

Moisture Content and Aromatic Compounds Determination in Transformer Oil Using Spectral Method

Kozlov V.K., Kurakina O.E.

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. During operation, resulting from the thermochemical and electrical effects, the performance of the transformer oil decreases due to the measurement of the structural group composition. An increase in the content of the aromatic hydrocarbons leads to the appearance of a precipitate, and as well as due to its hygroscopicity, an increase in the moisture content. The latter is one of the transformer oil parameters that determines its quality. In power equipment, the presence of moisture of the order of 10 grams of water per ton of oil is allowed. At elevated water concentrations, there is a risk of the power transformers' failure. The aim of the work was to develop new methods for determining the aromatic compounds and water contents in the transformer oil in small quantities. This goal was achieved by conducting spectral studies of the transformer oil samples in the UV range and constructing correlation lines to determine the moisture content and concentration of aromatic compounds. The most significant result of the article was the establishment of correlations between the optical density of the transformer oil in the region of 530 nm and the concentration of aromatic compounds and between the optical density in the region of 980 nm and moisture content in the oil. The significance of the obtained results lies in the fact that the optical method for determining the moisture content and aromatic hydrocarbons in transformer oils, using the constructed correlation lines, is highly accurate and does not require the use of additional reagents and complex calculations.

Keywords: transformer oil, moisture content, aromatic compounds, absorption spectra.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.01>

UDC: 621.315.615.22

Determinarea conținutului de umiditate și a compușilor aromatici din uleiul de transformator prin metoda spectrală

Kozlov V.K., Kurakina O.E.

Universitatea Energetică de Stat din Kazan,
Kazani, Federația Rusă

Rezumat. Conținutul de umiditate este unul dintre parametrii care determină calitatea uleiului de transformator. Acest parametru este printre cei mai critici, fiind monitorizat minuțios. Atunci, când uleiul de transformator este utilizat în echipamentele de putere ale sistemelor de energie electrică, prezența umidității este permisă în limita a 10 grame de apă pe tonă de ulei. La concentrații mai mari de apă, există un risc de defecțiune a transformatoarelor de putere, ceea ce complică funcționarea ulterioară a acestora și, în consecință, operabilitatea întregului sistem energetic. Scopul acestei lucrări este de a dezvolta noi metode de determinare a conținutului de compuși aromatici și de apă în uleiul de transformator în cantități mici. Scopul este atins prin efectuarea de studii spectrale ale probelor de ulei de transformator în domeniul UV și construirea a două linii drepte de corelație pentru a determina conținutul de umiditate și concentrația de compuși aromatici. Cel mai important rezultat al articolului este stabilirea unor relații de corelație între densitatea optică a uleiului de transformator în intervalul de 530 nm și concentrația de compuși aromatici și între densitatea optică în intervalul de 980 nm și conținutul de umiditate din ulei. Semnificația acestor rezultate constă în faptul, că metoda optică de determinare a valorilor mici ale apei și hidrocarburilor aromatice în uleiurile de transformator, utilizând liniile drepte de corelație construite, este de o precizie ridicată și nu necesită utilizarea de reactivi suplimentari și calcule complexe, ceea ce reduce timpul și costurile la investigarea calității uleiului de transformator.

Cuvinte-cheie: ulei de transformator, conținut de umiditate, compuși aromatici, spectre de absorbție.

Определение влагосодержания и ароматических соединений в трансформаторном масле спектральным методом

Козлов В.К., Куракина О.Е.

ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация. Трансформаторное масло в силовых трансформаторах эксплуатируется в условиях электрического поля высокой напряженности, повышенных рабочих температур в присутствии кислорода и металлов, что приводит к окислению углеводородной составляющей масла. В результате влияния термохимического и электрического воздействия снижаются эксплуатационные показатели

трансформаторного масла в связи с измерением структурно-группового состава. Увеличение содержания ароматических углеводородов приводит к появлению осадка, а также, за счет своей гигроскопичности, повышению влагосодержания. Влагосодержание – это один из параметров трансформаторного масла, определяющих его качество. Данный параметр является одним из наиболее критических, за которым ведется тщательный контроль. При эксплуатации трансформаторного масла в силовом оборудовании электроэнергетических систем допускается присутствие влаги порядка 10 грамм воды на тонну масла. При повышенных концентрациях воды возникает риск выхода из строя силовых трансформаторов, что осложняет их дальнейшую эксплуатацию и, следовательно, работоспособность всей энергосистемы. Целью работы является разработка новых методов определения содержания ароматических соединений и воды в трансформаторном масле в малых количествах. Поставленная цель достигается за счет проведения спектральных исследований образцов трансформаторного масла в УФ диапазоне и построения двух корреляционных прямых для определения влагосодержания и концентрации ароматических соединений. Наиболее существенным результатом статьи является установление корреляционных зависимостей между оптической плотностью трансформаторного масла в области 530 нм и концентрацией ароматических соединений и между оптической плотностью в области 980 нм и влагосодержанием в масле. Значимость полученных результатов состоит в том, что оптический метод определения малых значений доли воды и ароматических углеводородов в трансформаторных маслах, с помощью построенных корреляционных прямых, обладает высокой точностью и не требует использования дополнительных реагентов и сложных вычислений, что сокращает время и стоимость исследования качества трансформаторного масла.

Ключевые слова: трансформаторное масло, влагосодержание, ароматические соединения, спектры поглощения.

ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторное масло является продуктом переработки нефти – электроизоляционным материалом, дугогасящей и теплоотводящей средой, а также средой, защищающей твердую изоляцию трансформатора (картон) от проникновения влаги и воздуха. В процессе эксплуатации маслонеполненного высоковольтного оборудования жидкая изоляция работает в жестких условиях (повышенная температура, высокая напряженность электрического поля, металлические части оборудования, кислород воздуха, световая энергия и т.д.) [1,2]. Вследствии чего масло претерпевает глубокие изменения, которые обычно характеризуются понятием «деградация», включающим изменения его химических и электрофизических свойств, а также структурно-группового состава [3-6]. В процессе деградации трансформаторного масла происходят окислительные процессы, а также появляются низко- и высокомолекулярные соединения, способные коагулироваться и выпадать в виде осадков на активные части электрооборудования (обмотки, магнитопровод, отводы, шины, масляные каналы) [1,7-10]. Авторы подтверждают в своих исследованиях, что фильтры трансформаторов удаляют продукты, образующиеся за счет окислительных процессов, тогда как

продукты ароматизации накапливаются в трансформаторном масле, ускоряя процессы осадкообразования, т.е. снижают изоляционные и теплоотводные характеристики системы и повышают гигроскопичность масла. В свою очередь, наличие воды в трансформаторном масле является критической проблемой, поскольку оно значительно ухудшает диэлектрические свойства масла [11,12]. Кроме того, содержание воды в масле может повлиять на качество и функции бумажной изоляции, потому что она гигроскопична и поглощает любой избыток воды в трансформаторном масле. Это приводит к сокращению срока службы бумажной изоляции. Это еще один фактор, ограничивающий количество воды в трансформаторном масле.

Степень снижения электрической прочности масла зависит не только от количества растворенной в нем влаги, но также от наличия сопутствующих примесей (волокна и т. п.). В связи с этим при одной и той же концентрации влаги в масле диапазон значений электрической прочности масла может быть довольно широким, особенно по мере увлажнения масла.

Растворимость воды в трансформаторном масле весьма незначительная. С точки зрения молекулярной теории незначительная растворимость воды в нефтяных продуктах объясняется громадным различием в размерах молекул углеводов, из которых

состоит масло, и молекул воды. Суммарное поле межмолекулярных сил, создаваемое при взаимодействии этих двух типов молекул, препятствует смешению обеих жидкостей. Концентрация воды в трансформаторных маслах, как и в других углеводородных жидкостях, при данной температуре в равновесном состоянии пропорциональна относительной влажности воздуха. При прочих равных условиях гигроскопичность трансформаторных масел зависит от их химического состава и возрастает с повышением содержания ароматических углеводородов в масле. [4].

