; установлено соответствие между сингулярными тройками $(\sigma_i, u_i, v_i), i = \overline{1, n}$, матрицы ЦИ, определяющими матрицы единичного ранга $\sigma_i u_i v_i^T$ (4), и его частотными составляющими: тройки, отвечающие максимальным/средним/минимальным СНЧ несут, главным образом, информацию о низкочастотных/среднечастотных/высокочастотных составляющих ЦИ, имея различные свойства, в частности, различную чувствительность к возмущающим воздействиям, в пределах одной матрицы. При этом чувствительность тройки (σ_i, u_i, v_i) (матрицы $\sigma_i u_i v_i^T$) определяется чувствительностью входящих в нее СНВ, поскольку все СНЧ являются Хорошо обусловленными [21]. Чувствительность, определяющая степень реакции любой системы на ВВ, является одной из ключевых характеристик формальных параметров для задачи, рассматриваемой в работе. Однако чувствительность СНВ в пределах одной матрицы является характеристикой, не контролируемой систематически, поскольку для СНВ u_i определяется соотношением [21]:

$$\sin 2\theta_i \leq 2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F), \quad (5)$$

где θ_i – угол поворота u_i в результате возмущающего воздействия ΔF (3), $\text{svdgap}(i, F) = \min_{i \neq j} |\sigma_i - \sigma_j|$ – отделенность СНЧ σ_i . Действительно, соотношение (5) дает практически ценную оценку сверху для угла θ_i только тогда, когда его правая часть меньше либо равна 1. В противном случае поведение вектора u_i после атаки непредсказуемо, что иллюстрирует рис.1 (заметим, при очень незначительном ВВ), где красным цветом выделена часть графика, отвечающая СНВ, для которых $2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F) \leq 1$, при этом возмущение вектора u_i определяется как: $p = \|u_i - \bar{u}_i\|$, где \bar{u}_i – i -ый СНВ ЦИ после ВВ ΔF .

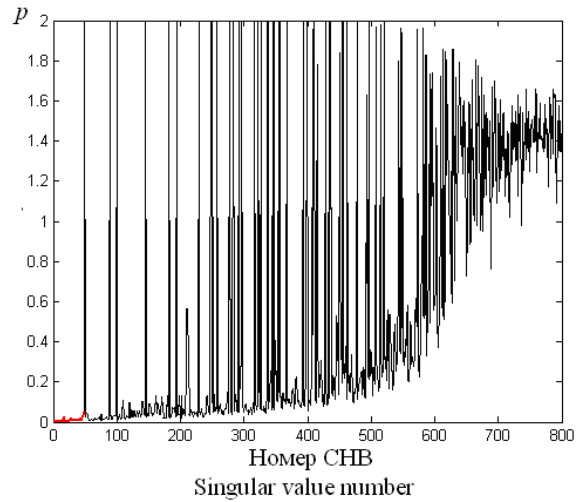


Рис. 1. Зависимость величины возмущения p СНВ от его номера при наложении на ЦИ мультипликативного шума ($D=0.000005$).¹

На первый взгляд, для решения поставленной задачи необходимо основываться на анализе нечувствительных параметров, т.е. тех, которые адекватно реагируют на ВВ, их реакция сравнима с силой ВВ, что и было реализовано в [8], где анализу подвергались СНЧ и наименее чувствительные к ВВ первые СНВ u_1, v_1 блоков матрицы. Однако, как следует из вышесказанного, такой анализ не дает окончательного решения рассматриваемой проблемы, что является ожидаемым, поскольку из рассмотрения и анализа исключается большая часть параметров ЦИ, которая однозначно определяет его вместе с СНЧ и векторами u_1, v_1 , кроме того, здесь нечувствительность некоторых анализируемых параметров, а именно u_1, v_1 , реакция которых при $\|\Delta F\| \approx 0$ может практически отсутствовать, оказывает негативное влияние на результат решения рассматриваемой проблемы. Это нельзя назвать принципиальным недостатком метода [8], поскольку, как известно, направленные на конкретное ВВ методы, как правило, являются более эффективными при выявлении результатов того действия, на которое они «настроены», чем универсальные в тех самых условиях применения, однако это не делает невозможным поиски путей повышения эффективности универсальных подходов.

С учетом вышесказанного, в работе решается задача поиска параметра, который

¹ Appendix 1

бы систематически контролировался для всех СНВ, дал возможность учета поведения всех СНВ ЦИ при экспертизе его целостности, вел себя относительно стабильно при последовательном переходе от одного СНВ к следующему, а также с точки зрения реакции на ВВ для всех СНВ матрицы. При этом величина такого параметра для $u_i(v_i)$ должна коррелировать с частотой, информация о которой содержится в соответствующей сингулярной тройке (σ_i, u_i, v_i) , т.к. именно класс частотного показателя (высокочастотный, низкочастотный, среднечастотный) является указателем на необходимые ориентиры для регистрации изменения ЦИ, если таковое имеет место.

Для решения упомянутой задачи посмотрим на произвольный СНВ $u_i(v_i)$ ЦИ как на результат дискретизации некоторой функции $f_i(x)$ на промежутке $[1, n]$. Исходя из требований, накладываемых на искомый параметр, в качестве него рассмотрим частоту [22] дискретной функции, еще никогда не рассматриваемую в качестве количественной характеристики СНВ, которая в случае гармонической функции просто совпадает с частотой, а для в нашем случае негармонической определяется как [22]:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} \frac{\eta}{2}, & \text{если } \eta - \text{четное} \\ \frac{\eta+1}{2}, & \text{если } \eta - \text{нечетное} \end{cases} \quad (6)$$

где η - число изменений знака функции на рассматриваемом промежутке. И хотя СНВ при их рассмотрении в качестве дискретных функций не имеют такого природного соответствия гармоникам, как, например, функции Уолша [22], что, видимо, и является причиной того, что до настоящего времени в научном поле для них не вводилась характеристика (6), можно предположить, что частота СНВ $u_i(v_i)$ ведет себя для ЦИ соответственно частоте, отвечающей сингулярной тройке (σ_i, u_i, v_i) : возрастая (относительно монотонно, что уточняется ниже) на всех участках с увеличением номера СНВ, что подтверждается результатами вычислительного эксперимента, типичный

вид которых для конкретного ЦИ размером 800×800 пикселей приведен на рис.2.

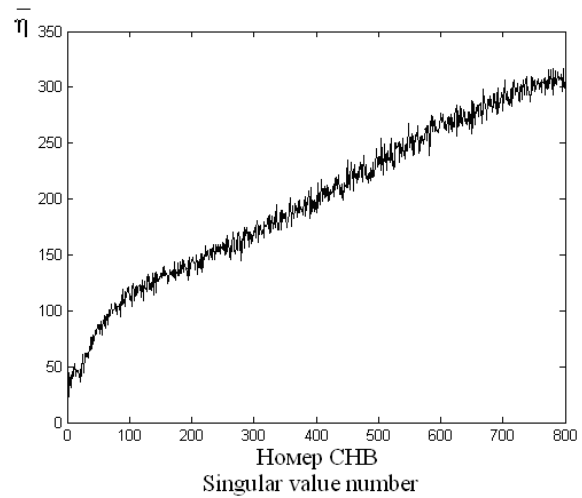


Рис.2. Зависимость частоты СНВ от его номера для оригинального ЦИ.²

Рассмотрим подробно свойства дискретной функции $fr(i), i = \overline{1, n}$, отражающей зависимость частоты СНВ $u_i(v_i)$ от его номера i для оригинального ЦИ. Как показано авторами ранее, первый СНВ матрицы ЦИ $u_1(v_1)$, полученный нормальным сингулярным разложением (4), имеет все положительные координаты и условно близок к n -оптимальному вектору (2) соответствующего пространства R^n , т.е. находится в первом координатном ортанте R^n , имея нулевую частоту. Второй СНВ не может остаться в этом же координатном ортанте, поскольку ортогонален первому, что приводит к появлению у u_2 координат разных знаков, т.е. к увеличению частоты для u_2 по сравнению с u_1 . Эта частота, в силу изменения направления СНВ u_2 , по сравнению с u_1 , на 90 градусов, возрастет, но незначительно, что обеспечивается геометрическим расположением u_2 в координатном ортанте, расположенном в близости от первого ортанта. Ортогональность u_3 с u_1 исключит из возможных для его расположения первый координатный ортант, а ортогональность u_3 с u_2 исключит для u_3 ортант, в котором расположен u_2 , и т.д. Парная ортогональность СНВ приводит к тому, что каждый координатный ортант пространства

² Appendix 1

R^n может содержать не более одного СНВ, т.к. в пределах одного координатного ортанта геометрически невозможно обеспечить ортогональность векторов (с учетом, что первый СНВ $u_1(v_1)$ геометрически далек от каждой из координатных плоскостей). Этот вывод подтверждается так же и следующим образом. Пусть векторы $u_i = (u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni})^T$, $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{nj})^T$ - различные СНВ F . Если предположить, что векторы принадлежат одному координатному ортанту, то

$$\text{sign}(u_{ki}) = \text{sign}(u_{kj}), k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

из чего вытекает, что их скалярное произведение $(u_i, u_j) = \sum_{k=1}^n u_{ki} u_{kj} \geq 0$, а в силу (7) может быть равно нулю только в случае, когда $u_{ki} u_{kj} = 0$ для $\forall k = \overline{1, n}$. Это, в свою очередь требует того, чтобы в каждой паре u_{ki}, u_{kj} хотя бы один элемент был равен 0, т.е. в двух векторах u_i, u_j , имеющих по n координат, в совокупности n компонент, как минимум, на два вектора были равны 0 (и это для каждой пары СНВ, которые предположительно окажутся в одном координатном ортанте), т.е. совокупное количество нулевых элементов в $n \times n$ -матрице U (V) должно быть не меньше n (в предположении существования хотя бы одной пары таких СНВ, которые удовлетворяют (7)), что не соответствует наблюдаемому на практике, судя по результатам вычислительного эксперимента, в котором было установлено, что нулевые элементы практически отсутствуют в матрицах U (V) – для ЦИ размером 800×800 их количество максимально не превосходило 350 элементов по всей матрице, что исключает возможность $(u_i, u_j) = 0$, тем самым определяя для каждого СНВ свою уникальную последовательность положительных и отрицательных координат. Это не зависит от формата ЦИ (с/без потерь), не зависит от величины коэффициента качества для ЦИ в формате с потерями. В данном случае это является следствием теоремы Фробениуса, указывающего на близость $u_1(v_1)$ к n -оптимальному вектору

(2), и свойств нормального сингулярного разложения, а именно, ортогональности матриц U, V , которые остаются неизменными независимо от оригинальности/неоригинальности ЦИ, его формата, размера.

Практическим подтверждением полученного вывода явились результаты вычислительного эксперимента, в котором было задействовано 450 ЦИ из базы NRCS [23], 700 ЦИ из базы img_Nikon_D70s [24], 500 ЦИ, полученных непрофессиональными видеокамерами.

По мере удаления от первого координатного ортанта, которое будет происходить для СНВ по мере возрастания их номера, будет не уменьшаться и их частость. Это неумножение нельзя назвать строго монотонным, т.е. происходящим при каждом переходе от u_i к u_{i+1} (рис.2).

Действительно, незначительные перераспределения количеств положительных и отрицательных элементов в u_{i+1} по сравнению с u_i может привести как к увеличению, так и к незначительному уменьшению или неизменности частости вектора, что продемонстрировано на рис.3, после предварительного ввода следующих обозначений для наглядности: $u_i^{sign} = (\text{sign}(u_{1i}), \text{sign}(u_{2i}), \dots, \text{sign}(u_{ni}))^T$ - вектор, отвечающий СНВ $u_i = (u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni})^T$ и очевидно имеющий ту же частость, что и u_i . Для вектора u_i (u_i^{sign}) частость $\bar{\eta} = 2$ (рис.3(a)), которая в случае изменения знака лишь одной компоненты может стать равной для u_{i+1} (u_{i+1}^{sign}) $\bar{\eta} = 3, 1, 2$ (рис.3(б,в,г) соответственно), что позволяет вернуться к гипотезе о монотонном неубывании для тренда $fr(i), i = \overline{1, n}$ (везде ниже – гипотеза А), которое будет иметь место как для оригинальных, так и для ЦИ, которые были подвержены возмущающему воздействию.

Однако характер этой монотонности для оригинальных и неоригинальных изображений, как показано ниже, будет различен.

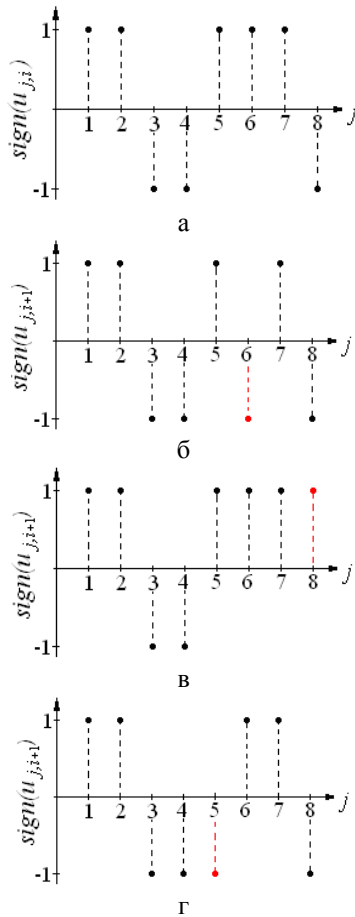


Рис.3. Иллюстрация возможных вариантов изменения частоты СНВ ($n=8$) с возрастанием его номера: а – вектор u_i^{sign} ; б, в, г – вектор u_{i+1}^{sign} .

К гипотезе А можно также прийти, используя подход, аналогичный предложенному Кобозевой А.А. и соавторами в статье, опубликованной в 2022 году в настоящем научном журнале. Из (4) вытекает:

$$\Sigma = U^T F V. \tag{8}$$

Для упрощения понимания принципиальной связи частоты СНВ с частотными составляющими ЦИ предположим, что F - диагональная матрица с элементами $f_{ij}, i, j = \overline{1, n}$. Соотношение (8) представим в виде:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} u_1^T \\ u_2^T \\ \dots \\ u_n^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} u_{11}f_{11} & u_{21}f_{22} & \dots & u_{n1}f_{nn} \\ u_{12}f_{11} & u_{22}f_{22} & \dots & u_{n2}f_{nn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{1n}f_{11} & u_{2n}f_{22} & \dots & u_{nn}f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix}$$

Частота вектора $u_k, k = \overline{1, n}$, не изменится в результате умножения $U^T F$, т.е. при преобразовании его к виду $(u_{1k}f_{11} \dots u_{nk}f_{nn})$, что определяется k -ой строкой $U^T F$, т.к. каждый его элемент умножается на неотрицательное число – диагональный элемент F . Таким образом:

$$\sigma_k = ((u_{1k}f_{11} \dots u_{nk}f_{nn}), v_k), k = \overline{1, n}, \tag{9}$$

т.е. СНЧ σ_k определяется скалярным произведением вектора, частота которого равна частоте u_k , и вектора v_k . Поскольку, как показано авторами ранее, СНВ v_1 близок к n -оптимальному вектору пространства R^n , а матрица V имеет те же свойства, что и матрица U , то частоты векторов u_k и v_k будут сравнимы между собой, как и частоты соответствующих им гармонических функций, что подтверждается вычислительным экспериментом, иллюстрацией типичных результатов которого для конкретного ЦИ (формат Tif) размером 800×800 является рис.4.

Учитывая выше упомянутое, а именно, связь между сингулярными тройками и частотными составляющими ЦИ, соответствие между СНВ и гармоническими функциями, соответствие между частотой СНВ $u_i (v_i)$ и частотой частотной составляющей изображения, отвечающей (σ_i, u_i, v_i) , из соотношения (9) можно сделать вывод, что обеспечение повышения частоты в частотной составляющей ЦИ может быть обеспечено увеличением частоты соответствующих СНВ вместе с увеличением их номера.

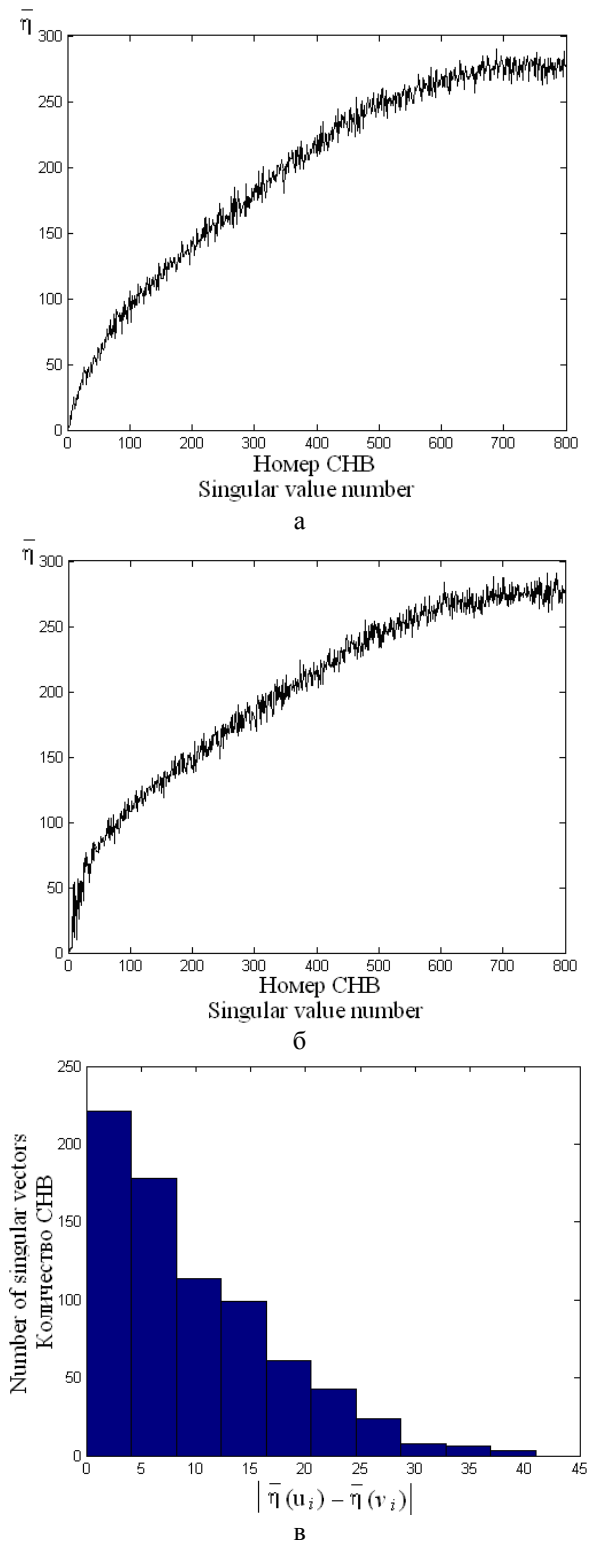


Рис.4. Зависимость частоты СНВ от его номера для конкретного ЦИ: а – левые СНВ; б – правые СНВ; в – гистограмма абсолютных значений разности частот соответствующих левых и правых СНВ.⁴

Выдвинутая гипотеза А нашла свое подтверждение на практике.

Обозначим $\bar{\eta}(u_i)$ - частоту СНВ u_i , $\Delta(u_i)$ - изменение частоты СНВ при переходе $(i-1) \rightarrow i$, т.е.

$$\Delta(u_i) = \bar{\eta}(u_i) - \bar{\eta}(u_{i-1}), i = \overline{2, n}. \quad (10)$$

С учетом вышесказанного, для оригинального ЦИ изменение частоты СНВ с увеличением номера будет происходить на некоторую «условную константу» (в пределах незначительно отличающихся границ (как показывает вычислительный эксперимент, в подавляющем большинстве эти границы составляют $[-20, 20]$) (типичный пример приведен на рис.5(б) для ЦИ (рис.5(а)) в формате Tif (красным выделена линейная аппроксимация $\Delta(u_i)$ с практически нулевым угловым коэффициентом -0.0002 и свободным членом 0.6927). Это говорит о практически постоянной скорости возрастания для тренда функции зависимости $\bar{\eta}(u_i)$ от i , т.е. о том, что функция $fr(i), i = \overline{1, n}$, должна хорошо аппроксимироваться линейной функцией для оригинального ЦИ без потерь, что и наблюдается на практике (рис.5(в) – красным выделена линейная аппроксимация $fr(i)$). Назовем это свойство **линейностью частоты СНВ**.

Введем понятие относительного изменения частоты $\delta(u_i)$ при переходе от предыдущего СНВ к последующему $((i-1) \rightarrow i)$ с учетом (10) в соответствии с формулой:

$$\delta(u_i) = |\Delta(u_i)| / \bar{\eta}(u_{i-1}). \quad (11)$$

Относительное изменение частоты будет максимальным для СНВ с начальными номерами: для u_1 частота в любом ЦИ равна нулю, ее незначительное увеличение по сравнению с нулем для u_2 , далее – для u_3 и т.д. (для СНВ с малыми номерами) в относительном смысле будет максимальным, поскольку малой будет сама их частота, но с ростом номера СНВ это относительное изменение должно (трендово) монотонно замедлять свою скорость, т.к. абсолютное возрастание частоты остается в пределах незначительно отличающихся границ, как

⁴ Appendix 1

показано выше, а сама частота увеличивает свое значение (рис.5(г)) - не представлено $\delta(u_i) = +\infty$ в соответствии с (11)).

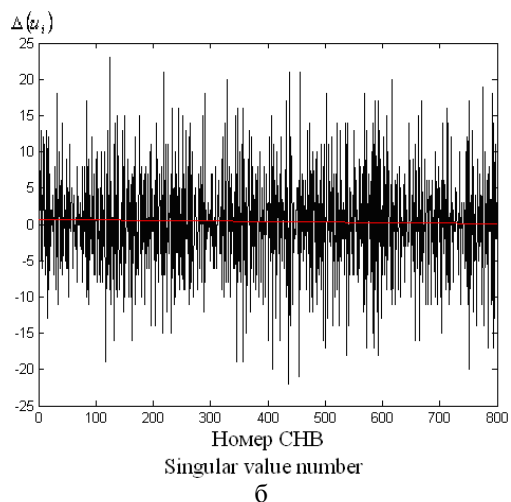
Все рассмотренные выше свойства частоты СНВ присущи оригинальному ЦИ в формате без потерь. Ожидаемым является изменение этих свойств для ЦИ, подвергнутого ВВ. В частности очень специфической и ожидаемо чувствительной характеристикой оригинального ЦИ является установленная выше линейность частоты СНВ. Действительно, СНВ ЦИ, исключая несколько первых, являются чувствительными к любым ВВ, причем контроль этой чувствительности в соответствии с формулой (5) принципиально может быть осуществлен лишь для нескольких первых. Для большинства же

СНВ матрицы ЦИ угол их поворота при ВВ может быть вплоть до развернутого, причем, что особенно важно, это происходит и при очень незначительном ВВ (рис.1), что очевидно значительно изменяет их частоту вследствие перехода не в близлежащий координатный ортант, следствием чего является нарушение линейности частоты СНВ неоригинального ЦИ, потенциально обеспечивая возможность отделения оригинального ЦИ от неоригинального при помощи учета линейности частоты, в частности в условиях малых ВВ.