Предельная растворимость воды в диэлектриках является также функцией от температуры системы «вода-изоляционная жидкость-целлюлоза», т.е. растворимость увеличивается экспоненциально с повышением температуры. Надо заметить, что растворенная вода образует в органических диэлектрических жидкостях истинный раствор и практически не оказывает влияния на изменение изоляционных характеристик, а именно снижение электрической прочности жидкого диэлектрика. Но при понижении температуры в первую очередь образуется вода в виде конденсата, которая затем переходит в эмульсионную воду, повышающую диэлектрические потери жидкости [13]. Стоит отметить, опасность для оборудования представляет именно вода в коллоидном виде, так как она может спровоцировать пробой изоляции. Ароматические соединения помогают удерживать воду в растворенном виде, что может быть опасно при резком охлаждении изоляционной среды, например, при снижении нагрузки или выводе оборудования из эксплуатации, особенно в зимний период с высоким содержанием воды в масле.

При эксплуатации содержание в масле ароматики увеличивается, по сравнению со свежим маслом, так же, как и воды, но данная вода находится в растворенном состоянии, за счет ароматических соединений, и оборудование может работать в нормальном режиме.

Но в момент запуска холодного трансформатора в зимний период появляется эмульсионная вода из растворенной формы из-за чего может произойти пробой.

Из вышесказанного можно сделать вывод о взаимосвязи таких параметров,

характеризующих качество трансформаторного масла, как процент ароматических соединений и влагосодержание. Каждый из них несет определенные негативные последствия для состояния трансформаторного масла и соответственно влияет на надежность работы силового оборудования подстанции.

Ароматические углеводороды являются составной частью масла. По мнению российских специалистов, в отличие от зарубежных, полное или чрезмерное удаление ароматических углеводородов из масла в процессе очистки приводит к получению продуктов, легко окисляющихся кислородом воздуха, особенно в условиях повышенных температур, каталитического воздействия металлов, солнечного света и других факторов, с которыми масло встречается в эксплуатации. Вместе с тем недостаточно глубокая очистка масел и сохранение в них излишнего количества ароматики также недопустимы, так как они влекут за собой накопление в маслах в процессе эксплуатации осадков, что было доказано авторами в своих исследованиях ранее. Излишнее количество ароматических, особенно полициклических, углеводородов в маслах ухудшает диэлектрические свойства масел. [3,4].

Определению значения содержания ароматических углеводородов и изменению количества их присутствия в трансформаторном масле посвящено множество работ. Например, в работе [14] обсуждаются ЯМР-исследования, выявившие наличие сильно разветвленных алифатических и ароматических углеводородов с доказательствами пропорционального баланса как в состаренных, так и в новых маслах. В работе [9] в результате адсорбционного разделения выделялась широкая фракция парафино-нафтеновых углеводородов, затем с использованием петролейного эфира и бензола из адсорбируемой на силикагеле фракции выделяли ароматические углеводороды.

Разработка усовершенствованного аналитического метода определения канцерогенных полициклических ароматических углеводородов в трансформаторном масле представлена в работе [15].

При эксплуатации трансформаторного масла в силовом оборудовании

электроэнергетических систем допускается присутствие влаги порядка 10 г воды на тонну масла, т.е. допустимая доля воды – 10 миллионных долей (м.д.). При больших концентрациях воды возникает риск выхода из строя силовых трансформаторов, что осложняет их дальнейшую эксплуатацию [4, 16]. Величина эта очень маленькая, и существующими методами определить ее сложно, поэтому постоянно разрабатываются новые и совершенствуются уже применяемые на практике аналитические методы определения влагосодержания. Кроме этого, очень часто подвергаются сомнениям точность результатов измерения.

В настоящее время наиболее широко используется метод определения влаги титрованием по Карлу Фишеру [3,4], волнометрический или кулонометрический методы. Точность определения влагосодержания превышает 1 м.д. Однако результаты систематических исследований точности и воспроизводимости влагосодержания трансформаторного масла титрованием по Фишеру [17,18] показали, что данный метод практически нечувствителен к диспергированной воде, которая не может взаимодействовать с реагентом, используемым в титровании по Фишеру. Кроме того, присутствие в эксплуатируемом в реальных условиях трансформаторном масле разнообразных примесей, например кислот, оснований, альдегидов, кетонов, кристаллогидратов, значительно снижает точность метода.

Наиболее часто применяемые на практике методы приведены в работе [19]. Также достаточно новым методом является определение содержания влаги в трансформаторном масле с помощью D-образного оптического волокна с платиновым покрытием [20]. В работе [21] представлены двухэлектродные диэлектрические датчики для оценки содержания воды в трансформаторном масле. В последнее десятилетие емкостные датчики все чаще используются для оценки влажности силовых трансформаторов [22]. Весьма распространенные методы определения влагосодержания трансформаторного масла – масс-спектрометрия и хроматография, а также фотоакустическая спектроскопия или сочетание термического анализа и кулонометрии. Данные методы имеют как достоинства, так и недостатки и находятся на

стадии тщательной проверки пригодности для определения малых значений влагосодержания в трансформаторном масле и пригодности для целей силовой электроэнергетики.

Вода и ароматические группы находятся в трансформаторном масле в малом процентном соотношении относительно всей массы изолирующей среды. Более того вода присутствует в масле как в состоянии истинного раствора, так и в коллоидном виде и не все известные на данный момент методы чувствительны к различным типам влагосодержания. Перед авторами стояла задача получения корреляционных прямых для быстрого и точного определения влагосодержания и ароматических углеводородов методами спектроскопии в видимой и ближней ИК-области спектра.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения спектров пропускания образцов трансформаторного масла использовался спектрофотометр СФ-56. Каждый образец масла, помещенный в кварцевую кювету, поочередно освещался узконаправленным светом различной длины волны. Источником освещения являлся прибор Ocean Optics LS-1. Температура окружающей среды равна 20°C.

Для исследования были отобраны пять образцов свежего трансформаторного масла:

ВГ – трансформаторное масло из парафинистых малосернистых нефтей с использованием гидрокаталитических процессов.

ГК – трансформаторное масло гидрокрекинга; применяется в силовых трансформаторах и реакторах напряжением до 1150 кВ включительно.

Nytro 10X – трансформаторное масло из нафтеновых венесуэльских нефтей, вырабатываемое с применением процессов гидроочистки Масло стабилизировано ингибиторами окисления фенольного типа.

T-1500 – трансформаторное масло кислотнo-щелочной очистки, карбамидной депарафинизации и контактной доочистки из Бакинских нефтей.

ТКп – трансформаторное масло, вырабатываемое с применением процессов кислотнo-щелочной очистки и контактной доочистки, в основном из Анастасиевской нефти.

На рис. 1 приведены нормированные спектры пропускания для исследуемых образцов. По полученным спектрам видно различие в химическом составе данных

масел, т.к. форма спектра зависит от структурно-группового состава, в том числе и от концентрации ароматических углеводородов.