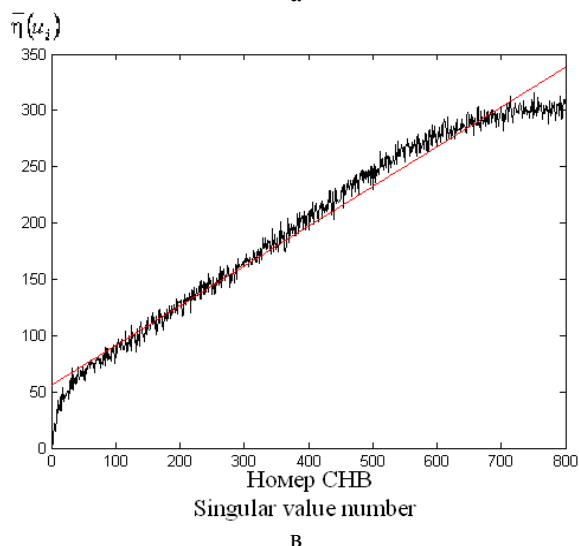
Полученный теоретически вывод нашел свое подтверждение на практике, иллюстрация чего приведена на рис.6 для ЦИ, представленного на рис.5(а).



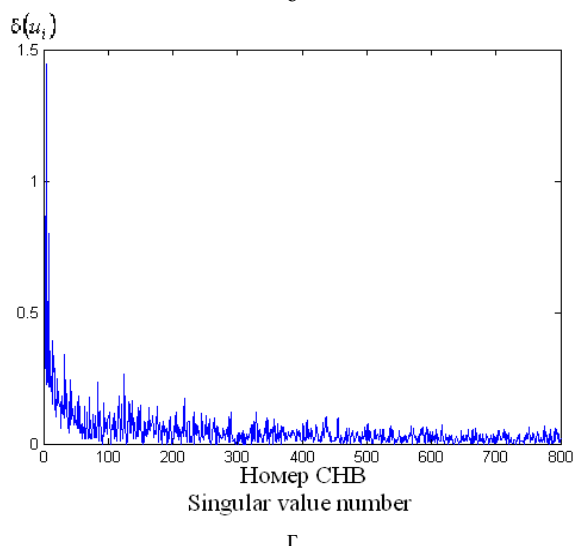
а



б



в



г

Рис.5. Свойства частоты СНВ матрицы ЦИ: а – тестовое ЦИ; б – зависимость $\Delta(u_i)$ от номера СНВ; в – зависимость частоты СНВ от его номера; г – зависимость $\delta(u_i)$ от номера СНВ.⁵

⁵ Appendix 1

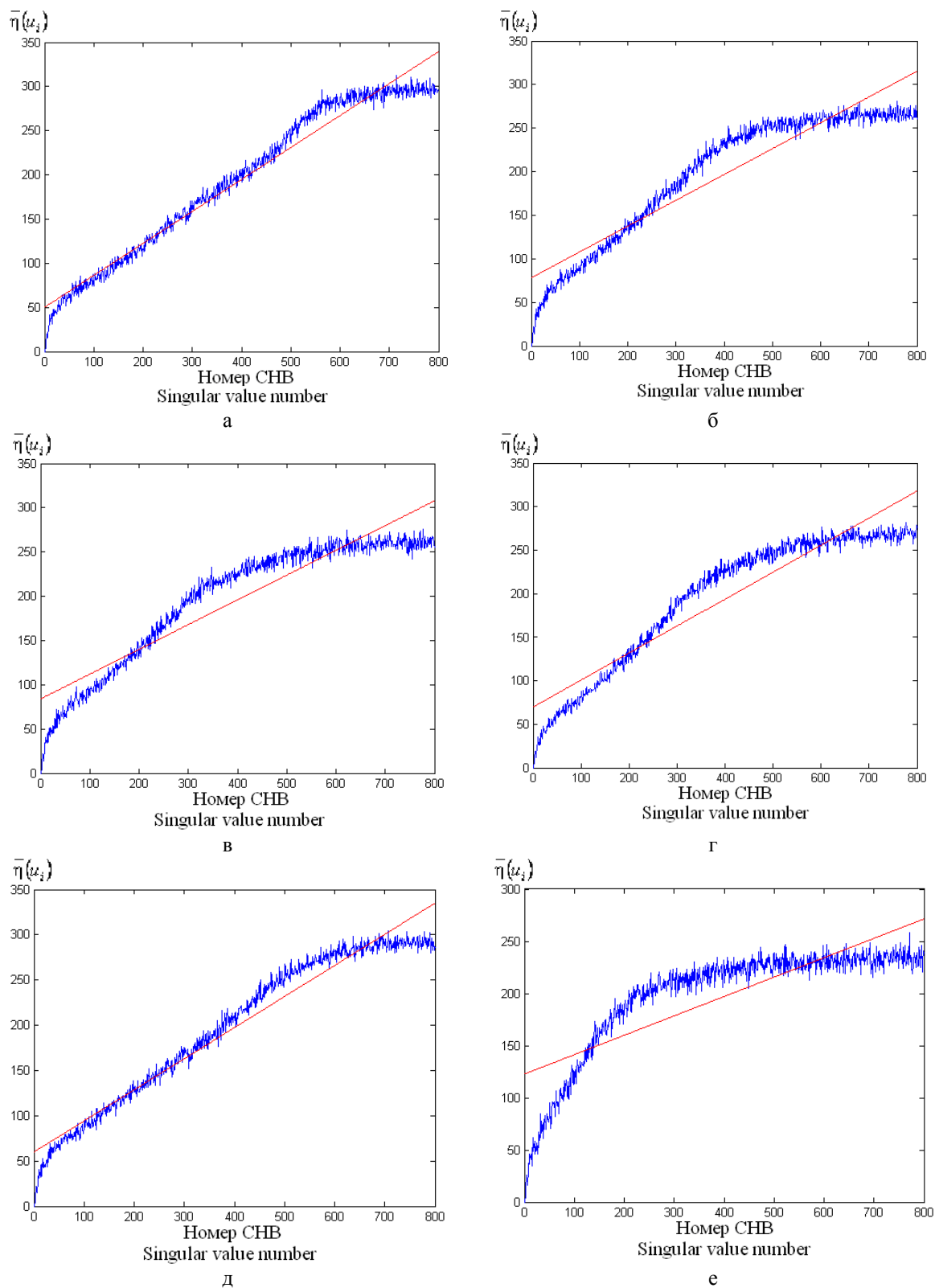


Рис.6. Нарушение линейности частоты СНВ для ЦИ, целостность которых нарушена в результате возмущающих воздействий: а – сжатия с потерями ($QF=75$); б – наложения гауссовского шума с нулевым матожиданием и $D=0.0001$; в – наложения мультипликативного шума с $D=0.001$; г – медианной фильтрации с маской 3×3 ; д – стеганопреобразования методом LSB с пропускной способностью скрытого канала 0.25 бит/пиксель; е – наложения пуассоновского шума.⁶

⁶ Appendix 1

Исследования относительного изменения частоты СНВ $\delta(u_i)$ для оригинальных ЦИ и таких, целостность которых была нарушена, не дали на данном этапе результатов, использование которых позволило бы отделять изображения независимо от силы ВВ, в частности, в условиях незначительной ΔF (3). Вследствие этого основной упор при разработке соответствующих экспертных методов авторами будет сделан на анализ линейности частоты СНВ.

ВЫВОДЫ

В работе предложены основы нового подхода к проблеме выявления нарушений целостности ЦИ. В ходе исследования:

- Для СНВ матрицы ЦИ введено понятие частоты вектора – параметра, который, в отличие от чувствительности СНВ, дает возможность использовать весь набор СНВ при экспертизе целостности ЦИ. Учет характеристик поведения всех СНВ, однозначно определяющих ЦИ, позволил расширить объем анализируемой информации о наличии/отсутствии изменений ЦИ, что должно привести к увеличению чувствительности соответствующих универсальных экспертных методов, особенно в условиях незначительных возмущающих воздействий;

- Исследованы свойства функции зависимости частоты СНВ от его номера, в ходе чего установлено, что для оригинальных ЦИ практически постоянной является скорость возрастания для тренда упомянутой функции, следствием чего является линейность частоты СНВ для ЦИ, целостность которых не нарушена;

- Линейность частоты СНВ является характеристикой, чувствительной к любым возмущающим воздействиям, в том числе незначительным. Нарушение линейности частоты для неоригинального ЦИ позволяет отделять его от изображения, целостность которого нарушена не была.

Использование установленных свойств для функции зависимости частоты СНВ от его номера даст возможность для разработки универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида возмущающего воздействия, повлекших нарушение целостности ЦИ.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Dependence of the perturbation value p of a singular vector on its number when superimposing multiplicative noise on a digital image ($D=0.000005$)

²**Fig. 2.** Dependence of the frequency index of singular vector on its number for the original digital image

³**Fig. 3.** Illustration of possible options for changing the frequency index of singular vector ($n=8$) with increasing number: a – vector u_i^{sign} ; b, c, d – vector

u_{i+1}^{sign}

⁴**Fig. 4.** Dependence of the frequency index of singular vector on its number for a specific digital image: a – left singular vectors; b – right singular vectors; c – histogram of the absolute values of the frequency index difference of the corresponding left and right singular vectors

⁵**Fig. 5.** Frequency index properties of singular vectors of digital image matrix: a – tested digital image; b – dependence of $\Delta(u_i)$ on singular vector number; c – dependence of the frequency index of singular vector on its number; d – dependence of $\delta(u_i)$ on singular vector number

⁶**Fig. 6.** Violation of the linearity of the frequency index of singular vectors for digital images, the integrity of which is violated as a result of disturbing influences: a – lossy compression (QF=75); b – overlaying Gaussian noise with zero mean and $D=0.0001$; c – overlaying multiplicative noise with $D=0.001$; d – median filtering (mask 3×3); e – LSB stegano transformation (0.25 bpp); f – overlaying Poisson noise

Литература (References)

- [1] Rai A., Singh A.S., Kumar A.S. A Review of Information Security: Issues and Techniques. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2020, vol. 8, no. 5, pp. 953–960.
- [2] Alqahtani F.H. Developing an Information Security Policy: A Case Study Approach. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 124, pp. 691–697.
- [3] Korus P. Digital image integrity – a survey of protection and verification techniques. *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 71, pp. 1-26.
- [4] Hachani M., Zaid A. Digital Signature Based Control Integrity for JPEG HDR Images. *Proceedings of the 2017 International Conference on Computer Graphics and Digital Image Processing*. Prague, 2017, pp. 1-6.
- [5] Thakur, T., Singh, K., Yadav, A. Blind approach for digital image forgery detection. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 179, no. 10, pp. 34–42.
- [6] Joglekar N.P., Chatur P.N. A compressive survey on active and passive methods for image forgery detection. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 10187–10190.

- [7] Shwetha B., Sathyanarayana S.V. Digital image forgery detection techniques: a survey. *ACCENTS Transactions on Information Security*, 2017, vol. 2(5), pp. 22–31.
- [8] Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis. *Transport and Telecommunication Journal*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 128–137.
- [9] Lerch-Hostalot, D., Megias, D. Unsupervised steganalysis based on artificial training sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, vol. 50, pp. 45–59.
- [10] Mandal P.C., Mukherjee I., Paul G., Chatterji B.N. Digital image steganography: A literature survey. *Information Sciences*, 2022, vol. 609, pp. 1451–1488.
- [11] Li H., Luo W., Qiu X., Huang J. Image forgery localization via integrating tampering possibility maps. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1240–1252.
- [12] Khan S., Khan K., Ali F., Kwak K.-S. Forgery detection and localization of modifications at the pixel level. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 1, 137.
- [13] Al-Jarrah M.M., Al-Taie Z.H., Abuarqoub A. Steganalysis using LSB-focused statistical features. *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS'17)*. Cambridge, 2017, pp. 1–5.
- [14] Zorilo V.V., Petruk K.O., Lebedieva O.Yu. Vyyavlenyia multiplykatyvnoho shumy v tsifrovyykh zobrazhennykh v umovakh zberezhennya z vtratamy [Detection of multiplicative noise in digital images under lossy storage conditions]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 13, no. 1-2, pp. 87–96. (in Ukrainian).
- [15] Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 4th Ed. Pearson, 2018. 1019 p.
- [16] Tryfonova K.O. Metod vyyavlenyia porushennya tsilisnosti tsifrovogo zobrazhennya shumom Perlina [Method of detection integrity violations of digital image by Perlin noise]. *Radiio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, no. 2, pp. 134–141. (in Ukrainian).
- [17] Zorilo V.V., Kioseva O.I., Zorilo I.V. Modifikatsiya alorytmu vyyavlenyia shtuchnogo pidvyschennya rizkosti tsifrovogo zobrazhennya [Modification of algorithm for detecting artificial improvement of sharpness of the digital image]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 156–163. (in Ukrainian).
- [18] Chu X., Li H. A survey of blind forensics techniques for jpeg image tampering. *Journal of Computer and Communications*, 2019, vol. 7, no. 10, pp. 1–13.
- [19] Duan X.T., Peng T., Li F.F., Wang J. Blind separation of tampered images based on JPEG double compression properties. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2017, vol. 31, pp. 87–96.
- [20] Bergman C., Davidson J. Unitary embedding for data hiding with the SVD. Available at: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/bb2b5041-1c92-4ff5-b7f4-ff73c3483eed> (accessed 23.09.2022)
- [21] Demmel J. *Applied Numerical Linear Algebra*. SIAM, 1997. 430 p.
- [22] Bazhenov A.V. *Tsifrovyye metody realizatsii prostanstvenno-vremennoy obrabotki signalov v aviatsionnykh radioelektronnykh kompleksakh* [Digital methods for the implementation of space-time signal processing in aviation radio-electronic complexes]. Stavropol, 2006. 219 p.
- [23] NRCS Photo Gallery. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/newsroom/multimedia/> (accessed 23.09.2022).
- [24] Gloe T., Böhme R. The “Dresden Image Database” for benchmarking digital image forensics. *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC '10)*. New York, 2010, pp. 1585–1591.

Сведения об авторах.



Бобок Иван Игоревич – д.т.н., доц., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ, социальная инженерия.
E-mail: onu_metal@ukr.net



Кобозева Алла Анатольевна – д.т.н., проф., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ.
Email: alla_kobozeva@ukr.net

Congestion Management Using an Optimized Deep Convolution Neural Network in Deregulated Environment

Dhanadeepika B.¹, Vanithasri M.², Chakravarthi M.

^{1,2}Annamalai University, India, Tamil Nadu

³Vasavi College of Engineering, Telangana, India.

Abstract. The technical issue of congestion, which is predominantly found in deregulated power systems, is caused by the failure of transmission networks to satisfy load power demands. This failure is primarily caused due to an increase in loads or loss of transmission lines or generators in modern restructured power networks. This work introduces a CM approach using Deep Convolution Neural Network (DCNN) for minimizing congestion and supporting Independent System Operators (ISOs). The purpose of the work is to generate enhanced prediction outputs for congestion management with reduced error values. These objectives were achieved through the actual power rescheduling of generators. The proposed work adopts DCNN which is optimized using an Improved Lion Algorithm (LA) and aids in providing significant outcomes for congestion management with reduced error. By implementing customized IEEE 57-bus, IEEE 30-bus, and IEEE 118-bus test systems, the suggested approach has been successfully verified for its performance on test systems of varied sizes. This analysis incorporates restrictions such as line loads, bus voltage influence, generator, line limits, etc. The most important results for the test system indicating convergence profile, congestion cost, and change in real-power and voltage magnitude are obtained by the simulation in MATLAB, and on the basis of the obtained simulation outcomes, it is evident that the proposed Improved Lion Algorithm optimized Deep Convolution Neural Network displays phenomenal computation performance in minimizing congestion losses at minimum congestion costs. When compared to several contemporary optimization techniques, the suggested technique performs better in terms of congestion cost and losses by generating improved prediction outputs with reduced errors.

Keywords: congestion management, DCNN, ISO, improved Lion Algorithm, deregulated power.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.11>

UDC: 621.3

Controlul congestiei folosind o rețea neuronală de convoluție profundă optimizată într-un mediu dereglementat

Dhanadeepika B.¹, Vanithasri M.², Chakravarthi M.

¹Universitatea Annamalai, India, Tamil Nadu, ²Vasavi College of Engineering, Telangana, India.

Rezumat. Problema tehnică a congestiei, care se găsește predominant în sistemele de energie dereglementate, este cauzată de eșecul rețelelor de transport de a satisface cerințele de putere a sarcinii. Această defecțiune este cauzată în primul rând din cauza creșterii sarcinilor sau a pierderii liniilor de transport sau generatoarelor din rețelele de energie restructurate moderne. Scopul lucrării este de a genera rezultate de predicție îmbunătățite pentru gestionarea congestiei cu valori reduse de eroare. Aceste obiective au fost atinse prin reprogramarea efectivă a puterii generatoarelor. Lucrarea propusă adoptă DCNN, care este optimizat folosind un algoritm Lion (LA) îmbunătățit și ajută la furnizarea de rezultate semnificative pentru gestionarea congestiei cu erori reduse. Prin implementarea sistemelor de testare personalizate IEEE 57-bus, IEEE 30-bus și IEEE 118-bus, abordarea sugerată a fost verificată cu succes pentru performanța sa pe sisteme de testare de dimensiuni variate. Această analiză încorporează restricții, cum ar fi sarcinile de linie, influența tensiunii magistralei, generatorul, limitele de linie etc. Cele mai importante rezultate pentru sistemul de testare care indică profilul de convergență, costul de congestie și modificarea puterii reale și a mărimii tensiunii sunt obținute prin simulare în MATLAB și pe baza rezultatelor simulării obținute, este evident că Rețeaua neuronală de convoluție profundă optimizată cu algoritmul îmbunătățit Lion afișează performanțe de calcul fenomenale în reducerea la minimum a pierderilor de congestie la costuri minime de congestie. În comparație cu mai multe tehnici de optimizare contemporane, tehnica sugerată are performanțe mai bune în ceea ce privește costul de congestie și pierderile prin generarea de rezultate de predicție îmbunătățite cu erori reduse.

Cuvinte-cheie: controlul congestiei, algoritm leu îmbunătățit, putere dereglementată.

Управление перегрузками с использованием оптимизированной нейронной сети глубокой свертки в дерегулируемой среде

Дханадеепика Б.¹, Ванитхасри М.², Чакравартхи М.³

¹Университет Аннамалаи, Индия, Тамил Наду, ²Васапи Инженерный колледж, Индия, Телангана

Аннотация. Техническая проблема перегрузки, которая в основном встречается в нерегулируемых энергосистемах, вызвана неспособностью передающих сетей удовлетворить потребности в мощности нагрузки. Этот сбой в первую очередь вызван увеличением нагрузки или потерей линий электропередачи или генераторов в современных реструктурированных электрических сетях. Таким образом, управление перегрузками (УП) считается незаменимым аспектом в нынешнюю эпоху дерегулирования, поскольку оно обеспечивает бесперебойную работу системы передачи. В этой работе представлен подход УП с использованием нейронной сети глубокой свертки (DCNN) для минимизации перегрузки и поддержки независимых системных операторов (НСО). Цель работы состоит в том, чтобы генерировать расширенные выходные данные прогнозирования для управления перегрузками с уменьшенными значениями ошибок. Эти цели были достигнуты за счет фактического перераспределения мощности генераторов. Предлагаемая работа использует DCNN, который оптимизирован с использованием улучшенного льюиного алгоритма (УЛА) и помогает обеспечить значительные результаты для управления перегрузкой с уменьшенной ошибкой. Путем реализации настраиваемых систем тестирования с шиной IEEE 57, IEEE 30 и IEEE 118 предложенный подход был успешно проверен на эффективность на тестовых системах различных размеров. Этот анализ включает в себя такие ограничения, как нагрузка на линию, влияние напряжения на шине, генератор, ограничения на линию и т. д. Наиболее важные результаты для тестовой системы, указывающие на профиль конвергенции, стоимость перегрузки и изменение реальной мощности и величины напряжения, получены путем моделирования в MATLAB, и на основе полученных результатов моделирования становится очевидным, что предложенная улучшенная нейронная сеть глубокой свертки, оптимизированная с помощью УЛА, демонстрирует феноменальную производительность вычислений при минимальных потерях из-за перегрузки при минимальных затратах на перегрузку. По сравнению с несколькими современными методами оптимизации предлагаемый метод работает лучше с точки зрения стоимости перегрузки и потерь за счет создания улучшенных выходных данных прогнозирования с меньшим количеством ошибок.

Ключевые слова: управление перегрузками, улучшенный льюиный алгоритм, нерегулируемая мощность.

INTRODUCTION

Electric energy is the driving force behind the functioning of the modern world and its rise in prominence is mainly because of industrialization, urbanization and enhanced life style. Consequently, the overdependence and ever-increasing demand for electric energy has led to several rapid advancements in the power sector. Previously, vertically integrated utilities were used to operate the power grids, and the government mostly controls this regulated power system. Thus, both incurred expenditure and the resultant revenue of the power system are both handled by the government [1-3]. However, the excessive demand for power in recent times effectuated the deregulation and privatisation of electric power system. This in turn has contributed to the restructuring of the power system with the inclusion of numerous smaller generation plants, comprising of sustainable power sources to meet the booming number of loads [4]. As a result of excessive power requirements, transmission systems are operating beyond their thermal and stability limits, placing strain on the current power system architecture. Moreover, in a deregulated environment, the DISCOs, GENCOs and TRANCOS are not

controlled by a common institution, instead different organizations manage these companies and the establishment of coordination between these companies is left to an ISO. The transactions made by the DISCOs and GENCOs are unpredictable, abrupt and ahead of time, resulting in transmission line congestion [5, 6]. The issue of transmission line congestion mainly occurs due to rise in load demand, generation outages and equipment failure. The vital task of relieving this congestion and ensuring a safe and secured working of power system, is entrusted to ISO. The major techniques followed by ISO to relieve congestion are cost free and not cost-free methods [7]. The former involves Flexible AC Transmission (FACTS) devices, transformer taps, network reconfiguration, phase shifters or congestion lines out-ageing. The latter entails approach like curtailment of loads, generation prioritization and generation rescheduling. In certain situations, ISO informs the consumers about the specific line congestion and facilitate load adjustment inside the limits of system constraints. In severe cases, the CM is carried out by physically restricting the transaction, irrespective of the inconvenience to consumers [8, 9]. FACTS devices are regarded as technology

that, lowers transmission congestion and improves grid infrastructure use. The usage of FACTS controllers has some drawbacks, including challenges with placement, size, cost, and modelling that are ideal. In order to manage congestion in reorganized electricity markets, this article discusses the application and ideal position of the FACTS device series [10, 11]. Through the creation of an algorithm to improve working measure of contingency analysis as well as positioning and control of Thyristor-Controlled Series Compensator (TCSC) [12], and operation of TCSC for transmission line optimization and congestion is explored. The best location for TCSC [13] in terms of increasing power transmission efficiency, limiting steady-state instability, and preserving power system voltage stability. TCSC is used in power systems to enhance transient response and congestion control. The explanation of the objective models for minimising expense and load shedding involved optimising welfare of society, limiting load shedding, as well as increasing load served. Two generators and bus sensitivity factors were presented along with Particle Swarm Optimization (PSO) technique. However, PSO exhibits demerits including sensitivity to parameters, lack of diversity and premature convergence leading to inaccurate outputs [14]. In [15], Genetic algorithm is engaged for finding best generation schedule for CM in an unregulated power system but shows challenges in the improvement of congestion management performance. The Grey Wolf Algorithm (GWO) is employed for congestion management due to its ability of enhanced convergence speed yet gets trapped on local optimum value [16]. Firefly Algorithm (FA) is another metaheuristic algorithm employed for handling congestion management but exhibits inability in handling optimization problems with constraints [17]. The line overload problem during congestion management is eliminated in power system by grasshopper algorithm (GA), however, the inappropriate selection of parameters may lead to premature convergence of the algorithm [18]. The differential algorithm is adopted the hourly congestion management but demands increased consumption of resources leading to resource shortage [19]. Bat algorithm is also deployed for the congestion management in power systems but faces issues related to computational complexity [20]. Several studies introduce deep neural networks together with metaheuristic algorithms for congestion control in response to these

problems. In [21], glow worm swarm optimization is adopted for the optimization of DCNN which in turn adjusts the weight initialization. Anyway, with the increase in data size, slight fluctuations occur in memory usage of the algorithm.

In [22], a convolution algorithm is used for the optimizing of DCNN but the accuracy results attained are not high. In [23] swarm intelligent based algorithms are adopted for the optimizing of DCNN. However, these algorithms face issues related to convergence and accuracy. Considering these shortcomings, the novelty of the work engages a DCNN network with Improved Lion Optimization, which is a recent optimization strategy showing remarkable performance towards congestion management.

Contributions of the study are,

- An Improved LA optimized DCNN is proposed for relieving congestion in a deregulated environment.
- The presented CM approach is tested for its effectiveness in IEEE 118-bus, 57-bus, and 30-bus systems.
- The proposed methodology is effective in minimizing congestion cost and losses.

PROPOSED SYSTEM MODELLING.

A. Problem Formulation

The primary goal is to lower the systems z cost, which is taken into account.

$$\text{Minimize } \sum_{k=1}^{N_k} C_k^n (\Delta P_k^n) \Delta P_k^n \quad (1)$$

From above equation, rescheduling power cost in accordance with price bids at interval n is represented as c_k^n , as incremental adjustment of generators active power is given by ΔP_k^n for interval n . N_k represent the number of buses used and the generation of maximum and minimum limits is denoted as P_k^{\max} and P_k^{\min}

Subject to the limitations are listed as follows

$$P_{gj} - P_{dj} = \sum_{k=1}^n |V_J \parallel V_K \parallel Y_{jk} | \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{jk}) \quad (2)$$

$$Q_{gj} - Q_{dj} = \sum_{k=1}^n V_J \parallel V_K \parallel Y_{jk} | \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{jk}), \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$P_{gk}^{\min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{\max} \quad (4)$$

$$Q_{gk}^{\min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{\max} \quad k = 1, 2, \dots, N_g \quad (5)$$

Here, V_j, V_k denotes the voltage for j^{th} bus and k^{th} bus respectively, Y denotes the shunt admittance, θ_{jk} represents the admittance angle between j^{th} bus and k^{th} bus, δ_i, δ_k denote bus voltage angle of the i^{th} bus and k^{th} bus, P_{gj}, Q_{gj} denote the real and reactive powers for j bus while, P_{dj}, Q_{dj} indicate a real and reactive load powers for j bus, N_g denote the number of generators, $P_{gk}^{\min}, Q_{gk}^{\min}$ denote the minimum value of real and reactive power of k^{th} bus, $P_{gk}^{\max}, Q_{gk}^{\max}$ represent the maximum of real and reactive power of k^{th} bus. The following additional limits are taken into account once the bus is linked to pumped storage units for lowering the system's congestion costs:

$$e^n = e^{initial} \quad n = 0, e^n = e^{final} \quad n = 24 \quad (6)$$

$$e^{n+1} = e^n + t(\eta p) \quad (7)$$

$$P_{Ps}^{\min} \leq p_{ps}^n \leq P_{ps}^{\max} \quad (8)$$

$$P_{Hs}^{\min} \leq P_{Hs}^n \leq P_{Hs}^{\max} \quad (9)$$

$$e^l \leq e^n \leq e^u \quad (10)$$

Here, $P_{Ps}^{\min}, P_{Hs}^{\min}$ and $P_{Ps}^{\max}, P_{Hs}^{\max}$ represent the minimum and maximum values of power.

B. Bus Sensitivity Factor (BSF)

BSF is defined as ratio of incremental changes occurring in m^{th} power of the bus to an incremental change in real power flowing through bus "i" which is linked to buses "j" and "k," as shown below. On the basis of greatest negative sensitive indexes, BSF offers the best location for pumped hydro storage unit deployment.

$$BSF_m^i = \frac{\Delta P_{jk}}{\Delta P_m} \quad (11)$$

From the expression above, the degree to which the amount of real power changes in accordance with amount of real power injected at bus m in a transmission line is represented by $BSF_m^i \cdot \Delta P_{jk}$ indicates the incremental changes in real power that flows in bus i which is connected between j and k buses, Δ_{pm} represents an incremental change in m^{th} power of the bus.

Equation (12) is used to derive BSF, as shown below

$$\Delta P_{jk} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_i} \Delta \delta_j + \frac{\partial P_{jk}}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k + \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_i} \Delta V_j + \frac{\partial P_{jk}}{\partial V_k} \Delta V_k \quad (12)$$

$$\Delta P_{jk} = a_{jk} \Delta \delta_j + b_{jk} \Delta \delta_k + c_{jk} \Delta V_j + d_{jk} \Delta V_k \quad (13)$$

From Equation the expression for a_{jk}, b_{jk} and c_{jk} is given by,

$$a_{jk} = V_j V_k V_{jk} \sin(\theta_{jk} + \delta_k - \delta_j) \quad (15)$$

$$b_{jk} = -V_j V_k V_{jk} \sin(\theta_{jk} + \delta_k - \delta_j) \quad (16)$$

$$c_{jk} = -V_k Y_{jk} \cos(\theta_{jk} + \delta_k - \delta_j) - 2V_k Y_{jk} \cos \theta_{jk} \quad (17)$$

$$d_{jk} = V_j Y_{jk} \cos(\theta_{jk} + \delta_k - \delta_j) \quad (18)$$

Here, V_j, V_k denotes the voltage across the j and k buses, Y_{jk} represents equation (19) provides the Jacobian Matrix using Newton-Raphson (NR) technique.

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = [J] \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{pmatrix} \quad (19)$$

Here,

$$\Delta \delta = [J_{11}]^{-1} [\Delta P] = [M] [\Delta P] \quad (20)$$

$$\Delta \delta_j = \sum_{j=1}^n m_{jl} \Delta P_j \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq s \quad (21)$$

Hence, the expression of BSF becomes

$$BSF_m^i = a_{jk} m_{jl} + b_{jk} m_{jl} \quad (22)$$

The Improved LA-optimized DCNN is employed for congestion management in this work and the presented approach is shown in Figure 1.

C. Optimized DCNN with Improved Lion Algorithm (LA) for classification

In this work, DCNN is adopted in which the automatic optimization of hyperparameters is carried out by improved LA. In Figure 2, the general flow diagram of DCNN with optimization is indicated. Here, back propagation is used for the learning process. The obtained prediction output from the fully connected layer is compared with an actual value and subsequently, the loss function calculates the error value. The Stochastic Gradient Update (SGD) function is used in the training procedure of DCNN. Consider, the n

samples of the training dataset and assume $f_i(x)$ as the loss function in which i denotes the index

and x denotes the parameter vector. The objective function is given by,

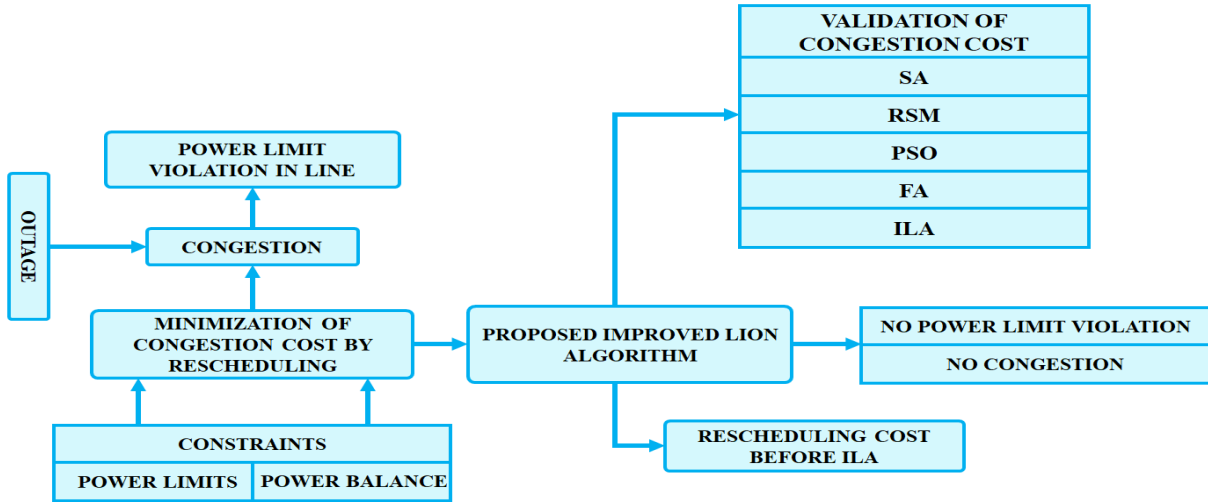


Fig.1. Congestion management using Improved LA-optimized DCNN

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i(x) \quad (23)$$

The following expression denotes the objective function gradient at x .

$$\nabla f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nabla f_i(x) \quad (24)$$

The computational cost for each independent variable iteration, if gradient descent is used, is given by $O(n)$. An index $i \in \{1, \dots, n\}$ is uniformly sampled at each iteration of SGD for updating x by computing $\nabla f_i(x)$.

$$x \leftarrow x - \eta \nabla f_i(x) \quad (25)$$

Here, η indicates the learning rate.

The DCNN structure used in the proposed work is AlexNet which is an updated architecture generating improved accuracy with less computational time. Table 1 represents the Alexnet DCNN layer architecture used in the proposed work.

The convolutional layer extracts the features from the data and is normalized by ReLU. Subsequently, the pooling layer of size 3×3 reduces the number of sizes thereby minimizing the complexity. In this DCNN, categorical cross-entropy is adopted as the loss function. DCNNs are trainable architectures with biological inspiration that acquire on invariant aspects. Filter banks, certain non-linearities, and feature pooling layers

are present in all stages of a DCNN. Multiple-stage multilevel hierarchical features are learned by a DCNN. The combined input features fe in DCNN are characterised by a function as shown in Equation (26), where fe is given a size of $m_1 \times m_2$ and A indicates the 8-bit channel ranging from $\{0, \dots, 250\}$.

Table 1

Alexnet DCNN layer architecture

Layers	Filters	Filter size	Strides
Convolutional layer 1 Max. pooling	96	11×11 3×3	4
Convolutional layer 1 Max. pooling	256	5×5 3×3	1
Convolutional layer 1 Max. pooling	384	3×3 3×3	1
Convolutional layer 1 Max. pooling	384	3×3 3×3	1
Convolutional layer 1 Max. pooling	256	3×3 3×3	1

$$lm_{sc} : \{1, \dots, m_1\} \times \{1, \dots, m_2\} \rightarrow A \subseteq R, (i, j) \rightarrow fe_{i,j} \quad (26)$$

(Considering filter $L \in \mathbb{R}^{2g_1+2g_2+1}$, where the discrete convolution $(*)$ with filter H is specified

by Equation (27) for the best image features fe . L is modelled as per Equation (28),

$$(fe_i * L)_{p,r} = \sum_{v=g_1}^{g_1} \sum_{u=-g_2}^{g_2} L_{v,u} fe_{p+v,r+u} \quad (27)$$

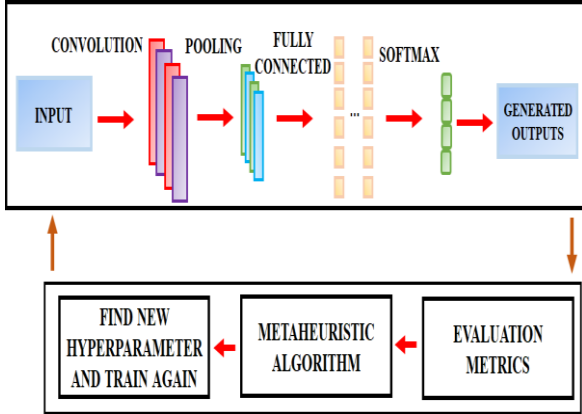


Fig .2. Deep CNN.

$$\begin{pmatrix} L_{-g_1,-g_2} & \dots & L_{-g_1,-g_2} \\ \vdots & L_{0,0} & \vdots \\ L_{g_1,-g_2} & \dots & L_{g_1,-g_2} \end{pmatrix} \quad (28)$$

A commonly used smoothing filter is the discrete Gaussian filter $L_{H(\sigma)}$, which is shown in Eq. (29), where σ stands for "standard deviation of Gaussian distribution".

$$(L_{H(\sigma)})_{p,r} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{p^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (29)$$

Assume convolutional layer with feature maps $n_1^{(s)}$ and output dimensions $n_2^{(s)} \times n_3^{(s)}$. The i th feature map of s layer is illustrated in expression 30. The bias matrix and filter dimensions are given by $W_i^{(s)}$ and $L_{i,j}^{(s)}$ that links i th and j th feature map of s and $(s - 1)$ layer.

$$X_i^{(s)} = W_i^{(s)} + \sum_{v=g_1}^{n_1^{(s-1)}} L_{i,j}^{(s)} * X_j^{(s-1)} \quad (30)$$

The output feature map retains a dimension by utilising discrete convolution at specific locations on input feature maps and is expressed as

$$n_2^{(s-1)} - 2g_1^s = n_2^{(s)} \text{ and } n_3^{(s-1)} - 2g_2^s = n_3^{(s)} \quad (31)$$

The convolutional layer with its membership function including multilayer perceptron is expressed as

$$(X_i^s)_{p,r} = (W_i^s)_{p,r} + \sum_{j=1}^{n_1^{(s-1)}} (L_{i,j}^{(s)} * X_j^{(s-1)})_{p,r} \quad (32)$$

$$(W_i^{(s)})_{p,r} + \sum_{j=1}^{n_1^{(s-1)}} \sum_{v=-g_1^s}^{g_1^s} \sum_{u=-g_2^s}^{g_2^s} (L_{i,j}^{(s)})_{v,u} (X_j^{(s-1)})_{p+v,r+u} \quad (33)$$

The position (p, r) achieved by output computation unit is illustrated in Equation 33. The trainable weight of network is represented as $L_{i,j}^{(s)}$ and $W_i^{(s)}$ indicates bias matrix. Consider fully connected layer as s . If $s-1$ is also fully connected s takes as input feature map $n_1^{(s-1)}$ with size $n_2^{(s-1)} \times n_3^{(s-1)}$ and is given by,

$$X_i^{(s)} = f(V_i^s) \text{ with } V_i^s = \sum_{j=1}^{n_1^{(s-1)}} \sum_{p=-1}^{n_2^{(s-1)}} \sum_{r=-1}^{n_3^{(s-1)}} We_{i,j,p,r}^s (X_j^{(s-1)})_{p,r} \quad (34)$$

$We_{i,j,p,r}^s$ clarifies the weight which links unit at position (g, h) in layer $s-1$ feature map and i th unit in s . The weights are updated with the backpropagate of error in the network after the calculation of network error. The optimization algorithm updates the weights till the minimized value of error is obtained and the error does not get reduced further. For better prediction outcomes, it is preferable to make the values ideal rather than generating some random evaluation values. However, the automatic finding of hyperparameters of DCNN is crucial and requires the involvement of metaheuristic algorithms. The tuning in this work is done using the optimization idea, specifically, a novel tuning approach is presented.

Solution Encoding and Objective Function



Fig. 3. Solution encoding.

Figure 3 shows the solution provided by the suggested algorithm, where nu represents total number of weights. An objective function (OF) of research that is being presented is described in Equation (32), where Er denotes error.

$$OF = Min(E_r) \quad (35)$$

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_i^n (L^A - L^P) \quad (36)$$

From the above expression N indicates the number of samples, and actual and predicted outcomes of the ground truth table are specified as L^A and L^P

Proposed Improved LA.

The Improved LA model is used in the work is presented to optimise a weight of DCNN. Here, the current LA method is enhanced so that it is

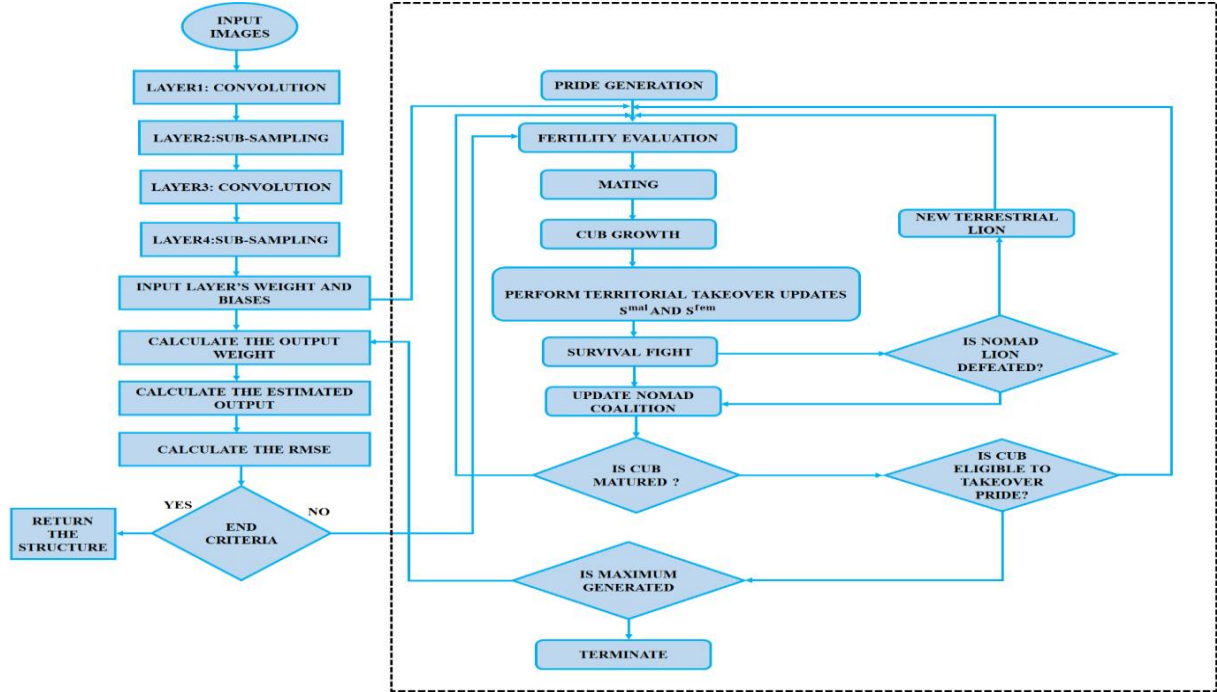


Fig. 4. Adopted Improved LA Flow Diagram.

capable of handling the difficult optimization problems. Self-improvement has generally been shown to be promising in conventional optimization techniques. The live nature of lion species served as the basis for LA model. It consists of four stages, including "mating, pride-generating, improved territorial takeover and territorial defence". The proposed Improved LA adopts the improved territorial takeover phase in which the lions are updated based on the maximum age of cubs. In contrast, conventional LA do not have specific updating process. The solution vector of Improved LA is referred as $S = [S_1, S_2, \dots, S_M]$.

Pride Generation.

The pride formulation is initiated by nomadic lion, territorial lion, and lioness which are indicated as s^{mal}, s^{nd} and s^{fem} the vector components are specified as $s_{len}^{mal}, s_{len}^{nd}$ and, s_{len}^{fem} with $len = 1, 2, 3, \dots, Len$; that lies within the limits of random integers, when $\hat{m} > 1$. The length of lion is

specified as Len and variables are denoted by \hat{n} and \hat{m} . Simultaneously, when $\hat{m} = 1$, the expression for $V(S_{len})$ is written by,

$$Len = \begin{cases} m; m > 1 \\ n; otherwise \end{cases} \quad (37)$$

$$V(S_{len}) \in (S_{len}^{min}, S_{len}^{max}) \quad (38)$$

$$n \% 2 = 0 \quad (39)$$

$$V(S_{len}) = \sum_{len=1}^{Len} S_{len}^{\lfloor \frac{len}{2} \rfloor} \quad (40)$$

Fertility Estimation.

If s^{fem} and s^{mal} become saturated, they may have reached a local or global optimum and so failed to find the ideal solution. In the proposed technique

$$S_{len}^{fem+} = \begin{cases} S_d^{fem+} & \text{if } len = d \\ S_{len}^{fem} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (41)$$

$$S_d^{fem+} = \min \left[S_d^{\max}, \max \left(S_d^{\max}, \nabla_d \right) \right] \quad (42)$$

The process of mating is performed when s^{fem+} is considered as s^{fem} . From the expressions above d^{th} and len^{th} component vectors of s^{fem+} is specified as S_d^{fem} and s_{len}^{fem+} .

$$\nabla_d = \left[S_d^{fem+} + (0.1r_2 - 0.05) \left(S_d^{mal} - r_1 S_d^{fem} \right) \right] \quad (43)$$

The random constraints are specified by variables \tilde{r}_1, \tilde{r}_2 and d , which are produced and lie between $[0,1]$ and $[1, Len]$, respectively. Also, female update process is indicated as ∇ .

Matching

Gender-based clustering occurs as a result of the crossover and mutation processes that occur during mating. Cubs are generated by mutation and crossover process and are referred as, s^{cubs} which are produced by cross over process and s^{new} by mutation process. Thus, a lioness gives birth to four cubs when it is pregnant, and another four cubs are created through the crossover process. These four cubs are used to carry out mutation procedure in order to create four further cubs.

Lion Operators.

The territorial defensive and coalition developments are covered in survival fight. If the conditions in Equation (44 to 46) is satisfied is S^{e-nd} selected.

$$h(S^{e-nd}) < h(S^{mal}) \quad (44)$$

$$h(S^{e-nd}) < h(S^{mal_{cub}}) \quad (45)$$

laggardness, laggard is specified as L_{ar} and s^{mal} , while $h(s^{mal})$ beyond h^r specifies the fitness reference. The sterility rate st_r indicates s^{fem} fertility. While $St_r \setminus St_r^{\max}$ tolerance, the expression becomes

$$h(S^{e-nd}) < h(S^{fem_{cub}}) \quad (46)$$

The nomadic coalition upgrade happens after the failure of S^{nd} , while a pride update happens after failure of s^{mal} .

Territorial Takeover.

The process of upgrading s^{mal} and s^{fem} based on maximum cub age A_{\max} takes place in this phase. In the proposed work, the territorial takeover uses the algorithm to upgrade s^{mal} and s^{fem} as mentioned in (47) and (48) which is absent in conventional LA. In other words, the territorial updating is based on size of male and female cubs and a random variable called *rann*.

$$S^{mal} = \left[S^{mal_{cub}} + \left(S^{fem_{cub}} \times rann \left(size \left(S^{fem_{cub}} \right) \right) \right) \right] \quad (47)$$

$$S^{fem} = \left[S^{fem_{cub}} + \left(S^{mal_{cub}} \times rann \left(size \left(S^{mal_{cub}} \right) \right) \right) \right] \quad (48)$$

Termination.

The design gets terminated only when Equations (49) and (50) are satisfied.

$$it > it_{\max} \quad (49)$$

$$h(S^{mal}) - h(S^{opt}) \leq er_{th} \quad (50)$$

Figure 4 shows the flow chart for the suggested Improved LA model. From the expression above count of generation is indicated by *it*, which is set to zero at initial and further increased to 1, during the territorial takeover. it_{\max} and er_{th} stands for maximum generation and error threshold, respectively. The list of hyperparameters for the evaluation selected with the help of improved LA is mentioned in Table 2.