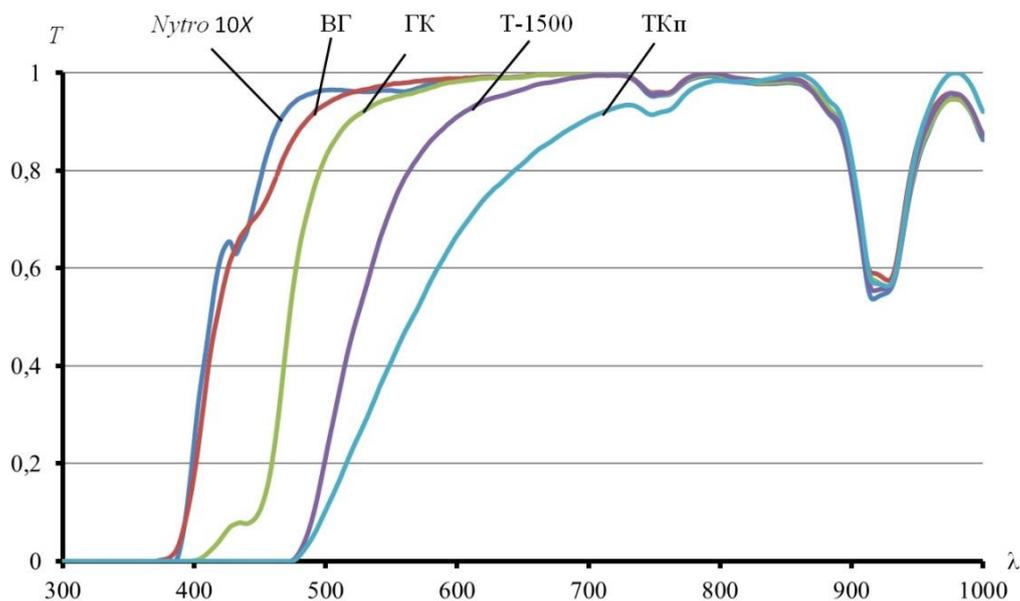


Рис. 1. Нормированные спектры пропускания образцов трансформаторного масла. λ – длина волны, T – значение пропускания.

Fig. 1. Normalized transmission spectra of transformer oil samples. λ is the wavelength, T is the transmission value.

Используя данные спектров, представленных на рис. 1, с помощью формулы (1) получим значения оптической плотности для спектров исследуемых образцов:

$$D = \log(T/100) \quad (1)$$

Полученные нормированные спектры оптической плотности для всех образцов трансформаторного масла в диапазоне длины волны 400-1000 нм представлены на рис. 2.

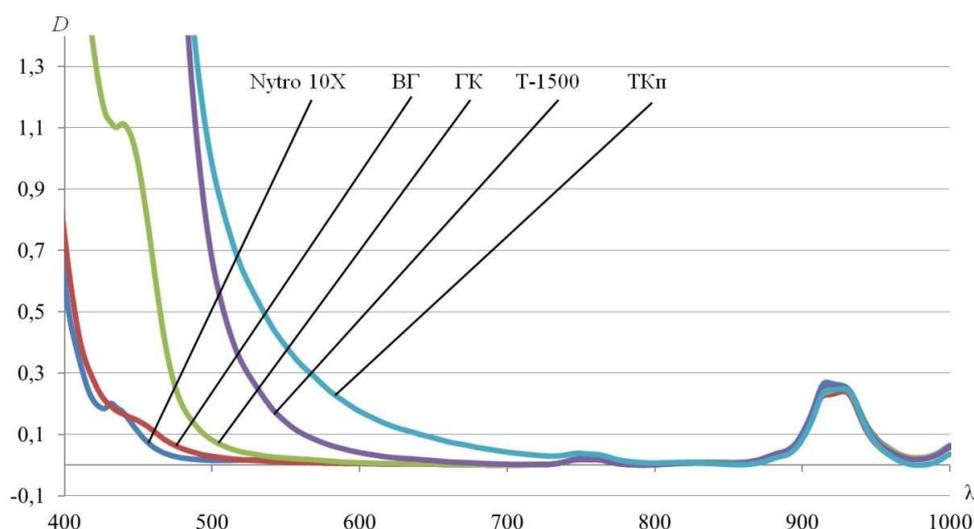


Рис. 2. Нормированные спектры оптической плотности для образцов трансформаторного масла. D – значения оптической плотности.