Table 2

List of hyperparameters.

Hyperparameters	Range	Optimal Value
No. of epoch	[1-200]	100
No. of filters	[1-400]	16
Batch size	[10-100]	32
Pooling size	[1×1-7×7]	2×2
Filter size	[1×1-11×11]	3×3

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, an Improved LA optimized DCNN is used for resolving congestion issue in unregulated environment. The optimized Deep CNN facilitates the active power rescheduling of generators with reduced congestion cost. Around 500 loading scenarios are being generated among which 78% of patters are adopted for training and 22% of patterns are adopted for testing. Out of the 390 loading scenarios of training set, the number

of congested scenarios identified is 378 while the non-congested cases is 12. Among 110 loading scenarios of testing set, the number of congested loading scenarios is identified as 100 whereas the number of non-congested loading scenarios is identified as 10. An apparent power load, active power load and reactive power load are applied as inputs to DCNN in which the dimension of the input layer is given by $3 \times 21 \times 1$.

In order to apply power load, active power load and reactive power load as inputs, data requires pre-processing. Initially, the data has to be collected at regular intervals and further pre-processed which involves removal of outliers and

conversion of data into time-series format. The data could then be formatted into a tensor or array, where each row represents a time step and each column represents a feature, such as active power load. Finally, the formatted data can be fed as input to the DCNN. The proposed work is verified by implementing in MATLAB and is tested under variety of networks including IEEE 30-bus, IEEE 57-bus and IEEE 118-bus. An upper voltage of the load bus is 1.1 p.u, while the lower voltage of the load bus is 0.9 p.u. Table 3 lists the test systems considered for evaluating the performance of Improved LA optimized DCNN for CM, while the congestion line details are presented in Table 4.

Table 3

Test System details

Test system	Modified	IEEE 30-bus	Modified	IEEE 57-Bus	IEEE 118-bus
Test case	1A	1B	2A	2B	3
Considered Contingency	Line outage between 1 and 2.	Line outage between 1 and 7.	Reduction of line capacity from 50-35 MW and 200 to 175MW between 6-12 and 5-6.	Reduction of line capacity between lines 2 and 3 from 85 to 20 MW.	Line outage between 5 and 8.

Table 4

Congestion line flow details of test system

Test Case	1A		1B			2A		2B		3		
	Congested Lines											
Line Flow	Before CM	147.5	140.2	314	97.8	103.6	188.7	49.5	36.6	209.2	580.2	363.5
	After CM	130	123.5	130	61.4	64.39	168.4	16.8	16.7	97.6	496.8	143
Specified line limit (MW)	130	130	130	65	65	175	35	20	175	500	175	

IEEE 30-Bus Test System

For comprehending the potential of proposed DCNN based CM approach, a revised version of IEEE 30-bus system that comprises of 24 load buses, 6 generator buses and 41 transmission lines is considered. The two different cases considered here are: Case 1A – power outage causes congestion

between lines 1-7 and 7-8; Case 1B – load rises to 50% at every bus and the lines 1-2, 2-8 and 2-9 are congested. Table 3 gives the details about the obtained results from which it is noted that the proposed work generates improved outputs of 18.707 for case1A and 161.14 for case 1B.

Table 5

Test system results

	Techniques	TC,\$/h	ΔP_{G1}	ΔP_{G2}	ΔP_{G3}	ΔP_{G4}	ΔP_{G5}	ΔP_{G6}	TRRG
Case 1A	SA [24]	719.86	-9.076	3.133	3.234	2.968	2.954	2.443	23.809
	RSM [24]	716.25	-8.808	2.647	2.953	3.063	2.913	2.952	23.33
	PSO [24]	538.95	-8.61	10.4	3.03	0.02	0.85	-0.01	22.93
	FA [25]	511.87	-8.778	15	0.106	0.065	0.1734	-0.618	24.74
	Proposed	421.58	-8.596	7.57	0.352	1.096	0.568	0.5228	18.707
Case 1B	SA [24]	6068.7	-	-	-	-	-	-	164.53
	RSM [24]	5988	-	-	-	-	-	-	164.5
	PSO [24]	5335.5	-	-	-	-	-	-	168
	FA [25]	5304.4	-8.579	75.99	0.057	42.99	23.83	16.51	167.9
	Proposed	5238.9	-9.001	62.9	34.24	2.059	29.45	23.47	161.14

TRRG-Total Real power Rescheduling Generator, TC-Total

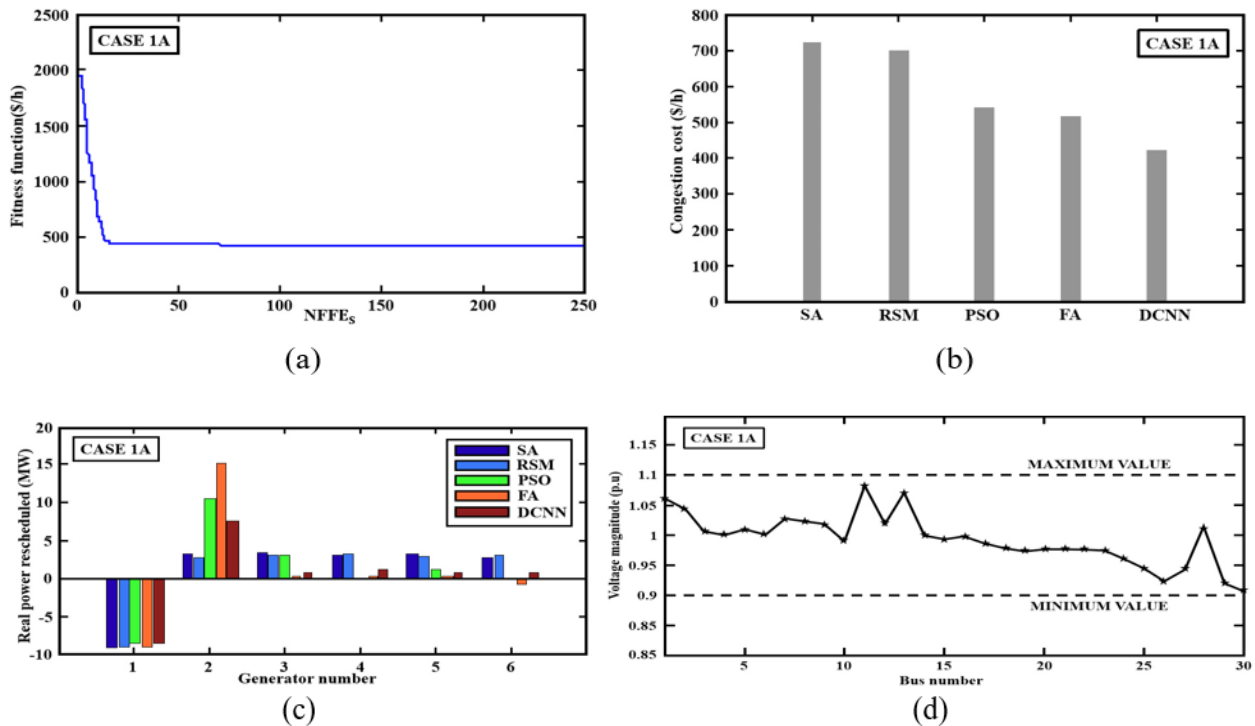


Fig. 5. Case 1A simulation outcomes (a) Convergence profile (b) Congestion cost (c) change in real-power and (d) Voltage magnitude.

The simulation results for case 1A are provided in Figure 5. On analyzing the figure, it is detected that a

congestion cost is minimum for the proposed CM approach using Improved LA optimized DCNN.

Further, real-power losses are significantly reduced to 12.65 MW from 16.13 MW, indicating the effectiveness of the proposed methodology. The

voltage magnitude is also maintained within a reasonable range (0.9 to 1.1) after CM

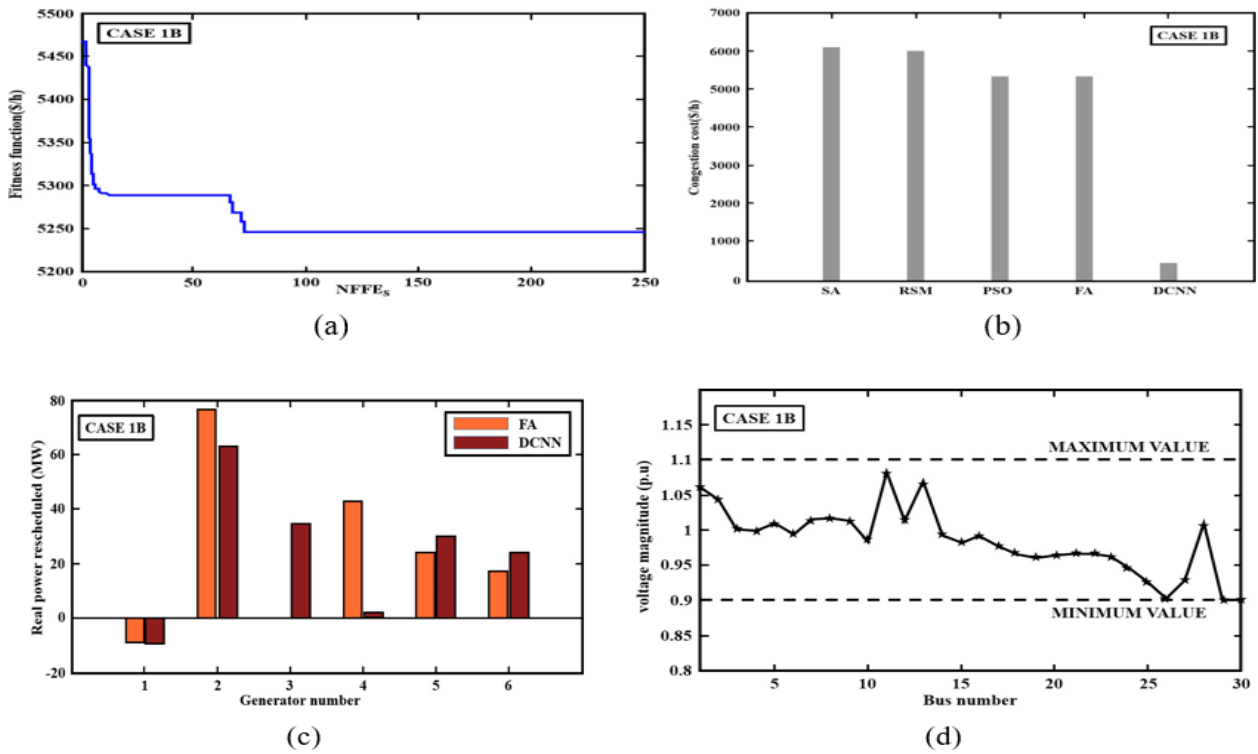


Fig. 6. Case 1B simulation outcomes (a) Convergence profile (b) Congestion cost (c) change in real-power and (d) Voltage magnitude.

From Figure 6, which gives the simulation outcomes for case-1B, deduces that the congestion cost is comparatively lower for the proposed DCNN based CM approach. In this case, increase in load along with the outage of line between 1 and 7 results in overloading Moreover, the system losses are also reduced to 14.59 MW from 37.24 MW after CM using Improved LA optimized DCNN.

IEEE 57-Bus Test System

Next, a revised topology of IEEE 57-bus test system considered for CM is made up of 80 transmission lines, 50 load buses and 7 generator buses. Its reactive and real power values, 336 MVAR and 1250.8 MW respectively. Moreover, the details and results of the two cases coming under this test system is provided in Table 6.

Table 6

Test system results.

	Techniques	$TC, \$/h$	ΔP_{G1}	ΔP_{G2}	ΔP_{G3}	ΔP_{G4}	ΔP_{G5}	ΔP_{G6}	ΔP_{G7}	TRRG
	Case 2A	SA [24]	7116.8	76.4	0	-2.64	9.98	-87.3	0	0
RSM [24]		7876.4	59.3	0	38.7	-48.6	-63.7	0	0	197.3
PSO [24]		6735.2	24.7	13.5	8.54	-6.49	-82.3	0	39.7	164.4
FA [25]		6214.4	5.72	2.75	0.63	0.21	-39.2	-35.1	62.2	146.82
Proposed		5324.6	-0.05	-11.7	-5.81	-45.2	-51.3	-34.8	-0.53	144.57
Case 2B	SA [24]	4274.3	-	-	-	-	-	-	-	98.74
	RSM [24]	4123.6	-	-	-	-	-	-	-	89.67
	PSO [24]	3856.1	-	-	-	-	-	-	-	76.43
	FA [25]	2987.9	0.37	-27.5	31.4	0.44	-2.32	-1.87	-0.63	65.87
	Proposed	2012.3	0.76	0.08	22.0	0.17	-10.5	-0.00	16.07	49.583

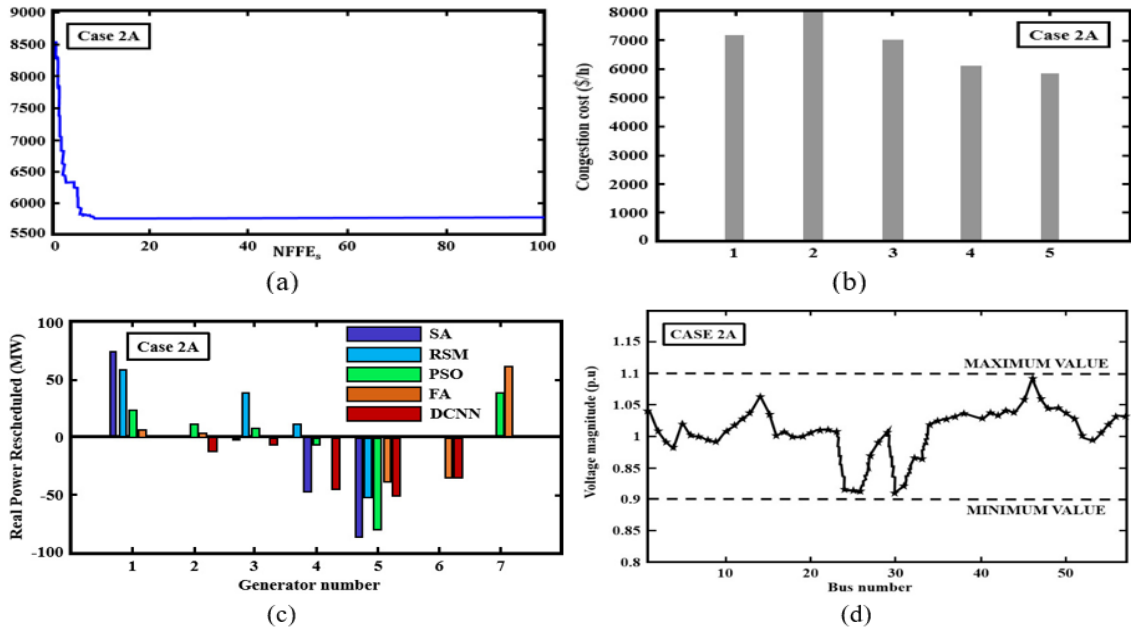


Fig. 7. Case 2A simulation outcomes (a) Convergence profile (b) Congestion cost (c) change in real-power and (d) Voltage magnitude.

The simulation outcomes for case 2A are illustrated in Figure 7, In case 2A, for lines 6-12 and 5-6, line limits are lessened from 50 MW to 35 MW and 200 MW to 175 MW respectively.

With the occurrence of congestion, there is an overloading between lines 6-12 and 5-6. After CM using the proposed methodology in case 2A, the system loss is significantly reduced to 24.558 MW from 69.64 MW.

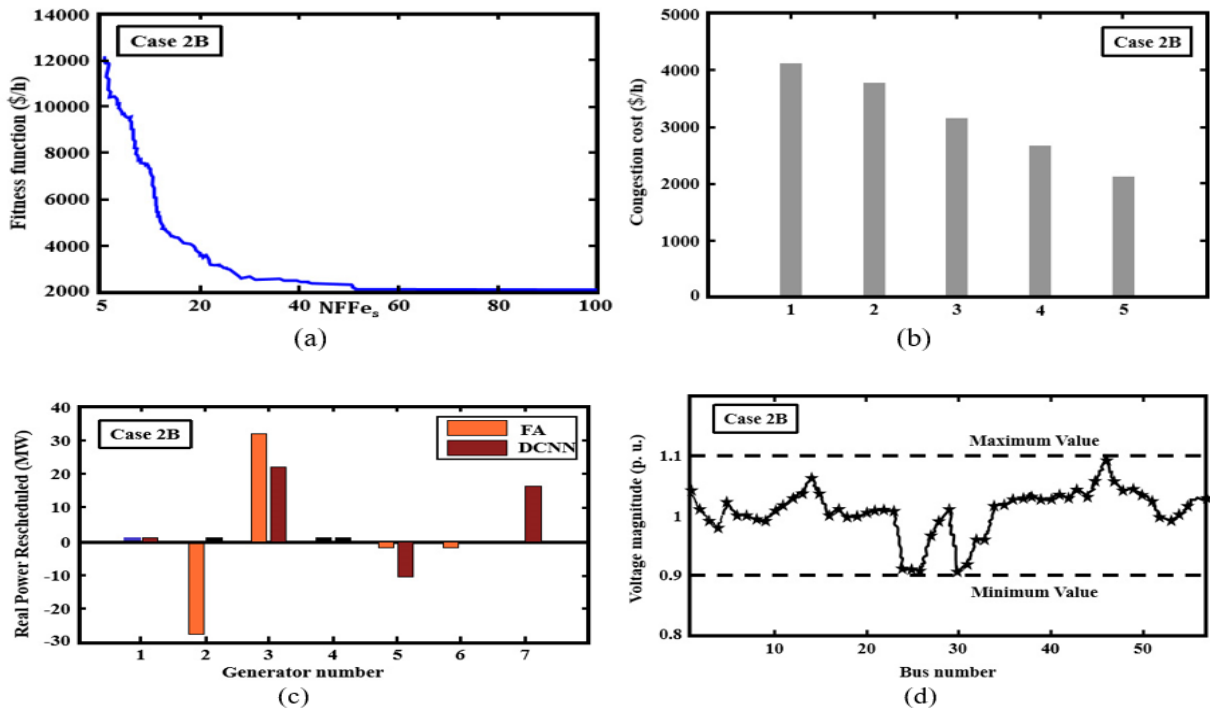


Fig. 8. Case 2B simulation outcomes (a) Convergence profile (b) Congestion cost (c) change in real-power and (d) Voltage magnitude.

whereas simulation outcomes for case 2B are illustrated in Figure 8. In case 2B, line overloading is

created by reducing line limit to 20 MW from 85 MW between lines 2-3. From analyzing Table 4, it is

observed that the proposed approach delivers comparatively better performance in Case 2A also. In this case the system losses are greatly reduced to 28.22 MW from a primary value of 78.23 MW before CM. On the whole, the violation of overloading lines is alleviated by the optimized real-power rescheduling.

IEEE 118-Bus Test System

The proposed DCNN based CM is also evaluated for its effectiveness in a larger test system by deploying it in a revised topology of 118-bus test system, made up of 54 generator buses, 64 load buses and one 186 transmission lines. In this case, the lines between 5 and 8 are disconnected, while the loads between lines 20 and 11 are increased 1.57 times. Figure 8 gives the simulation results for Case 3

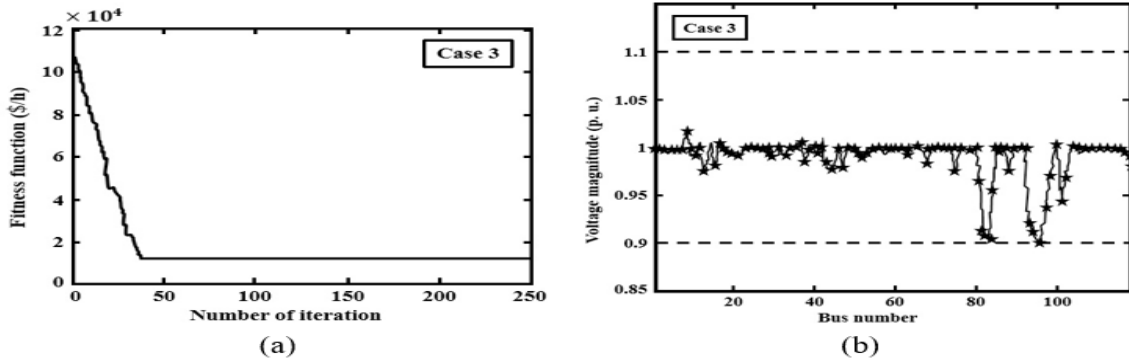


Fig. 9. Case 3 simulation results (a) Convergence profile and (b) voltage magnitude.

In this case, the total system loss becomes 230.505 MW after CM using DCNN. The value of system loss before CM is 277.301 MW. Thus, it is significantly apparent that the proposed DCNN methodology is effective at minimizing congestion in any test system, regardless of its

size. Figure 10 represents the comparison of convergence in terms of cost and iteration. From the curve it is clear that the Improved LA exhibits rapid convergence rate when compared to conventional LA.

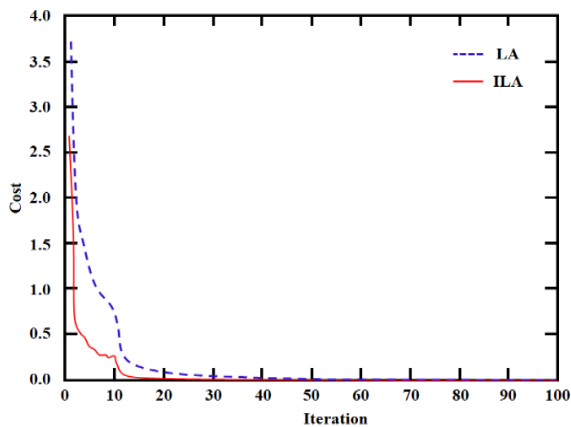


Fig. 10. Comparison of convergence.

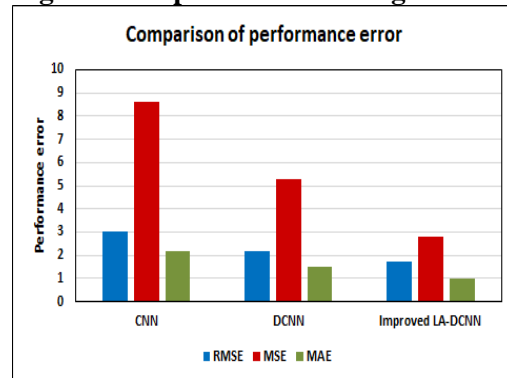


Figure 11 represents the comparison of performance error obtained using CNN, DCNN and Improved LA optimized DCNN related to mean absolute error (MAE), mean

Fig. 11. Comparison of performance error. squared error (RMSE) and root mean squared error (RMSE). The comparison outputs indicate reduced error for the proposed neural network indicating improved computational performance.

Comparison of generator rescheduling for IEEE 30-bus system

Networks	Outputs	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Cascaded DCNN[26]	Actual	40.882	54.409	16.485	21.747	16.083	29.902
	Predicted	40.469	54.222	16.299	21.692	16.073	29.775
	% Error	1.008	0.344	1.128	0.253	0.064	0.307
DNN[27]	Actual	179.098	45.973	21.831	23.637	19.086	-
	Predicted	179.111	46.416	21.605	23.640	18.901	-
	% Error	0.007	0.964	1.038	0.014	0.970	-
Proposed ILA-DCNN	Actual	161.149	55.946	19.627	22.676	18.384	32.916
	Predicted	161.146	55.740	18.707	22.671	18.342	32.775
	% Error	0.003	0.206	0.920	0.005	0.042	0.141

Table 6 represents the comparison of the proposed ILA-DCNN for generator rescheduling with existing works. The listed values indicate that the proposed work outperforms other ones with enhanced prediction outputs indicating reduced error percentage.