Fig. 2. Normalized optical density spectra for transformer oil samples. D - optical density values.

В табл. 1 приведены сведения о рассмотренных марках трансформаторных масел [23].

Таблица 1
Концентрация ароматических углеводородов в рассмотренных марках трансформаторных масел.

Table 1
The concentration of aromatic hydrocarbons in the considered grades of transformer oils.

Марка масла	Nyro 10X	ГК	T-1500	ТКп	T-1500 У (Уфа)
Концентрация ароматических углеводородов, %	0,85	1,6	14,2	18,9	10

Далее был найден коэффициент корреляции между концентрацией ароматических углеводородов и оптической плотностью образцов трансформаторных масел по всему спектру. По результатам этой работы построен следующий график, отображающий коэффициент корреляции

между концентрацией ароматических соединений и оптической плотностью образцов трансформаторного масла. (рис. 3): Можно заметить, что наибольшая корреляция близкая к единице между данными параметрами наблюдается в области 530 нм.

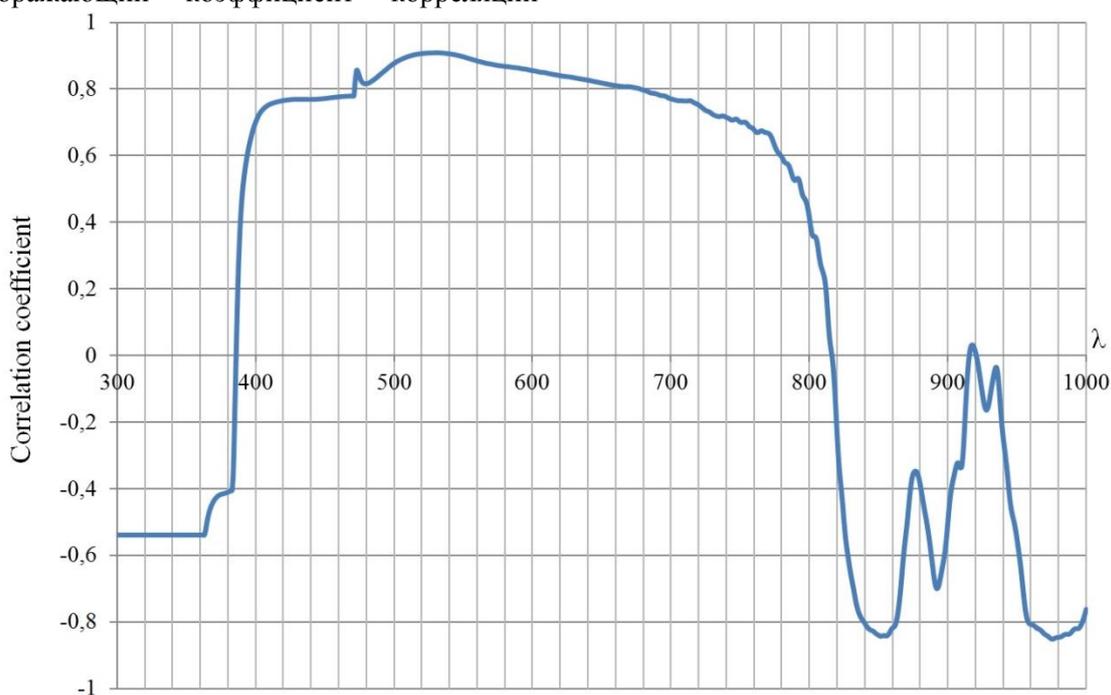


Рис. 3. Коэффициент корреляции между концентрацией ароматических соединений и оптической плотностью образцов трансформаторного масла.

Fig. 3. Correlation coefficient between the concentration of aromatic compounds and the transformer oil samples optical density.

Согласно данным таблицы, на длине волны 530 нм была построена линия тренда, проведена линейная аппроксимация и получена корреляционная прямая для определения количества ароматических углеводородов в трансформаторном масле

(рис.4). Отдельно выделено значение ароматической группы в образце масла ВГ (квадратный маркер), оно не отображено в источнике [23], но его реальное значение получается ~1%. В работе авторов [24] ароматическая составляющая масла марки ВГ

соответствует полученными нами данными, что подтверждает справедливость предложенного метода.

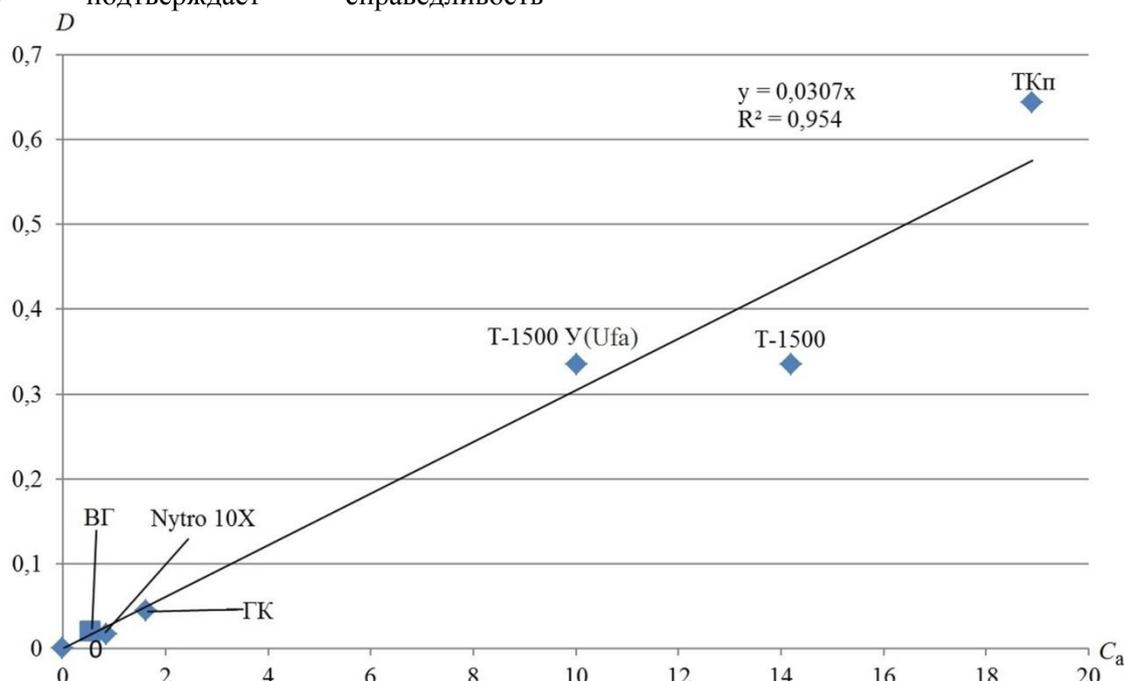


Рис. 4. Корреляционная зависимость оптической плотности от концентрации ароматических углеводородов.

Fig. 4. Correlation dependence of optical density on the concentration of aromatic hydrocarbons.

Данный метод позволяет с высокой точностью, без использования дополнительных реагентов и сложных вычислений при помощи полученной корреляционной прямой определить содержание ароматических соединений в трансформаторных маслах.

Далее авторами был разработан метод обнаружения воды в малых количествах трансформаторного масла спектральным методом. Для получения спектров пропускания использовался спектрофотометр AvaSpec-2048XL. Длина оптического пути составляет 50 мм, ширина щели – 1 нм. Спектры пропускания записывались со спектральным разрешением 1 нм.