CONCLUSION.

This study suggests a novel robust methodology for CM in an unregulated open access electricity environment. In order to satisfy several electrical constraints, problem was developed as multiple-objective function, with losses and congestion costs as vital factors. Conventionally, FACTS devices or nature-inspired algorithms were prominently employed for CM in many works. Meanwhile, in this work, DCNN is chosen for congestion minimization in an unregulated environment for solving the tasks of issues in congestion management due to uncertainties in

load. The working of the DCNN is enhanced further by using Improved LA optimization. The proposed DCNN-based generator rescheduling approach is put to test for its performance in three different test systems of varied sizes. Moreover, its performance is evaluated by analogizing with other existing methodologies in these test systems. The proposed work is simulated in MATLAB and on the basis of the obtained simulation outcomes, it is evident that the proposed Improved LA optimized DCNN displays phenomenal performance in minimizing congestion losses at minimum congestion costs. Moreover, it also outperforms other techniques in terms of its superior performance in managing congestion. The future extension of this work can include the adoption of hybrid optimization algorithms for the enhancement of neural network parameters. Moreover, the effects of optimization over multi-objective functions have to be analyzed in a detailed manner.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

[1] Yadav A. K., Srivastava S. K. and Narain A. "A Review on Congestion Management in Power System," *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*,2020, pp. 359_364, doi:
<https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122988>.

[2] R. Ciavarella, M. Di Somma, G. Graditi and M. Valenti, "Congestion Management in distribution grid networks through active power control of flexible distributed energy resources," *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6, doi:
<https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810585>.

[3] Jagadeeswar Reddy., and Mary Daniel. "Real-power rescheduling of generators for congestion management using a novel satin bower bird optimization algorithm." *Energies* 11, no.1,2018. doi:<https://doi.org/10.3390/en11010183>.

[4] Sankar Murthy Padmini., Bharati raja Chokkalingam., Sanjeev Kumar Padmanabhan., Zbigniew Leonowicz., and Yusuff Adedayo. "Rescheduling of generators with pumped hydro storage units to relieve congestion incorporating flower pollination optimization." *Energies* 12, no. 8, 2019.doi:<https://doi.org/10.3390/en12081477>.

- [5] Dheghihan Moslem., Mohammad Ghiasi., Taher Niknam., Abdollah Kavousi-Fard., Mokhtar Shasadeghi., Noradin Ghadimi, and Farhad Taghizadeh-Hesary. "Blockchain-based securing of data exchange in a power transmission system considering congestion management and social welfare." *Sustainability* 13, no. 1, 2020. doi:<https://doi.org/10.3390/su13010090>.
- [6] Saravanan C, and Anbalagan P. "Multi-objective dragonfly algorithm for congestion management in deregulated power systems." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12,no.7,2021.doi:<https://doi.org/10.1007/s12652-022-04282-1>.
- [7] Prajapati, Vijaykumar K., and Vasundhara Mahajan. "Reliability assessment and congestion management of power system with an energy storage system and uncertain renewable resources." *Energy* 215,2021.doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119134>.
- [8] A. Asrari, M. Ansari, J. Khazaei and P. Fajri, "A Market Framework for Decentralized Congestion Management in Smart Distribution Grids Considering Collaboration Among Electric Vehicle Aggregators," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1147-1158, 2020,doi:<https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2932695>.
- [9] Nguyen Thang Trung., and Fazel Mohammadi. "Optimal placement of TCSC for congestion management and power loss reduction using multi-objective genetic algorithm." *Sustainability* 12, no. 7, 2020. doi:<https://doi.org/10.3390/su12072813>.
- [10] Sarwar, Md, and Anwar Shahzad Siddiqui. "A novel approach for optimal allocation of series FACTS device for transmission line congestion management." *Engineering Reports* 3, no. 6, 2021,doi:<https://doi.org/10.1002/eng2.12342>.
- [11] Bagheri A., A. Rabiee, S. Galavani., and F. Fallahi. "Congestion management through optimal allocation of FACTS devices using Dig SILENT-based DPSO algorithm-a real case study." *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 8, no. 2, 2020.<https://doi.org/10.22098/joape.2019.6094.1462>.
- [12] Kalaimani P., and Mohana K. Sundaram. "Congestion management with improved real power transfer using TCSC in 30 bus system." *International Journal of Information Technology and Management* 20, no. 1-2, 2021. doi: <https://doi.org/10.1504/ijitm.2021.114155>.
- [13] Gautam Anubha., Parsh Ram Sharma., and Yogendra Kumar. "Sensitivity Based Congestion Management in a Deregulated Power System by Optimal Allocation & Parameter Setting of TCSC using Grey Wolf Optimization." *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* 12, no.4,2020.doi:<http://dx.doi.org/10.15676/ijeii.2020.12.4.12>.
- [14] Vijaykumar K Prajapati., Vasundhara Mahajan, and Narayan Prasad Padhy. "Congestion management of integrated transmission and distribution network with RES and ESS under stressed condition." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31, no. 2, 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/20507038.12757>.
- [15] Papun Biswas, and Bijay Baran Pal. "A fuzzy goal programming method to solve congestion management problem using genetic algorithm." *Decision Making: Applications in Management and Engineering* 2, no. 2, 2019. doi:<http://dx.doi.org/10.31181/dmame1902040>
- [16] Roy, Rupam Gupta. "Rescheduling based congestion management method using hybrid Grey Wolf optimization-grasshopper optimization algorithm in power system." *J. Compute. Mech. Power Syst. Control* 2, no. 1, 2019.doi: <https://doi.org/10.46253/jcmps.v2i1.a2>.
- [17] Basha A., Ahamed Jeelani., M. Anitha, and E. B. Elanchezhian. "Optimal placement of TCSC for congestion management in deregulated power system using firefly algorithm." *International Journal of Process Systems Engineering* 5, no. 1, 2019.doi:<https://dx.doi.org/10.1504/IJPSE.2019.10017448>.
- [18] Chatuanramtharnghaka. Benjamin, and Subhashish Deb. "Transmission congestion management in deregulated electricity market using multi-objective grasshopper optimization algorithm." *EAI Endorsed Transactions on Energy Web* 8, no. 33, 2020. doi:<https://doi.org/10.1504/ijitm.2021.114155>.
- [19] Sharma Vatsala., Pratima Walde., and Anwar Shahzad Siddiqui. "Hourly congestion management by adopting distributed energy storage system using hybrid optimization." *Journal of Electrical Systems* 16, no.2, 2020.doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ref.2020.10.006>
- [20] Kaushik Paul., Niranjan Kumar, and Poulami Dalapati. "Bat algorithm for congestion alleviation in power system network." *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, 2021.doi: <https://doi.org/10.1007/s40866-020-00100-9>.
- [21] Ye Le, Yaser Ahangari Nanehkaran, Deborah Simon Mwakapesa, Ruipeng Zhang, Jianbing Yi, and Yimin Mao. "FP-DCNN: a parallel optimization algorithm for deep convolutional neural network." *The Journal of Supercomputing* 78, no. 3,2022, pp: 3791-3813.doi: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-04012-y>.

- [22] Yanyi Li, Jian Shi, and Yuping Li. "Real-Time Semantic Understanding and Segmentation of Urban Scenes for Vehicle Visual Sensors by Optimized DCNN Algorithm." *Applied Sciences* 12, no. 15 (2022): 7811. <https://doi.org/10.3390/app12157811>.
- [23] Pradipta Kumar Mishra, Suresh Chandra Satapathy, and Minakhi Rout. "Segmentation of mri brain tumor image using optimization based deep convolutional neural networks (dcnn)." *Open Computer Science* 11, no. 1 2021, pp: 380-390. doi: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0166>.
- [24] Mahdad B., Srairi K. Interactive artificial ecosystem algorithm for solving power management optimizations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 53-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.09>
- [25] & Electromechanics, 2022, no. 6, pp. 53-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.09>
- [26] Mahdad B., Srairi K. Interactive artificial ecosystem algorithm for solving power management optimizations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 53-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.09>
- [27] & Electromechanics, 2022, no. 6, pp. 53-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.09>
- [28] Mahdad B., Srairi K. Interactive artificial ecosystem algorithm for solving power management optimizations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 53-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.09>
- [29] M. Lindner *et al.*, "Corrective Congestion Management in Transmission Grids Using Fast-Responding Generation, Load and Storage," *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/EPEC52095.2021.9621491>.
- [30] M. Lindner *et al.*, "Corrective Congestion Management in Transmission Grids Using Fast-Responding Generation, Load and Storage," *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Toronto, ON, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/EPEC52095.2021.9621491>.
- [31] Verma., Summit., and V. Mukherjee. "Firefly algorithm for congestion management in deregulated environment." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, no.3,2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.02.001>

Information about authors.



Bosupally Dhanadeepika
Research Scholar,
Department of Electrical
and Electronics
Engineering,
Annamalai University,
Tamil Nādu, India,
The field of scientific
Interest is the restructured
power system. Email:
dhanadeepika@gmail.com



**Muktevi
Chakravarthy,**
Ph.D., Professor,
Department of
Electrical and
Electronics Engine-
ering, Vasavi College
of Engineering,
Telangana, India, Field
of scientific interest is
electrical power
system monitoring and
protection. Email:
[hodeee@staff.vce.ac.i
n](mailto:hodeee@staff.vce.ac.in)



Miniyamuthu Vanithasri,
Ph.D., Professor,
Department of Electrical
and Electronics
Engineering,
Annamalai University,
Field of scientific interest is
power quality in electrical
distribution systems, Email:
[vanithasimman@gmail.co
m](mailto:vanithasimman@gmail.com)

The Method for Generating a Set of Reference Images for Assessing the Condition of Critical Infrastructure Facilities Using Mobile Robots

Tymochko O.¹, Burdin M.², Najafli E.², Tsukan O.², Olizarenko S.¹, Biryukov I.³, Biriukov O.⁴, Tiurina V.⁵, Zakirov S.⁶, Padalka I.¹

¹Flight Academy of National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

²Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

³National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

⁴Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁵Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, Ukraine

⁶Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine

Abstract. The purpose of this work is to improve the accuracy of critical infrastructure condition assessment using mobile robots by considering the geometric distortions of the current images during the formation of a set of reference images. The goal is achieved by determining the sampling step values by angles and sighting height without loss of accuracy. The most important result is the determination of acceptable discretization values in the range of angles and heights of a correlation-extreme navigation system. The significance of the obtained results is in solving the problem of forming a set of reference images, which will reduce the impact of changes in the geometry of sighting on the accuracy of the evaluation of objects. A special feature of the results obtained is the establishment of maximum permissible sampling steps in angles and heights of sight to ensure the required accuracy of object state estimation. When forming a set of reference images, the sampling step by height should be (0.06...0.11)% and (0.12...0.2)% relative to the initial flight altitude for the sighting surface with normal and high object saturation, respectively. The angular sampling step is 10...17 degrees and 6...10 degrees, respectively, for the same surface types. The difference from known works is that the perspective and scale distortions are considered at the stage of formation of a set of reference images, which ensures high accuracy of the system functioning in conditions of orientation and sighting geometry changes.

Keywords: mobile robot, critical infrastructure object, set of reference images, correlation-extremal navigation system, discretization by angles and height.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.12>

UDC: 629.7.052:504.064.36

Metoda de generare a unui set de imagini de referință pentru evaluarea stării instalațiilor de infrastructură critică cu ajutorul roboților mobili

Tymociko O.¹, Burdin M.², Najafli E.², Ţukan O.², Olizarenko S.¹, Biriukov I.³, Biriukov O.⁴, Tiurina V.⁵, Zakirov S.⁶, Padalka I.¹

¹Academia de zbor a Universității Naționale de Aviație, Kropyvnytskyi, Ucraina

²Harkiv Universitatea Națională de Afaceri Interne, Harkiv, Ucraina

³Academia Națională a Gărzii Naționale a Ucrainei, Harkov, Ucraina

⁴Kyiv Institutul Gărzii Naționale a Ucrainei, Kiev, Ucraina

⁵Universitatea Națională a Forțelor Aeriene din Kharkiv, numită după Ivan Kozhedub, Harkiv, Ucraina

⁶Institutul de Cercetare de Informații Militare, Kiev, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei lucrări este de a îmbunătăți exactitatea evaluării stării infrastructurilor critice cu ajutorul roboților mobili prin luarea în considerare a distorsiunilor geometrice ale imaginilor curente în timpul formării unui set de imagini de referință. Scopul este atins prin determinarea valorilor pasului de eșantionare în funcție de unghiuri și de înălțimea de vizionare fără pierderi de precizie. Cel mai important rezultat este determinarea valorilor acceptabile de discretizare în domeniul unghiurilor și înălțimilor unui sistem de navigație corelație-extrem. Semnificația rezultatelor obținute constă în rezolvarea problemei de formare a unui set de imagini de referință, care va reduce impactul modificărilor în geometria de vizare asupra acurateței evaluării obiectelor. O particularitate a rezultatelor obținute constă în stabilirea treptelor maxime admisibile de eșantionare a unghiurilor și înălțimilor de vizare pentru a asigura precizia necesară estimării stării obiectelor. La formarea unui set de imagini de referință, pasul de eșantionare pe înălțime trebuie să fie de (0,06...0,11)% și (0,12...0,2)% în raport cu altitudinea inițială de zbor pentru suprafața de vizionare cu saturație normală și, respectiv, ridicată a obiectelor. Pasul de eșantionare unghiulară este de 10...17 grade și, respectiv, 6...10 grade, pentru aceleași tipuri de suprafețe. Diferența față de lucrările cunoscute constă în faptul că

distorsiunile de perspectivă și de scară sunt luate în considerare în etapa de formare a unui set de imagini de referință, ceea ce asigură o precizie ridicată a funcționării sistemului în condiții de schimbare a orientării și a geometriei de observare.

Cuvinte-cheie: robot mobil, obiect de infrastructură critică, set de imagini de referință, sistem de navigație prin corelație-extremă, discretizare după unghiuri și înălțime.

Метод формирования совокупности эталонных изображений для оценки состояний объектов критической инфраструктуры с помощью мобильных роботов

Тимочко А.И.¹, Бурдин М.², Наджафли Е.², Цукан О.², Олизаренко С.А.¹, Бирюков И.Ю.³, Бирюков А.И.⁴, Тюрина В. Ю.⁵, Закиров С.В.⁶, Падалка И.О.¹

¹Летная академия Национального авиационного университета, Кропивницкий, Украина

²Харьковский национальный университет Внутренних дел, Харьков, Украина

³Национальная академия Национальной гвардии Украины, Харьков, Украина

⁴Киевский институт Национальной гвардии Украины, Киев, Украина

⁵Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина

⁶Научно-исследовательский институт военной разведки, Киев, Украина

Аннотация. Целью данной работы является повышение точности оценки состояний объектов критической инфраструктуры с помощью мобильных роботов путем учета геометрических искажений текущих изображений на этапе формирования совокупности эталонных изображений. Поставленная цель достигается путем определения значений шага дискретизации по углам и высоте визирования, с учетом которых необходимо формировать искомую совокупность без потери точности функционирования. Наиболее существенным результатом является определение допустимых значений дискретизации в диапазоне углов и высот функционирования корреляционно-экстремальной системы навигации. Значимость полученных результатов состоит в решении задачи формирования совокупности эталонных изображений, что существенно снизит влияние изменений геометрии визирования на точность оценки состояния объектов, а также уменьшит влияние внешних факторов на полет мобильных роботов, связанных с порывами ветра и «воздушными ямами». Особенность полученных результатов заключается в установлении максимально допустимых значений шага дискретизации по углам и высоте визирования, при которых обеспечиваются требуемая точность оценки состояний объектов критической инфраструктуры. Установлено, что при формировании совокупности эталонных изображений, обеспечивающих требуемую точность, необходимо и достаточно обеспечить значение шага дискретизации по высоте не более (0.06...0.11)% относительно исходной высоты полета для поверхности визирования с нормальной объектовой насыщенностью и (0.12...0.2)% с высокой объектовой насыщенностью. Шаг дискретизации по углам для поверхности визирования с нормальной объектовой насыщенностью необходимо выбирать в пределах от 10 до 17 градусов, а для поверхности визирования с высокой объектовой насыщенностью от 6 до 10 градусов. Отличие от известных работ заключается в учете перспективных и масштабных искажений еще на этапе формирования совокупности эталонных изображений, что существенно упрощает алгоритм вторичной обработки при сравнении изображений, и обеспечивает высокую точность функционирования системы в условиях изменений ориентации и геометрии визирования.

Ключевые слова: мобильный робот, объект критической инфраструктуры, совокупность эталонных изображений, корреляционно-экстремальная система навигации, дискретизация по углам и высоте.

INTRODUCTION

Одним из приоритетных направлений при оценке состояния объектов критической инфраструктуры, воздушных линий электропередач над сушей и морем, проведении поисково-спасательных работ в водной акватории является дальнейшее развитие и использование летающих мобильных роботов (МР). Они позволяют получать необходимую информацию об объектах визирования независимо от сложности доступа к ним, погодных, сезонных и суточных условий. На борту современных мобильных роботов устанавливаются

высокоточные корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭСН), которые одновременно являются и системами извлечения информации об объектах визирования.

Эффективность применения таких МР определяется многими внутренними и внешними факторами. Так, одно из важнейших мест среди таких факторов, имеющих случайный характер, занимают геометрические условия визирования и ориентации мобильных роботов. Данные условия могут приводить к несоответствию формируемых в ходе мониторинга текущего изображения (ТИ) с заранее подготовленным эталонным (ЭИ). Это связано со сложностью обеспечения

идентичных условий получения исходной информации, необходимой для формирования как эталонных, так и текущих изображений. В результате возникает несоответствие за счет перспективных и масштабных искажений, которые необходимо учитывать на этапе вторичной обработки при сравнении изображений. Это обстоятельство неизбежно приводит к необходимости устранения таких искажений в реальном масштабе времени, что усложняет процедуру формирования результата сравнения изображений, а, соответственно, снижает быстродействие при вторичной обработке КЭСН. Кроме того, снижается точность функционирования КЭСН.

Одним из возможных способов решения этой задачи при оценке состояния объектов критической инфраструктуры, воздушных линий электропередач, осуществлении поисково-спасательных работ является учет возможных перспективных и масштабных искажений еще на этапе формирования совокупности ЭИ. Это возможно путем построения совокупности ЭИ для значений шага дискретизации по углам и высоте визирования, при которых будет обеспечиваться минимально допустимая корреляционная связь между близлежащими фрагментами изображений, образующими исходную совокупность по выбранному информативному показателю. Такой подход обеспечит высокие точностные показатели КЭСН, а несоответствие сравниваемых изображений возможно лишь в пределах дискрета по углам и высоте визирования.

Таким образом, исходя из требований обеспечения точности, можно определить значения шага дискретизации в пределах диапазона высот и углов визирования. Кроме того, данный подход обеспечит при формировании необходимой совокупности ЭИ их минимальное число без потери точности и при наибольшем быстродействии. В результате реализации предложенного подхода будет обеспечена надежная оценка состояния объектов критической инфраструктуры и воздушных линий электропередач, осуществление поисково-спасательных работ и т. д.

К настоящему времени разработке методов и алгоритмов повышения эффективности функционирования мобильных роботов посвящено значительное число публикаций. Однако формированию совокупности ЭИ, применение которой приводит к

существенному снижению или полному устранению влияния перспективных и масштабных искажений, должного внимания уделено не было. В этой связи в данной статье предлагается метод формирования совокупности ЭИ, используемых в МР для оценки состояний объектов критической инфраструктуры, воздушных линий электропередач над сушей и морем, осуществления поисково-спасательных работ в водной акватории, с учетом снижения или устранения влияния масштабных и перспективных искажений.

Рассмотрим известные пути и результаты решения задачи повышения эффективности КЭСН и формирования для них эталонных изображений.

PUBLISHED LITERATURE ANALYSIS

Chakraborty, P. et al. (2022) представили результаты обнаружения подделки дублирования регионов с использованием баз данных COMOFORD, используя дискретное косинусное преобразование (DCT), k-мерное дерево (kd-дерево) для эффективной сортировки и надежный метод сопоставления. Используя блок размером 16×16 , разделенный на четыре части, можно обнаруживать подделку для изображений PNG с большей производительностью, выделяя изображения с коэффициентом качества 0.5 и пороговым значением 10. Хорошие результаты получены также для изображений JPEG.

Rohini A Maind et al. (2014) представили метод, который позволяет сравнивать дискретное косинусное преобразование (DCT) и основной компонентный анализ (PCA) для выявления подделки изображений.

Tymochko O. et al. (2020) представили результаты синтеза оптимальных ЭИ. Синтез основан на использовании понятия шкалы теории измерений. Яркостную компоненту ЭИ, сдвиги и повороты ЭИ относительно ТИ, а также операцию перебора фрагментов ТИ, имеющих размеры ЭИ, предложено формализовать в терминах теории образов Гренандера.

Tarshin V. A. et al. (2015) предложили метод оперативного формирования эталонного изображения с использованием поля фрактального анализа. Вопросы формирования совокупности изображений не рассматривались.

Sotnikov A. et al. (2017) предложили решение задачи локализации объекта привязки на фоне ложных помех. Влияние геометрических

искажений не учитывалось.

Rakhomov A.A. et al. (2015) исследовали влияние атмосферы на формируемое изображение. Разработан комплекс программ по устранению как любых видов атмосферных искажений, так и темного ночного фона с целью улучшения разборчивости изображений.

Fernandes, L. et al. (2008) рассмотрели подходы к обнаружению и локализации контуров объектов на изображениях с использованием преобразования Хафа.

Fursov, V. A. et al. (2013) исследовали влияние масштабных искажений на локализацию объекта. При этом использовалось одно ЭИ.

S. Maji & J. Malik (2009) представили результаты оптимального обнаружения объектов на изображениях.

A. N. Katulev et al. (2014) предложили метод обнаружения объектов с помощью оптико-электронных систем без априорной информации о фоне мишени-сцены.

Trefilov P.M. (2019) показал целесообразность применения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (PINS) в составе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрены физические и алгоритмические методы улучшения PINS. Показано, что физический метод позволяет снизить скорость накопления ошибок, но не может полностью их устранить. Применение алгоритмических методов, основанных на интеграции с другими измерительными системами, позволяет уменьшить ошибки PINS.

Scaramuzza D., et al. (2014) представили экспериментальные результаты, демонстрирующие автономную навигацию трех микролетательных аппаратов (MAV) в неизвестной среде без GPS, но с использованием трехмерного картографирования и оптимального покрытия. Ограничением исследования является отсутствие информации о возможностях использования данного подхода для контроля состояния объекта и формирования ЭИ.

P. Sabeena Burvin & J. Monica Esther (2014) показали, что ретушь меньше изменяет изображения. Это просто усиливает некоторые черты изображения. Рассмотрены подвиды цифровой ретуши изображений, в основном, техническая ретушь и креативная ретушь.

Kostyashkin L. N. et al. (2014) рассматривают подходы к разработке

комбинированной системы технического зрения для авиации. Достоинством работы является разработка алгоритмических методов снижения сложности задачи совмещения изображений на основе геометрического совмещения, необходимость которого связана с картографическими и навигационными ошибками, и визуализации геометрически совмещенных изображений с учетом этапа полета, условия выполнения задач и видимости. Недостатком работы является невозможность использования разработанных методов без участия пилота.

Loginov A.A. et al. (2015) исследовали снижение вычислительной сложности объединения разнородных изображений в системе комбинированного зрения самолета.

Elesina S. & Lomteva O. (2018) приводят результаты исследования генетического алгоритма с целью получения оптимальных настроек при его использовании в комбинированных системах технического зрения. Показана целесообразность использования расширенных углов эталонных изображений при поиске глобального экстремума. Показано, что при использовании такого подхода производительность системы увеличивается в 5 раз. Однако авторы не учли влияние возможных ракурсов эталонных и текущих изображений на реализуемость в реальном времени.

Sotnikov O et al. (2020) рассмотрели методы обеспечения точности навигации МР, учли влияние стохастических факторов на формирование текущих изображений. Однако в работе не уделено внимание вопросам формирования совокупности эталонных изображений.

Yeromina N. et al. (2021) предложили методы синтеза эталонных изображений для навигации БПЛА в нормальной и гипершкалах.

Vorobiov O. et al. (2020) предложили пути выделения информации в условиях изменения состояния трассы распространения рабочих сигналов и априорной неопределенности информативных параметров объектов на поверхности визирования (ПВ).

D. Vaishnavi & T.S. Subashini (2019) предлагают новый подход для обнаружения подделки путем копирования и перемещения с помощью локальных признаков, основанных на симметрии. Предложенная схема также может обнаруживать подделки множественных копий и локализовать обнаруженные области.

Meena K.V. & Tyagi V. (2019) предлагают новый метод обнаружения подделки

изображений путем копирования и перемещения с использованием моментов Гаусса-Эрмита (GHM). Экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод позволяет точно локализовать области копирования-перемещения в подделанном изображении.

Salah, A. et al. (2020) раскрывают проблемы распараллеливания вычислений моментов кватернионов. Предлагается метод обработки цветных изображений.

Hamza, H. M. et al. (2023) предлагают новую систему обнаружения подделки изображений с параллельным копированием и перемещением (PCMIFD), использующую многоядерные процессоры.

Анализ литературы свидетельствует о перспективности применения МР для мониторинга наземных объектов и разработки методов формирования эталонных изображений для сокращения объема операций. В тоже время не решенным остается вопрос снижения объема вычислительных затрат при осуществлении контроля состояний объектов критической инфраструктуры с помощью летающих мобильных роботов, оснащенных корреляционно-экстремальной системой навигации, на основе минимизации числа фрагментов эталонных изображений, позволяющих достичь поставленную цель с учетом необходимости обеспечения требуемых точности и надежности контроля состояния объектов критической инфраструктуры.

METHODS, RESULTS, AND DISCUSSION

Решающая функция (РФ), как результат сравнения текущего и эталонного изображений, в общем виде описывается выражением:

$$\mathbf{R}(\mathbf{r}, t, \theta, \theta_i) = \mathbf{F}_{SP}(\mathbf{S}_{CI}(\mathbf{r}, t, \theta), \mathbf{S}_{RI}(\theta_i)), \quad (5)$$

где \mathbf{F}_{SP} – оператор сравнения изображений;

$\mathbf{S}_{CI}(\mathbf{r}, t, \theta)$ – текущее изображение;

$\mathbf{S}_{RI}(\theta_i)$ – эталонное изображение.

В соответствии с принятыми у Chakraborty et al. (2022), Rohini A Maind et al. (2014), Tarshin V. A. et al. (2015), Vorobiov O. et al. (2020), D. Vaishnavi and T.S. Subashini (2019) подходами, текущие изображения \mathbf{S}_{CI} будем описывать значениями яркости объектов и фонов визируемой поверхности в элементах разрешения:

$$\mathbf{S}_{CI} = \|S(i, j)\|, \quad (2)$$

где

$$S(i, j) = \begin{cases} S_v(i, j), & \text{при } S(i, j) \in \mathbf{S}_v; \\ S_w(i, j), & \text{при } S(i, j) \in \mathbf{S}_w; \end{cases} \quad (3)$$

$S_v(i, j)$ – яркость элемента изображения v -го объекта \mathbf{S}_v ;

$S_w(i, j)$ – яркость элемента изображения w -го фона \mathbf{S}_w ;

V и W – количество объектов критической инфраструктуры и фонов различной яркости и формы на исходном изображении.

Эталонное изображение описывается также матрицей значений яркости соответствующих пикселей:

$$\mathbf{S}_{RI} = \|S_{RI}(m, l)\|, \quad m = \overline{1, M}, \quad l = \overline{1, L},$$

где M, L – размеры ЭИ.

Постановка задачи.

Для сформированного в некоторый момент времени t_m ТИ $\mathbf{S}_{CI}(h_i, \alpha_j, \beta_k, \nu_l, \varphi_s)$ в диапазоне возможных изменений высоты полета МР $h_i \in [h_{\min}, h_{\max}]$, углов визирования $\alpha_j \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, $\beta_k \in [\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ и ориентации \mathbf{v} гипотетически необходимо сформировать совокупность ЭИ $\{\bullet\}$, использование которой в ходе определения $\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ даст возможность минимизировать влияние геометрических искажений и получить наилучшую точность оценки состояния объектов критической инфраструктуры: $\Delta \mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \rightarrow \min$.

Другими словами, необходимо найти параметры дискретизации по высоте Δh , углам визирования $\Delta \alpha, \Delta \beta$ и ориентации $\Delta \mathbf{v}$, использование которых в ходе формирования совокупности ЭИ $\{\bullet\}$ обеспечит в дальнейшем при выборе одного из фрагментов ЭИ $\Delta \mathbf{R}(\mathbf{r}, t) \rightarrow \min$.

Решение задачи.

Рассмотрим влияние геометрических искажений на формируемое КЭСН ТИ. Для этого воспользуемся геометрическими построениями.

Влияние масштабных искажений показано на рис. 1, влияние перспективных искажений – на рис. 2.

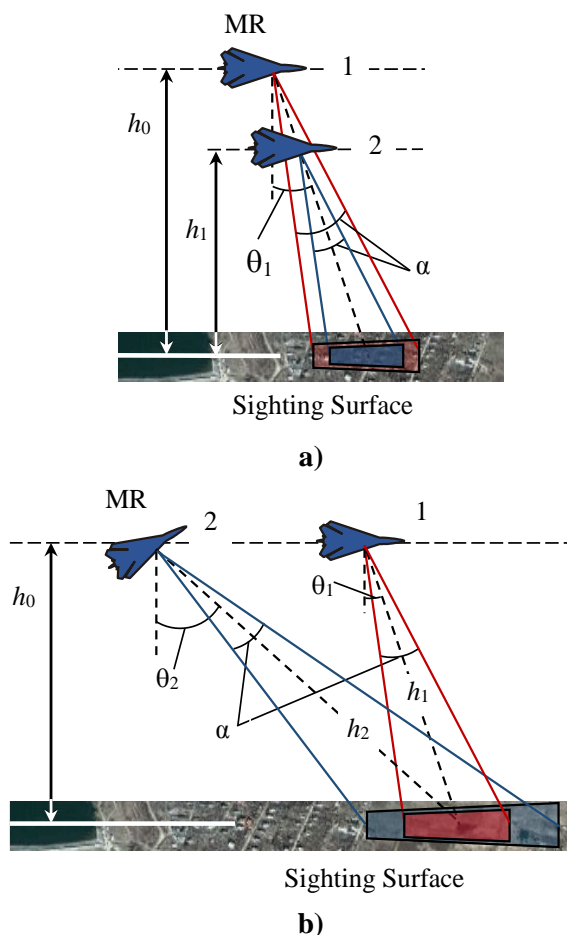


Рис. 1. Геометрия визирования при наличии: а) масштабных; б) перспективных искажений
Fig. 1. Sighting geometry in the presence of: a) scale; b) perspective distortion.

Изменения высоты полета МР, как видно из рис. 1 а), приводят к линейному изменению размеров изображения, а изменения углов визирования КЭСН (рис. 1 б)) – к трапецидальному (нелинейному) изменению размеров ТИ ($m_1 \times n_1, m_2 \times n_2$).

Масштабные искажения ТИ относительно исходного размера ($m_1 \times n_1$) изображения будут описываться следующими выражениями:

$$m_1 = mh_0 \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right), \quad (4)$$

$$n_1 = nh_0 \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right), \quad (5)$$

где $\Delta h = h_0 - h_1$ – изменение высоты МР.

Изменение углов визирования также приводит к искажениям размеров ТИ, которые можно определить в соответствии со следующими выражениями:

$$m_1 = m \frac{\cos(\theta_1 + \Delta\theta)}{\cos(\theta_1)}, \quad (6)$$

$$n_1 = n \frac{\cos(\theta_1 - \alpha/2)}{\cos(\theta_1 + \Delta\theta - \alpha/2)}, \quad (7)$$

$$n_2 = n \frac{\cos(\theta_1 + \alpha/2)}{\cos(\theta_1 + \Delta\theta + \alpha/2)}, \quad (8)$$

где $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ – изменение угла ориентации МР.

В отличие от масштабных искажений, перспективные искажения приводят не только к изменению наклонной высоты, но и к изменению относительных размеров ТИ. Это важный момент, который должен быть обязательно учтен при выборе ЭИ из совокупности, поскольку может возникать неоднозначность из-за высокой корреляции изображений для других геометрических условий визирования.

Таким образом, с учетом геометрических искажений РФ может быть представлена в общем виде выражением:

$$R(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\theta) = F_{SR} \left(\begin{matrix} S_{RI}(m_1, n_1), \\ S_{CI}(m_2(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\theta), n_2(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\theta)) \end{matrix} \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что чем меньше шаг дискретизации, тем выше будет степень взаимной корреляции ЭИ и ТИ. Оценим влияние геометрических искажений на степень корреляции сравниваемых изображений. Для этого воспользуемся результатами статистического моделирования, выполненного с использованием классического корреляционного алгоритма для типовых поверхностей визирования с нормальной F_1 ($V_{min} < V \leq V_{max} = 10 \dots 15$) и высокой объектовой насыщенностью F_2 ($V > V_{max}$).

При моделировании предполагалось, что размер ЭИ составляет 100×100 пикселей. Размеры ТИ соответствуют выбранному режиму съемки с нормальной и высокой объектовой насыщенностью, равной 1280×720 пикселей.

Высота полета МР выбиралась от 500 до 600 м. В качестве информативного параметра для описания объектов изображения использовались как яркость самих объектов, так и контраст между ними.

Результаты моделирования влияния масштабных искажений на коэффициент взаимной корреляции (КВК) сравниваемых изображений приведены на рис. 2., а перспективных искажений – на рис. 3.

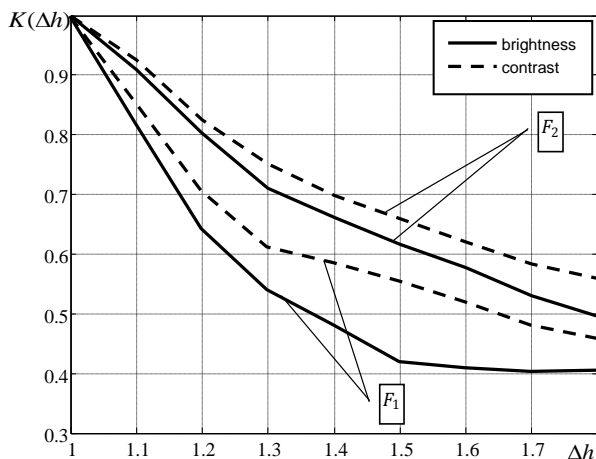


Рис.2. Зависимость КВК от изменений высоты формирования ТИ.
Fig.2. Dependence of CCC on changes in the height of TI formation.

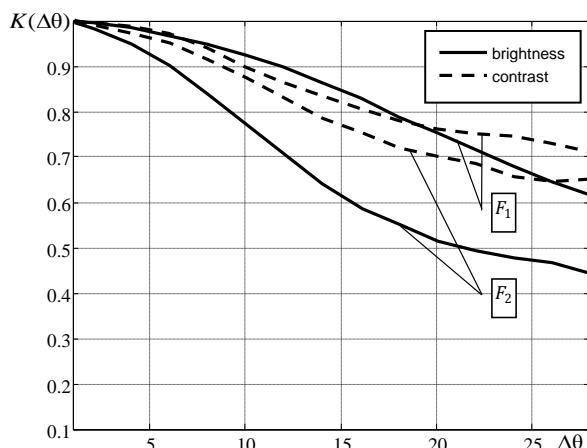


Рис.3. Зависимость КВК от изменений угла визирования.
Fig. 3. Dependence of CCC on changes in viewing angle.

При определении зависимости КВК от изменений угла визирования предполагалось, что $\alpha = 40^\circ$.

Анализ приведенных на рис.2 и рис. 3 результатов моделирования показывает, что формирование унимодальной РФ, обеспечивающей высокую точность оценки состояний ОКИ ($K(\Delta h) = 0.8...0.9$), возможно при шаге дискретизации по высоте в пределах 0.06...0.11 относительно исходной высоты полета для ПВ с нормальной объектовой насыщенностью. Для ПВ с высокой объектовой насыщенностью величина этого параметра может находиться в пределах 1.12...1.2. Шаг дискретизации по углам для ПВ с нормальной объектовой насыщенностью

необходимо выбирать в пределах от 10 до 17 градусов, а для ПВ с высокой объектовой насыщенностью – от 6 до 10 градусов. Целесообразность и возможность использования большего шага дискретизации по высоте и углам визирования для высоко объектовых ПВ обусловлена неизбежностью появления ложных объектов на изображениях при изменении условий визирования.

Учтем, как было отмечено выше, что перспективные искажения, в отличие от масштабных, приводят не только к изменению наклонной высоты, но и к изменению относительных размеров ТИ.

То есть, можно уменьшить число фрагментов ЭИ в искомой совокупности, поскольку степень корреляции для определенных изменений углов и высот может быть одинаковой. Это условие можно записать в виде:

$$K(\Delta h) = K(\Delta \theta). \quad (10)$$

Выполнение условия (10) позволяет уменьшить число фрагментов ЭИ в совокупности, а также снизить вычислительную нагрузку при формировании РФ. В тоже время возникает неоднозначность в ходе выбора фрагмента ЭИ из совокупности. Устранение неоднозначности в процессе выбора ЭИ устраняется на этапе вторичной обработки.

CONCLUSIONS

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан метод формирования совокупности эталонных изображений. В основу метода положено определения значений шага дискретизации по углам и высоте визирования КЭСН, что позволяет учесть влияние геометрических искажений на работу системы на этапе формирования совокупности эталонных. Такой подход существенно упрощает алгоритм вторичной обработки системы и обеспечивает высокую точность ее функционирования в условиях изменений геометрии визирования. Кроме того, существенно снижается объем вычислительных затрат за счет формирования минимально допустимого количества эталонных изображений в совокупности по параметрам дискретизации по углам и по высоте.

В ходе дальнейших исследований планируется проведение ряда экспериментов для сбора статистического материала и пополнения базы данных с целью получения наилучшей точности оценки состояния объектов критической инфраструктуры.

References

- [1] Chakraborty, P., Tafhim, S. N., Khatun, M., Abu Sayed, M., Zufiker, S., Paul, P., ... & Choudhury, T. (2022). Detection of Copy–Move Image Forgery Applying Robust Matching with KD Tree Sorting. In *Pattern Recognition and Data Analysis with Applications* (pp. 283-296). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [2] Rohini A Maind, Alka Khade, and D K Chitre, "Image Copy Move Forgery Detection using Block Representing Method," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol. 4, no. 2, pp. 49-53, May 2014.
- [3] Tymochko O., Ttystan A., Ushan V., Yeromina N., Dmitriyev O., Mazharov V., Padalka I., Hannoshyna I., Masik I., Zazirnyi A. The Synthesis of the Reference Image and Algorithms for Vehicle Navigation Systems, *IJETER*, 8(3), 2020, pp. 853-858. doi:10.30534/ijeter/2020/40832020.
- [4] Tarshin V. A. Podgotovka etalonnykh izobrazheniy dlya vysokotochnykh korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii na osnove formirovaniya polya fraktal'nykh razmernostey [Tekst] / V. A. Tarshin, A. M. Sotnikov, R. G. Sidorenko, V. V. Megel'bey // *Sistemi ozbroënnykh i vîys'kova tekhnika*. – 2015. – № 2. – S. 142 -144.
- [5] Sotnikov A., Tarshyn V., Yeromina N., Petrov S., Antonenko N. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. № 9 (87). pp. 68–74. – DOI:10.15587/1729-4061.2017.101920.
- [6] Pakhomov A.A. Obrabotka iskazhennykh atmosferoy izobrazheniy, poluchennykh aviatsionnymi kompleksami [Tekst] / A.A. Pakhomov, A.A. Potapov // *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. – Radiotekhnika – 2015. – №5. – S. 144-145.
- [7] Fernandes, L. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme [Text] / Leonardo A.F. Fernandes, Manuel M. Oliveira // *Pattern Recognition*. – 2008. – V. 41, N 1. – P. 299-314. – ISSN 0031-3203.
- [8] Fursov, V. A. Lokalizatsiya konturov ob'yektov na izobrazheniyakh pri variatsiyakh masshtaba s ispol'zovaniyem preobrazovaniya Khafa [Tekst] / V. A. Fursov, S. A. Bibikov, P. YU. Yakimov // *Komp'yuternaya optika*. – 2013. – T. 37, № 4. – S. 496-502.
- [9] Maji, S. A max-margin Hough transform for object detection [Text] / S. Maji, J. Malik. // *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2009.
- [10] Katulev, A. N. Adaptivnyy metod i algoritm obnaruzheniya malokontrastnykh ob'yektov optiko-elektronnykh sredstvov [Tekst] / A. N. Katulev, A. A. Kolonskov, A. A. Khramichev, S. V. Yagol'nikov // *Opticheskiy zhurnal*. – 2014. – № 2(81). – S. 29-39.
- [11] Trefilov P.M. Comparative Analysis of Improving Accuracy of Inertial Navigation Systems. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences. Proceedings of XIII All-Russian meeting on control problems VSPU-2019. Trapeznikov Institute of control problems. V.A. Trapeznikov RAS, Russia, 2019. pp. 470-474.
- [12] Scaramuzza D., et al. "Vision-controlled micro flying robots: from system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments" in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Volume 21, Issue: 3, pp. 26-40, Sept. 2014.
- [13] P. Sabeena Burvin and J. Monica Esther, "Analysis of Digital Image Splicing Detection," *IOSR Journal of Computer Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 10-13, Mar-Apr 2014.
- [14] Kostyashkin L. N., Loginov A. A., Nikiforov M. B. Problem aspects of the combined vision system of flying vehicles // *Izvestiya SFU*. 2013. № 5. C. 61-65.
- [15] Loginov A.A., Muratov E.R., Nikiforov M.B., Novikov A.I. Reducing the computational complexity of image matching in aviation vision systems // *Dynamics of Complex Systems*. 2015. T. 9, № 1. C. 33-40.
- [16] Elesina S., Lomteva O. Increase of image combination performance in combined vision systems using genetic algorithm // *Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing*. – Budva, Montenegro.– 2014. PP. 158-161.
- [17] Sotnikov O., Kartashov V., Tymochko O., Sergiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Flores-Fuentes W. Methods for ensuring the accuracy of radiometric and optoelectronic navigation systems of flying robots in a developed infrastructure (eds) *Machine Vision and Navigation*. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-22587-2_16.
- [18] Yeromina N., Kurban V., Mykus S., Peredrii O., Voloshchenko O., Kosenko V., Kuzavkov V., Babeliuk O., Derevianko M., Kovalov H. The creation of the database for mobile robots navigation under the conditions of flexible change of flight assignment. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2021, 11(5), pp. 37–44. doi.org/10.46338/ijetae0521_05.
- [19] Vorobiov O., Yeromina N., Petrov S., Ivashchuk O., Ivansky V., Pavlunko M., Nevhad S. The Study of Accuracy Characteristics of Information Extraction System Under Conditions of Change of State of the Working Signals Propagation Path and A-Priori Uncertainty About the Informative Parameters of Objects on the Sighting Surface, *IJETER*, 8 (9), 2020, pp. 5740-5745, doi:10.30534/ijeter/2020/134892020.
- [20] D. Vaishnavi, T.S. Subashini Application of local invariant symmetry features to detect and localize image copy move forgeries, *Journal of Information Security and Applications*, Volume 44, February 2019, pp. 23-31, <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2018.11.001>.
- [21] Meena, K.B., Tyagi, V. A copy-move image forgery detection technique based on Gaussian-Hermite

moments. *Multimed Tools Appl* 78, 33505–33526 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08082-2>.
 [22] Salah, A., Li, K., Hosny, K. M., Darwish, M. M., & Tian, Q. (2020). Accelerated CPU–GPU implementations for quaternion polar harmonic transform of color images. *Future Generation Computer Systems*, Vol.107, pp.368-382, <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.01.051>.

[23] Hamza, H. M., Hosny, K. M., & Salah, A. (2023). Accelerating the Process of Copy-Move Forgery Detection Using Multi-core CPUs Parallel Architecture. In *Recent Advances in Computer Vision Applications Using Parallel Processing* (pp. 87-105). Cham: Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-031-18735-3.

About authors.



Tymochko Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Flight Academy of the National Aviation University, area of scientific interests: decision support systems, motion control, automation, E-mail: tymochko.alex@gmail.com



Mykhailo Burdin, Doctor of Law, Professor, Vice-Chancellor, Kharkiv National University of Internal Affairs, area of interest: legal aspects of cybersecurity
 E-mail: burdin@univd.edu.ua



Najafli Emin, PhD, Kharkiv National University of Internal Affairs
 Area of interest: legal aspects of cybersecurity
 E-mail: emin.najafli@univd.edu.ua



Tsukan Oksana, PhD in Law, associate professor, Kharkiv National University of Internal Affairs, area of interest: legal aspects of cybersecurity. E-mail: oksana.tsukan@gmail.com



Olizarenko Serhij, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department, Flight Academy of the National Aviation University, area of scientific interests: mathematical modeling, E-mail: solizarenko71@gmail.com



Biryukov Igor, Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Academy of the National Guard of Ukraine, area of interest: armaments and military equipment
 E-mail: colonel007@i.ua



Biriukov Oleksii, Candidate of Technical Sciences; Head of Department; Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine; area of scientific interests: the latest models of weapons; E-mail: aleksej_b29@rambler.ru



Tiurina Valeriia, PhD student of the scientific and organizational department, Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub, area of scientific interests: navigation, E-mail: valery.kharkiv@gmail.com



Zakirov Serhii, Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Senior Researcher, Research Institute of Military Intelligence, area of scientific interests: the creation and use of electronic warfare means; E-mail: ss12serhey@gmail.com



Padalka Ivan, PhD in Engineering, Lecturer of department, Flight Academy of the National Aviation University, area of scientific interests: navigation, E-mail: antuaavia@gmail.com

Studies of the Change in the Time Constants of the Discharge of the Capacitor to Predict the Residual life of the Operation of the Electric Motor

Kryvonosov V., Matviienko A.

National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

Abstract. Forecasting the resource of the electric motor makes it possible to increase the reliability of the operation of the electrical complex. The aim of the work is to study the possibility of using changes in the capacitor discharge time constants under conditions of local reactive power compensation as a criterion parameter for predicting the life of an electric motor. To achieve this goal, the following tasks were solved: an analysis of methods for predicting the resource of an electric motor was carried out, a differential equation was analyzed, and relationships between the insulation resistance and the capacitor discharge time constants were established. The most important result is the establishment of the relationship between the state of the insulation and the value of the time constant of the discharge of the capacitor. The most significant result is that the change in the time constant of the discharge is used as a criterion parameter for predicting the resource of the electric motor. The significance of the study is that the value obtained after the first shutdown of the electric motor is taken as the base value of the discharge time constant. The limiting values of the discharge time constants make it possible to estimate the resource of the electric motor after each shutdown. A method and a device for monitoring open-phase network modes are proposed, and when disconnected, control the value of the insulation resistance of the electric motor and predict the residual life of the electric motor.

Keywords: motor winding insulation, prediction, residual life, reactive power compensation, damping time constant.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.13>

UDC: 621.313.333.2

Studii ale modificării constantelor de timp ale descărcării condensatorului pentru a prezice durata de viață reziduală a funcționării motorului electric

Kryvonosov V., Matviienko A.

Universitatea Națională de Bioresurse și Managementul Naturii din Ucraina,
Kiev, Ucraina

Abstract. Prognoza resursei motorului electric face posibilă creșterea fiabilității funcționării complexului electric. Scopul lucrării este de a studia posibilitatea utilizării modificărilor constantelor de timp de descărcare a condensatorului în condiții de compensare locală a puterii reactive ca parametru criteriu pentru prezicerea duratei de viață a unui motor electric. Pentru atingerea acestui scop, au fost rezolvate următoarele sarcini: a fost efectuată o analiză a metodelor de predicție a resursei unui motor electric, a fost analizată o ecuație diferențială și s-au stabilit relații între rezistența de izolație și constantele de timp de descărcare a condensatorului. Cel mai important rezultat este stabilirea relației dintre starea izolației și valoarea constantei de timp a descărcării condensatorului. Cel mai semnificativ rezultat este că modificarea constantei de timp a descărcării este utilizată ca parametru criteriu pentru prezicerea resursei motorului electric. Semnificația studiului este că valoarea obținută după prima oprire a motorului electric este luată ca valoare de bază a constantei de timp de descărcare. Valorile limită ale constantelor de timp de descărcare fac posibilă estimarea resursei motorului electric după fiecare oprire. Sunt propuse o metodă și un dispozitiv pentru monitorizarea modurilor de rețea în fază deschisă, iar atunci când sunt deconectate, controlează valoarea rezistenței de izolație a motorului electric și prezice durata de viață reziduală a motorului electric.

Cuvinte-cheie: izolarea înfășurării motorului, predicție, durată reziduală, compensare a puterii reactive, constantă de timp de amortizare.

Исследования изменения постоянных времени разряда конденсатора для прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации электродвигателя

Кривонос В.Е., Матвиенко А.М.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
Киев, Украина

Аннотация. Ежегодно аварийный выход из эксплуатации асинхронных электродвигателей составляет до 20–25 % от установленных, а в некоторых случаях до 30%. Прогнозирование остаточного ресурса эксплуатации электродвигателя позволяет повысить надежность эксплуатации электротехнического комплекса. Целью работы является исследование возможности использовать изменения постоянных времени разряда конденсатора в условиях локальной компенсации реактивной мощности, потребляемой электродвигателем, в качестве критериального параметра для прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации электродвигателя. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ тепловых, частотно-резонансных и электрических методов прогнозирования остаточного ресурса электродвигателя, проанализированы характеристические корни дифференциального уравнения второго порядка, установлены взаимосвязи изменения сопротивления изоляции обмоток и постоянных времени разряда конденсатора. Важнейшим результатом является установление однозначной взаимосвязи состояния изоляции и величины постоянной времени затухания напряжения на конденсаторе. Наиболее существенным результатом является то, что изменение постоянной времени впервые использовано в качестве критериального параметра, для прогнозирования остаточного ресурса диэлектрических свойств корпусной изоляции электродвигателя. Значимость исследования является то, что за базовое значение постоянной времени затухания принимается значение, полученное после первого отключения электродвигателя от сети. Критическое значение постоянной времени затухания процесса определяется по числовым значением фазной емкости и допустимого, не менее 0,5 МОм, сопротивления корпусной изоляции. Определены граничные значения постоянных времени затухания напряжения на конденсаторе, что позволяет сделать оценки остаточного ресурса электродвигателя по текущему состоянию изоляции электродвигателя после каждого его отключения от сети. Предложен способ и разработано устройство, позволяющее в период работы электродвигателя контролировать неполнофазные режимы напряжений сети и токовых цепей, а при отключении электродвигателя от сети контролировать величину сопротивления изоляции статорных обмоток электродвигателя и кабеля, а также прогнозируется остаточный ресурс эксплуатации электродвигателя.

Ключевые слова: изоляция обмоток электродвигателя, прогнозирование, остаточный ресурс, компенсация реактивной мощности, постоянная времени затухания.

Introduction

The simplicity and reliability of asynchronous electric motors (AM) with the use of frequency smooth speed control for the driven mechanism are the foundation of an automated electro-technological complex (ETC). According to the authors Tokarev O.V., Boryagin D.O., Sheremet O.T. [1], more than 80% of all electrical equipment in ETC consists of AM with a squirrel-cage rotor. However, the annual failure rate of AM amounts to 20-25% of the installed AM, and in some cases, it reaches up to 30%, as mentioned by the authors Gubarevich O.V., Galway S.M. [2].

The main causes of the reduction in the dielectric properties of insulation, according to the research by Gerlici J, Goolak S., Gubarevych O., Kravchenko K [3], are as follows: thermodynamic loads from starting currents, thermal overload from working currents exceeding the nominal

value, local insulation overheating caused by deviations and asymmetric voltage conditions in the power supply network, contamination of stator winding sections, and high ambient temperature.

The sudden failure and breakdown of AM lead to production stoppages and significant material costs. Therefore, the assessment of the dynamic reduction in the dielectric properties of AM stator windings during the current operation of the ETC is an important task to improve the accident-free operation of the ETC and reduce material losses. The development of microprocessor devices and their integration into diagnostic and control systems of ETC contributes to the development of new methods and devices that can not only identify the cause of the pre-failure state of AM but also forecast the remaining service life of AM.

Analysis of recent research and publications.

Reducing the production cost of manufactured goods is a primary goal for any enterprise. Automation of technological complexes and reducing the number of maintenance personnel are among the directions to improve the efficiency of an enterprise. The development and implementation of non-invasive diagnostic systems, forecasting the development of emergency and pre-failure situations in electrical equipment, allow for the abandonment of planned preventive maintenance systems, reduction of personnel, and improvement of economic indicators. Many scientific works are dedicated to non-destructive testing of the technical condition of AM. For instance, Zakladny O. [4] and patents [5,6] discuss methods for monitoring the technical parameters of operating motors. An analysis of devices for detecting AM damage and means of protection is conducted. In the work of authors Mortgage O.O., Prokopenko V.V. [7], it is noted that insulation temperature is the main factor influencing the service life of the insulation. Mathematical and experimental modeling of AM thermal models allows predicting the remaining service life of insulation with an accuracy of up to 20%.

In the work of authors Metel'kov V.P., Zyuzev A.M., Chernykh I.V. [8], and in the work of Decner A., Baranski M., Jarek T., Berhausen S. [9], systems for assessing the lost resource and predicting the condition of AM winding insulation based on capacitive leakage currents are proposed. The method is based on the constant application of rectangular voltage pulses to the winding insulation and monitoring leakage currents. A decrease in the magnitude of these currents indicates a reduction in the remaining insulation life. The method is applicable for diagnostic testing and after insulation repair tests.

In the works of authors Zhao J, Brovont A.D [10], Zheng D., Lu G., Zhang P. [11], and Jensen W.R., Strangas E.G., Foster S.N. [12], methods for determining the health of insulation under the influence of impulse voltages and partial discharge monitoring are considered. It is shown that representing the asymmetric aging process is effective in detecting leakage current in the system. The method is applicable for quantitative assessment and characterization of machine insulation condition during test trials.

In the work of authors Jameson N.J., Azarian M.H., Pecht M. [13], a method for detecting insulation degradation used in low-voltage

devices is presented by evaluating changes in the impedance response. It is shown that the coil impedance changes differently when subjected to various load conditions, reflecting signs of insulation deterioration due to different failure mechanisms. This method can be used to assess the insulation service life of electromagnetic coils during preventive maintenance.

In the work of authors Zanuso G., Peretti L. [14], a method for monitoring the condition of insulation is examined, based on the high-frequency ringing of stator currents that occurs after the switching of inverter converters. In this method, the response is evaluated on an additional, chaotically wound winding located on the stator of the electric motor, which serves as a prototype of an asynchronous machine. The additional winding is equipped with taps, and the change in insulation condition is induced by the installation of external capacitors. This method is used solely for insulation condition monitoring and does not allow predicting the remaining service life of the electric motor.

In the work by authors Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolback T. [15], a method for monitoring insulation condition changes is proposed, based on the evaluation of its high-frequency properties, which is applicable to speed-controlled asynchronous motors with solidly grounded neutral. The change in capacitance component is related to insulation degradation and is identified through frequency spectrum analysis. By applying signal processing techniques, changes in high-frequency information are extracted, and an insulation condition indicator is derived. The applicability of the method is limited and cannot be used for electric drives without speed control of asynchronous motors.

In the work by authors Bento F., Adouni A., Muxiri A.C., Fonseca D.S., Marques Cardoso A.J. [16], the diagnosis of interturn insulation of asynchronous motors is examined using two alternative thermal models of the same motor, employing lumped-parameter thermal networks and finite element methods.

The work by authors Asfani D.A., Negara I.M. [17], is dedicated to the diagnosis of interturn insulation of windings using thermal models. Testing is performed on a non-operating asynchronous motor, and changes in interturn insulation are determined. The above-mentioned scientific papers demonstrate the importance of research on reducing the dielectric properties of asynchronous motor (AM) windings' insulation

and detecting critical wear. These works emphasize that the electrical insulation testing method is versatile and comprehensive. However, it should be noted that there are relatively few studies dedicated to predicting the residual lifespan of the dielectric properties of insulation. The development of non-invasive and non-destructive methods for predicting the residual lifespan of AM operation and the devices for their implementation in electrical-technological complexes (ETC) is an important factor in reducing accidents.

Objective of the study: To investigate changes in the time constants of capacitor discharge during local reactive power compensation. To develop a method and device

for predicting the remaining service life of electric motors, using the rate of change of the time constants of capacitor discharge as a criterion.

Research method and materials: An electrical method was used to measure the leakage currents through the housing insulation of the stator windings of the electric motor. The type and technical characteristics of the electric motor are as follows: MS 802-4, Pn = 0.75 kW; $\eta = 73\%$; $\cos \varphi = 0.76$; nob = 1380 rpm. A DC power supply with voltage regulation from 50 V to 400 V was used. The oscilloscope used was OWON XDS3104E. Figure 1 shows the laboratory setup for studying the leakage currents of the stator winding's housing insulation in the AM.

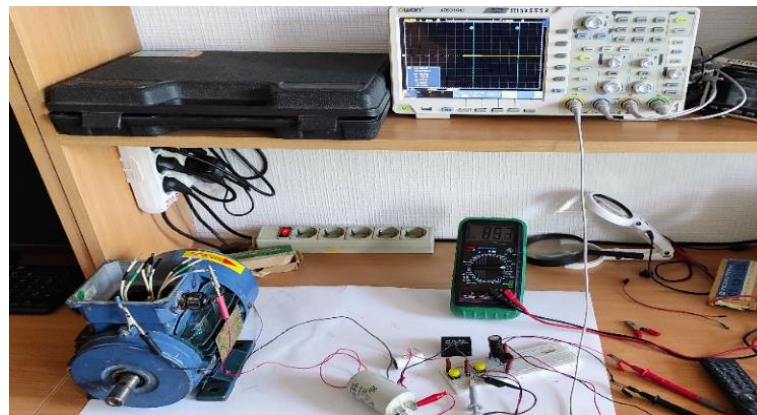


Figure 1. Laboratory setup for studying the leakage currents of the housing insulation of AM stator windings.

In the process of AM operation, the insulation of its stator windings undergoes degradation of its thermal, mechanical, and overall dielectric properties due to various factors. The residual operational lifespan of AM insulation- T_{ok} —is a target multiparametric function, comprising specific and randomly affecting factors on the winding insulation. The generalized mathematical model of the residual operational lifespan of AM winding insulation can be represented as a target function:

$$T_{ok} = f(M_{teh} \cup M_{pauz}) \quad (1)$$

where

$$M_{teh} = \{\theta_1^\circ C \cup \theta_U^\circ C \cup \theta_{kns}^\circ C \cup \theta_{dust}^\circ C \cup M_h^\circ C \cup B_i^\circ C\}$$

— There is a set of factors influencing the insulation of AM windings during the technological period when AM is connected to the

power grid.

$\theta_1^\circ C$ —Thermal factor related to the load current exceeding the nominal value, affecting the insulation.

$\theta_U^\circ C$ —Thermal factor related to voltage deviations from the nominal value, affecting the insulation.

$\theta_{kns}^\circ C$ —Thermal factor related to voltage deviations and asymmetry in the power grid, affecting the insulation.

$\theta_{dust}^\circ C$ —Thermal factor related to local heating of the insulation due to dust accumulation on the surface of AM stator windings.

$M_h^\circ C$ —Thermal factor affecting the insulation and associated with mechanical faults in AM and the driven mechanism.

$B_i^\circ C$ —Random external factors associated with the driven equipment.

$M_{pauz} = \{W_v \cup K_{acid} \cup D_i\}$ —Set of factors affecting the AM insulation during the technological pause.

W_v —Environmental humidity.

K_{acid} —Environmental acidity, a parameter typical for agricultural complexes.

K_{acid} —Random external factors.

Many factors leading to irreversible degradation of dielectric properties of insulation are random in nature. Due to this, traditional diagnostic methods and devices are directed towards one or a few influencing factors. For instance, in the methods of predicting the residual service life of insulation, considering temperature parameters, as proposed by Woldek A.I in [18], the Montzinger rule is used:

$$T_{ok} = T_0 2^{(-\theta/\Delta\theta)} \quad (2)$$

where T_0 —is the service life of the motor insulation of a certain class at a constant temperature, years;

$\Delta\theta$ —is the constant temperature increase value.

With an accuracy of up to 20%, according to [19,20], considering temperature, vibration, start-up, and other factors, the expression (2) takes the form:

$$T_{ok} = T_0 2^{\frac{\Delta\theta_p + \Delta\theta_{HC} + \Delta\theta_{\Delta U} + \Delta\theta_{OC}}{\Delta\theta}} + T_L^{\frac{L}{L_0}} + T_S^{\frac{P}{P_0}} + \dots T_i \quad (3)$$

where $\Delta\theta_p$ —is the insulation temperature increase of the AM windings caused by load currents during changes in the technological regime;

$\Delta\theta_{HC}$ and $\Delta\theta_{\Delta U}$ —are the insulation temperature increase of the AM windings caused by voltage deviations and asymmetry in the power supply;

$\Delta\theta_{OC}$ —is the additional temperature increase of the AM windings' insulation caused by temperature exceeding during insulation surface dusting.

T_L —is the service life of insulation

associated with vibration,

L and L_0 —are vibration-induced aging of insulation,

T_S —is the service life of insulation associated with AM start-ups,

P and P_0 —are the thermo-mechanical aging of AM insulation caused by start-up loads,

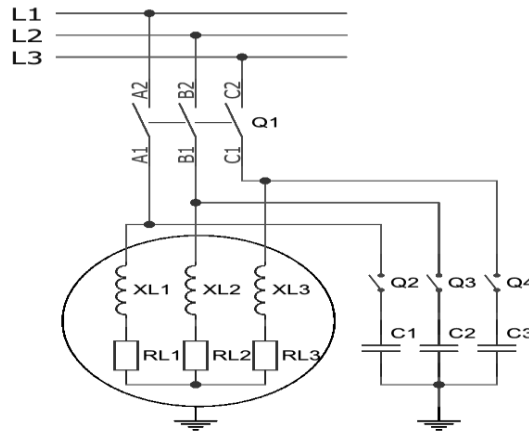
T_i —is the service life of insulation associated with the action of uncertain factors.

From the above, it follows that monitoring leakage currents through the insulation of AM windings is currently the most reliable and regulated method. According to [21], the electrical resistance of AM stator windings' insulation at voltages up to 1kV should be $R \geq 0.5 \text{ MOhm}$ at a temperature of $+10 \dots +30^\circ \text{C}$.

A promising direction in non-destructive diagnostic systems is the acquisition of informational parameters without the involvement of external power sources, as presented in works [14,15].

One of the authors of the article has developed a method for predicting the residual resource of the dielectric property of motor windings during local reactive power compensation [22]. As known from Zhezhelenko I.'s work [23], local compensation contributes to increased reliability and reduced active losses in the power supply networks of the enterprise. Figure 2 shows the single-line electrical diagram of a drive fragment with local reactive power compensation. The methodology for selecting the phase capacitance values depends on the operating mode of the AM in the technological cycle of the electrical and technological complex (ETC), as presented in Zhezhelenko I.'s work [23].

The novelty of the method for monitoring the current state of insulation based on speed characteristics of its resistance changes in the conditions of local compensation, developed by one of the authors [24], lies in the use of energy stored in capacitors as an independent source. The equivalent electrical circuit for simulating transient processes of capacitor discharge in the circuit "complex resistance of AM windings + capacitive resistance of the capacitor for reactive power compensation + complex insulation resistance" is presented in Figure 3.

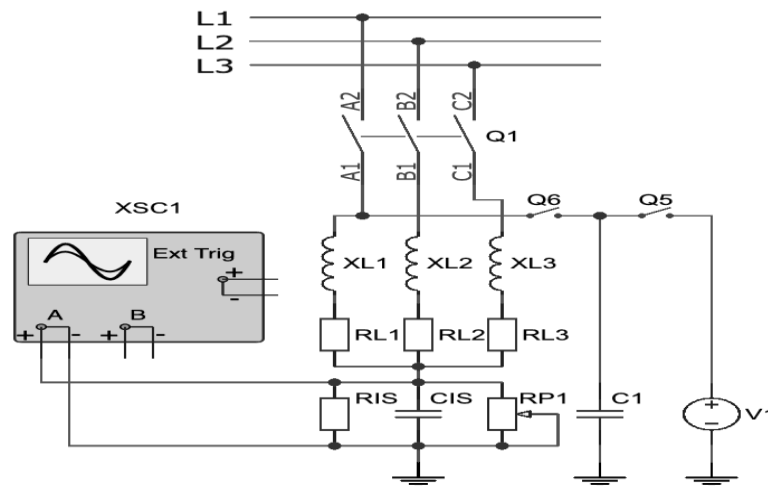


C_1, C_2, C_3 —phase capacitances; Q_1 —three-pole contactor for AM connection to the network; Q_2, Q_3, Q_4 —single-pole contactors for controlling capacitor switching; $C_1, C_2, C_3, XL_1, XL_2, XL_3$ —inductive resistances of the stator winding phases of the electric motor; RL_1, RL_2, RL_3 —active resistances of the stator winding phases of the electric motor.

Figure 2. Single-line electrical diagram of the drive in the electrical and technological complex with local reactive power compensation.

The method for monitoring the current state of the insulation of AM stator windings based on the speed characteristics of its resistance changes, under conditions of local compensation according to [22], involves the following steps: first, capacitors are disconnected from the network; second, the AM is disconnected from the network; third, after the AM comes to a complete stop, the phase capacitance is connected to the terminals "phase + AM casing." The novelty of the method

lies in the ability to use the energy stored in the capacitor as an independent power source. The electrical schematic diagram of the laboratory setup, presented in Figure 3, allows building a mathematical model and simulating transient processes of capacitor discharge in the circuit "complex resistance of the AM winding + capacitor capacitance + complex resistance of the insulation" using the "Matlab" system.



RIS, CIS —represent the active and capacitive components of the substitute model for the casing insulation of AM; $RP1$ —is the variable resistance that allows modeling changes in the dielectric properties of the insulation; $XSC1$ —represents the oscilloscope, and $V1$ —is the direct current power source.

Figure 3 shows the schematic electrical diagram used for modeling and investigating transient processes.

The equation for the circuit "complex resistance of AM winding + capacitive resistance of the capacitor + complex resistance of the insulation," denoted as $Z_{is} = \sqrt{RIC^2 + CIS^2}$, is formulated according to Kirchhoff's second rule and is given by:

$$\frac{d^2 1}{dt^2} + \frac{R_{is}}{L_1} \frac{dt}{dt} + \frac{1}{L_1 C_1} = 0 \quad (4)$$

The nature of the transient process occurring in the circuit depends on the relationship between parameters C_1 , R_{is} , and L_1 , as stated in [24].

Specifically, if the condition $\frac{1}{L_1 C_1} < \left(\frac{R_{is}}{2L_1}\right)^2$ is always fulfilled, the transient process in the circuit becomes overdamped.

The variation of voltage across the casing insulation of AM is described by the expression:

$$U_{Z_{is}} = U_{C_1} (1 - e^{-t/\tau_{Rr}}) \quad (5)$$

where τ_{Rr} —is the time constant of the overdamped discharge $\tau_{Rr} = C_1 R_{is}$ process and depends on the magnitude of the active component of the complex resistance of the insulation.

U_{C_1} —represents the voltage at the terminals of the phase capacitor.

The conducted simulations demonstrated that the inequality:

$$\tau_a > \tau_b > \tau_c \leftrightarrow R_a > R_b > R_c \quad (6)$$

where τ_a , τ_b , τ_c and R_a , R_b , R_c —are the time constants and active components of the resistances of the insulation corresponding to the different modeled processes at $R_a = 50.0$ MOhm, $R_b = 15.0$ MOhm, and $R_c = 5.0$ MOhm.

The inequality (6) allows considering the time constants of the capacitor discharge as a critical parameter for assessing the state of the dielectric properties of the insulation.

The intensity of the reduction in dielectric properties of the insulation is characterized by the parameter "rate of change of time constants" of capacitor discharges during the operation of the motor, which is determined by the expression:

$$V_{disci} = \frac{\tau_{first} - \tau_i}{\sum_i^n \Delta t_i} \quad (7)$$

where τ_{first} —is the initial time constant of the capacitor discharge at the first disconnection of the motor from the power supply,

τ_i —is the time constant of the capacitor discharge during the current disconnections of the motor from the power supply,

Δt_i —is the operating time of the motor in the current period,

n —is the number of periods of motor operation.

Mathematical modeling of the capacitor discharge processes for different resistance values of the motor's insulation allowed the development of a method for predicting the residual lifespan of the dielectric properties of the motor's insulation. The method consists of the following steps:

Firstly, the capacitor banks are disconnected from the power supply. Secondly, the motor is disconnected from the power supply. Thirdly, the highest voltage on one of the phase capacitors in the capacitor bank is determined, and the motor is connected to the terminals "phase + body" of the motor. The initial discharge time of the phase capacitor t_{disc1} is recorded, and the initial time constant of the capacitor discharge τ_{disc1} is determined. The critical value of the time constant of the phase capacitor is calculated as:

$$\tau_{crit} = C_1 R_{1S} \quad (8)$$

where C_1 —is the capacitance of the phase capacitor, and $R_{1S} = 0.5$ MOhm is the critical value of the stator winding insulation resistance. The initial time constant of the capacitor discharge during the first disconnection of the motor from the power supply is calculated as:

$$\tau_{first} = \frac{t_{disc1}}{5} \quad (9)$$

The moments of motor start-up and shutdown in the second period of its operation are recorded, and the operating time is determined using the following expression:

$$\Delta t_2 = t_{enabl2} - t_{disabl2} \quad (10)$$

where t_{enabl2} and $t_{disabl2}$ —are the times of AM start-up and shutdown in the second period of its operation.

The discharge time constant of the capacitor in its second connection to the terminals "phase + body" of the motor is determined by the expression:

$$\tau_{disc2} = \frac{t_{disc2}}{5} \quad (11)$$

where t_{disc2} —is the discharge time of the phase capacitor after the second disconnection of the AM from the power supply and connection of the capacitor to the terminals "phase + body" of the motor. The rate of change of the discharge time constant of the capacitor during the second period of motor operation is calculated as:

$$V_{disc2} = \frac{\tau_{first} - t_{disc2}}{\Delta t_2} \quad (12)$$

The residual time of reduction in the resistance of the motor winding's body insulation to the critical value is determined by the expression:

$$T_{disc} = \frac{t_{disc2} - t_{crit}}{V_{disc2}} \quad (13)$$

During subsequent connections and disconnections of the AM to the power supply, the motor's operating time is recorded for each period of its operation as:

$$\Delta t_i = t_{enabli} - t_{disabli} \quad (14)$$

The discharge time constant of the capacitor in the current period is calculated using the expression:

$$\tau_{disci} = \frac{t_{disci}}{5} \quad (15)$$

The rates of change of the discharge time constants of the capacitor in the current periods of AM operation are calculated using the expression (7).

The residual time of reduction in the resistance of the motor winding's body insulation after each disconnection from the power supply to the critical value is corrected by the expression:

$$T_{disc} = \frac{t_{disci} - t_{crit}}{V_{disci}} \quad (16)$$

The residual service life of the motor is determined as a percentage using the expression:

$$Rr_{disc} = \left(1 - \frac{\tau_{first} - \tau_{crist}}{\tau_{first} - \tau_i} \right) 100\% \quad (17)$$

Method Validation

Figure 1 shows the laboratory setup for validating the developed method for predicting the residual service life of the dielectric properties of insulation, while Figure 3 presents the schematic diagram. For method validation, the capacitor capacitance $C_1 = 3\mu F$ (full reactive power compensation, according to the methodology [23]) is achieved at $C_1 = 27\mu F$.

During the first disconnection of the motor from the power supply, we determine t_{disc1} —the initial discharge time of the capacitor, τ_{first} —the initial discharge time constant of the capacitor at the initial dielectric properties of the AM stator winding insulation, τ_{crist} —the critical value of the discharge time constant of the capacitor when the insulation resistance is $R_{1S} = 0,5$ MOhm.

In the first disconnection of the motor from the power supply, the resistance $RP1$ is disconnected. By pressing the "Start" button Q_5 , we connect the capacitor (e.g., capacitance C_1) to the power supply unit $V1$ with a voltage of 150 V. This way, we simulate the charging of the capacitor C_1 and consider it charged to the maximum voltage. Using the "Start" button Q_6 , the charged capacitor is connected to the terminals "phase + body" of the motor. Figure 4 shows the graph of voltage changes during the discharge of the capacitor C_1 .

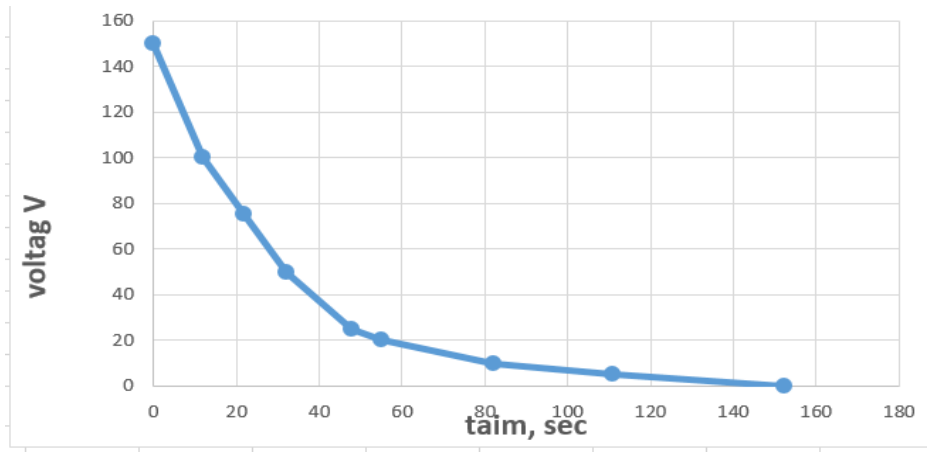


Figure 4. Voltage change graph during the discharge of capacitor C_1 .

$$t_{disc1} = 152,4 \text{ seconds.}$$

$$\tau_{first} = \frac{152,4}{5} = 30,5 \text{ seconds.}$$

The initial resistance of the stator winding insulation in AM, without considering the voltage measurement divider coefficient in the circuit, is:

$$RIS_{first} = \frac{\tau_{first}}{C_1} = 10,2 \text{ MOhm.}$$

We calculate τ_{crit} , the critical value of the capacitor discharge time $\tau_{crit} = 1,5 \text{ s}$.

Second disconnection of AM from the power

supply. The resistance is $RP2 = 20 \text{ MOhm}$. Assuming that during the operation of AM, the insulation resistance decreased and is now

$$RIS_2 = \frac{RIS_{first} RP2}{RIS_{first} + RP2} = 6,6 \text{ MOhm.}$$

Therefore, the dielectric properties of the insulation have decreased by 36%. Let's assume the operating time of the electric motor was $\Delta t_2 = 10 \text{ hours}$. Figure 5 shows the voltage change graph during the discharge of the capacitor.

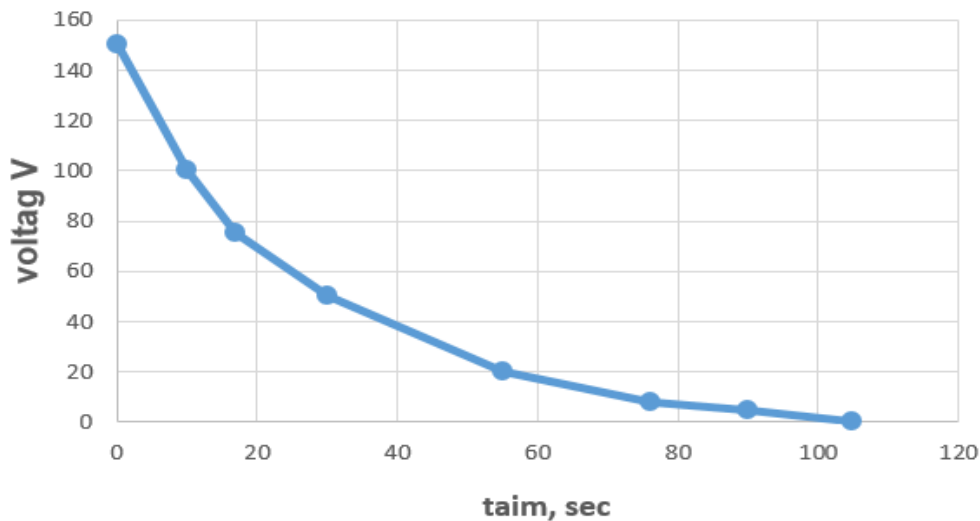


Figure 5. Voltage change graph during the discharge of capacitor C_1 .

$$t_{disc2} = 104,8 \text{ seconds,}$$

$$\tau_{disc2} = 20,9 \text{ seconds.}$$

The rate of change of the capacitor discharge

time after the second period of AM operation.

The predicted remaining operating time of AM is:

$$T_{disc} = \frac{20,9 - 1,5}{0,27 \cdot 10^{-3}} = 71,9 \cdot 10^{-3} = 19,97 \text{ hours.}$$

Thus, if the degradation, i.e., the deterioration of insulation properties, occurs at this rate, AM will operate for an additional 19.97 hours.

The residual service life of the electric motor as a percentage is:

$$Rr_{disc} = \left(1 - \frac{30,5 - 20,9}{30,5 - 1,5} \right) 100\% = 77\% .$$

Third disconnection of AM from the power

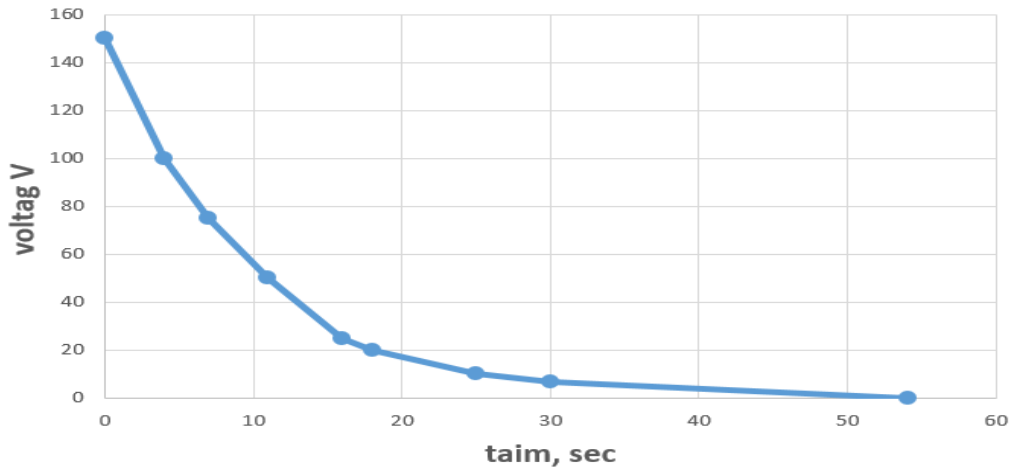


Figure 6. Voltage change graph during the discharge of capacitor C_1 .

$$t_{disc3} = 54,1 \text{ seconds, } \tau_{disc3} = 10,82 \text{ seconds.}$$

The rate of change of the capacitor discharge time after the third period of AM operation is:

$$V_{disc3} = \frac{20,9 - 10,82}{(10 + 30) \cdot 60 \cdot 60} = 7,5 \cdot 10^{-5}$$

We adjust the remaining operating time of AM, which is:

$$T_{disc} = \frac{10,82 - 1,5}{7,5 \cdot 10^{-5}} = 1,242 \cdot 10^5 = 34,5$$

hours.

Thus, if the deterioration of insulation properties occurs at this rate, AM will operate for an additional 34.5 hours.

The residual service life of the electric motor as a percentage is:

supply. The resistance is $RP3 = 5 \text{ MOhm}$. Assuming that during the operation of AM, the insulation resistance decreased and is now

$$R1S_3 = \frac{R1S_{first} RP3}{R1S_{first} + RP3} = 6,6 \text{ MOhm.}$$

Therefore, the level of dielectric properties of the insulation has decreased by 70%. Let's assume the operating time of the AM was $\Delta t_3 = 30 \text{ hours}$. Figure 7 shows the voltage change graph during the discharge of the capacitor C_1 .

$$Rr_{disc} = \left(1 - \frac{30,5 - 10,82}{30,5 - 1,5} \right) 100\% = 33\%$$

Fourth disconnection of AM from the power supply. The resistance is $RP4 = 0,3 \text{ MOhm}$. Assuming that during the operation of AM, the insulation resistance decreased and is now:

$$R1S_3 = \frac{R1S_{first} RP3}{R1S_{first} + RP3} = 0,292 \text{ MOhm.}$$

Therefore, the level of dielectric properties of the insulation has decreased by 100%, and further operation of AM will result in a breakdown. Let's assume the operating time of the electric motor was $\Delta t_3 = 80 \text{ hours}$. Figure 8 shows the voltage change graph during the discharge of the capacitor C_1 .

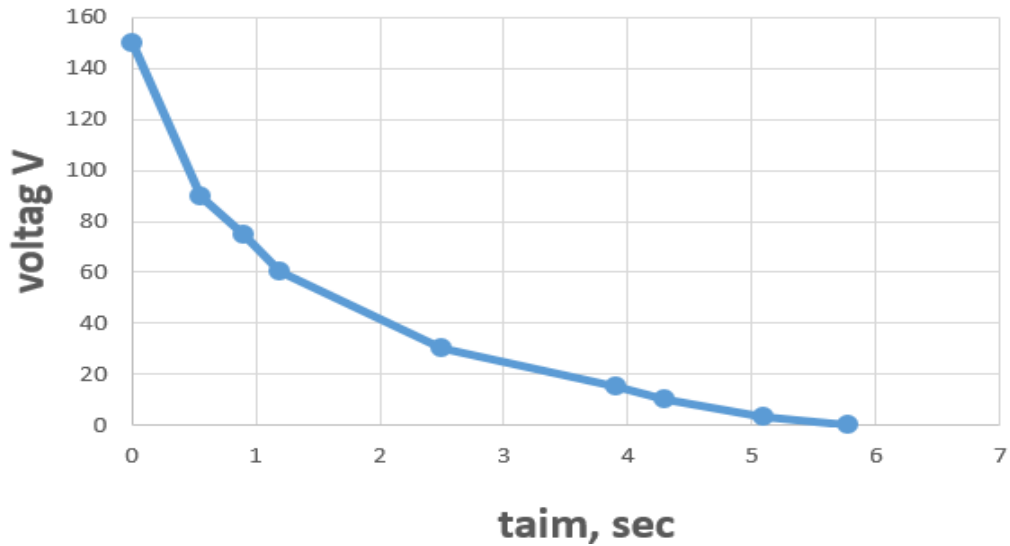


Figure 7. Voltage change graph during the discharge of capacitor C_1 .

$t_{disc3} = 5,7$ seconds, $\tau_{disc3} = 1,14$ seconds. The rate of change of the capacitor discharge time after the fourth period of AM operation is: ≈ 0 .

$$V_{disc3} = \frac{20,9 - 1,14}{(10 + 30 + 80) \cdot 60 \cdot 60} = 4,07 \cdot 10^{-6}$$

We adjust the remaining operating time of AM, which is:

$$T_{disc1} = \frac{10,82 - 1,5}{7,5 \cdot 10^{-5}} = 2,3 \cdot 10^6 = 0,0083 \text{ hours}$$

Thus, with an accuracy of up to 1%, it can be stated that the dielectric properties of the stator winding insulation of AM are depleted, and AM requires repair. The residual service life of the electric motor as a percentage is:

$$Rr_{disc1} = \left(1 - \frac{30,5 - 1,14}{30,5 - 1,14} \right) 100\% = 0\%$$

The implementation of the developed method is carried out in the insulation monitoring and protection device for AM [25]. Figure 8 shows its block diagram.

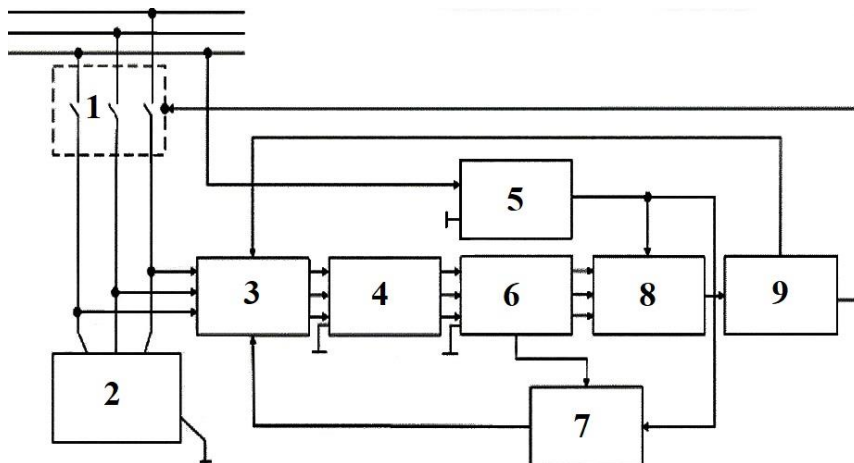


Figure 8. Block diagram of the insulation monitoring and protection device for AM.
 1 - Switching device, 2 - Electric motor, 3 - Capacitor switching block, 4 - Capacitor block, 5 - Power supply block, 6 - High-impedance dividers block, 7 - Maximum positive voltage detection block, 8 - Microprocessor, 9 - Control block.

The device allows compensating the reactive power consumed by the AM during its operation, detecting current circuit interruptions, and monitoring unbalanced phases in the network, implementing the developed method for predicting the residual lifespan of the AM's

insulation dielectric properties. Furthermore, it can prevent the development of emergency situations during AM disconnections.

Discussion of Results

Methods for predicting the residual lifespan of AM operation using thermal models, both mathematical and empirical, according to [7, 15, 18, and other sources], are based on expression (2). It is assumed that $T_{(0)}$, the lifespan of AM insulation at a constant temperature θ ($^{\circ}\text{C}$), ranges from 15 to 25 years. The scatter of $T_{(0)}$ values within (25-40)% and the influence of random factors leading to additional thermal impacts on the insulation determine the reliability of thermal prediction methods within 25-30%.

In the developed method, the time constant of the capacitor discharge after the first disconnection of the AM from the network is taken as the baseline value for the dielectric state of the AM's windings. In subsequent disconnections, the rate of insulation property degradation is determined under various

influencing factors. The time constant of the capacitor discharge serves as a criterion that considers both defined and undefined factors affecting the reduction of insulation dielectric properties. The speed characteristics of the time constants of the capacitor discharges are presented in relative units, enabling the prediction of the residual lifespan of AM operation with an accuracy of up to 3%, depending on the accuracy class of measuring and converting devices.

Figure 10 illustrates the graph of resistance change of the casing insulation depending on the AM's operating time.

The analysis of the resistance change curve of AM windings' insulation shows that the time constant of the capacitor discharge is different on each linearized segment and depends on the intensity of the insulation's dielectric property changes. The speed characteristic of the time constant of the capacitor discharge allows for determining and adjusting the residual lifespan of AM operation in real-time mode.

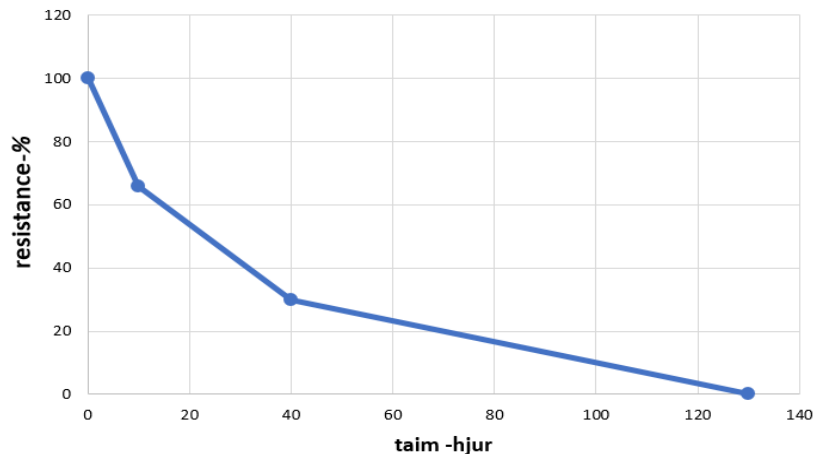


Figure 9. Graph of changes in the resistance of the casing insulation depending on the operating time of the AM.

Conclusions

The characteristics of the capacitance discharge time variation during local reactive power compensation consumed by the AM is a critical parameter for reducing the dielectric properties of insulation, allowing the prediction of the remaining AM resource with an accuracy of no more than 3%.

REFERENCES

[1] Tokarev O.V., Boryagin D.O., Sheremet O.T. Analysis of the causes of damage to asynchronous motors. Nausny Bulletin of the DSEA No. 1 (25E), 2018, 39-49s.

[2] Gubarevich O.V., Galway S.M. Analysis of diagnostic methods for the technical condition of electric motor insulation <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.

[3] Gerlici J, Goolak S., Gubarevych O., Kravchenko K., Kamchatna-Stepanova K., Toropov A. Method for Determining the Degree of Damage to the Stator Windings of an Induction Electric Motor with an Asymmetric Power System. *Symmetry* 2022, 14(7), 1305; <https://doi.org/10.3390/sym14071305>

[4] Zakladny O. Determination of emergency modes of electric motors with the help of modern systems for diagnosing their

- condition. ISSN 1813-5420 (Print). Energy: economy, technology, ecology. 2022. No. 1 p. 96-104.
- [5] Patent US 6262550B1 "Electric motor control system and method»
- [6] Patent US-20050021301-A1 – «System and method for proactive motor health diagnostics based on potential mechanical failures».
- [7] Mortgage O.O., Prokopenko V.V. Estimation of the residual life of electromechanical systems during energy audit Energy: economy, technology, ecology. 2017. No. 1 58 ISSN 2308-7382.
- [8] Metel'kov V.P., Zyuzev A.M., Chernykh I.V. (2019), "System for assessing the residual life of the insulation of the winding of an induction motor based on capacitive leakage currents", Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы, 2022, Vol.1, no. 42, pp. 53-58.
- [9] Decner A., Baranski M., Jarek T., Berhausen S. Methods of diagnosing the insulation of electric machines windings Energies 2022, 15, 8465. <https://doi.org/10.3390/en15228465>
<https://www.mdpi.com/journal/energies>
- [10] Zhao J., Brovont A.D. Modeling Common-Mode Current Due to Asymmetric Aging of Machine Winding Insulation. Complex System Modeling and Simulation, 2023, 3(2): 118-128.
<https://doi.org/10.23919/CSMS.2023.0004>
- [11] Zheng D., Lu G., Zhang P. Improved stator insulation online monitoring method based on common-mode impedance spectrum with aging position effects, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 3, pp. 3558–3566, 2022.
- [12] Jensen W.R., Strangas E.G., Foster S.N. Online assessment of stator insulation residual life, in Proc. 11th IEEE International Symposium on Diagnostics of Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2017, Tinos, Greece, 2017, pp. 635–641.
- [13] Jameson N. J., Azarian M. H., Pecht M. Improved Monitoring of the Insulation Condition of Electromagnetic Coils Using Equivalent Circuit Model Analysis, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 119, p. 105829, 2020.
- [14] Zanuso G., Peretti L. High Frequency Current Measurement Evaluation for Insulation Condition Monitoring in Electrical Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 37, no. 4, pp. 2637–2644, 2022.
- [15] Nussbaumer P., Vogelsberger M., Wolback T. Insulation Condition Monitoring of Induction Machines Based on Online Switching Transient Operation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1835–1845, 2015.
- [16] Bento F., Adouni A., Muxiri A. C., Fonseca D. S., Marques Cardoso A. J. On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults. IET Electrical Power Applications. 2021 Vol. 15. N. 1. R. 51-62. URL: <https://doi.org/10.1049/elp2.12008>
- [17] Asfani D. A., Negara I. M. Y., Hernanda I. G. N. S., Fahmi D., Muljadi E. & Nelms R. M. (2020, October). Methods to Deter Dine the Stator Inter-turn Short Circuit in an Induction Motor with Installed Rotor. In: 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2020. R. 7-13. URL: <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236051>.

About authors.



Valerii Kryvonosov, professor, doctor of technical sciences, scientific interests are connected with the method of diagnostics of control and management of electrical complexes

E-mail:
yhtverf007@ukr.net



Oleksandr Matviienko, postgraduate student of National University of Bioresources and Nature Protection of Ukraine. Intercessor of head power engineer. His scientific interests are related to the method of diagnosing and predicting the performance of electric motors.

e-mail:
matviienkooleksandrm@gmail.com