Для исследования были отобраны шесть образцов трансформаторного масла с различными значениями влагосодержания, определенными в лаборатории: образец 1 (влагосодержание – 5,3 г/т, кислотное число – 0,035 мг/КОН); образец 2 (влагосодержание – 8,94 г/т, кислотное число – 0,064 мг/КОН); образец 3 (влагосодержание – 12,9 г/т,

кислотное число – 0,016 мг/КОН); образец 4 (влагосодержание – 15,08 г/т, кислотное число – 0,073 мг/КОН); образец 5 (влагосодержание – 17,53 г/т, кислотное число – 0,057 мг/КОН); образец 6 (влагосодержание – 20,25 г/т, кислотное число – 0,12 мг/КОН); образец 7 (вода).

Для каждого образца масла, помещенного в кварцевую кювету, освещаемого узконаправленным светом различной длины волны, были записаны спектры пропускания в интервале 400-1150 нм. Источник освещения – лампа прибора Ocean Optics LS-1, температура окружающей среды – 20 °С.

В ближнем инфракрасном диапазоне жидкая вода имеет полосы поглощения около 1950, 1450, 1200, 970 нм [25]. В качестве подтверждения данного факта были записаны спектры пропускания воды (рис. 5) и спирта (рис. 6) (который присутствует в состаренных маслах и присутствие ОН-группы которого проявляется в ближнем инфракрасном диапазоне) на длине волны 650-1150 нм с длиной оптического пути 50 мм.

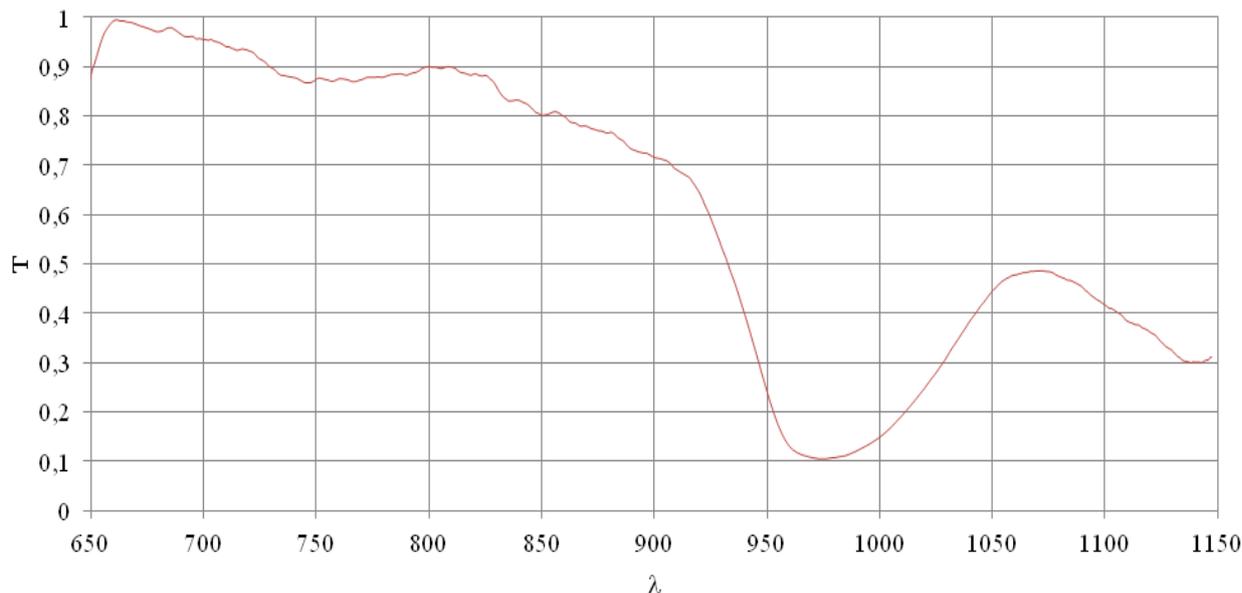


Рис. 5. Спектр пропускания воды на длине волны [650÷1150] нм с длиной оптического пути 50 мм.

Fig. 5. Water transmission spectrum at a wavelength of [650÷1150] nm with an optical path length of 50 mm.

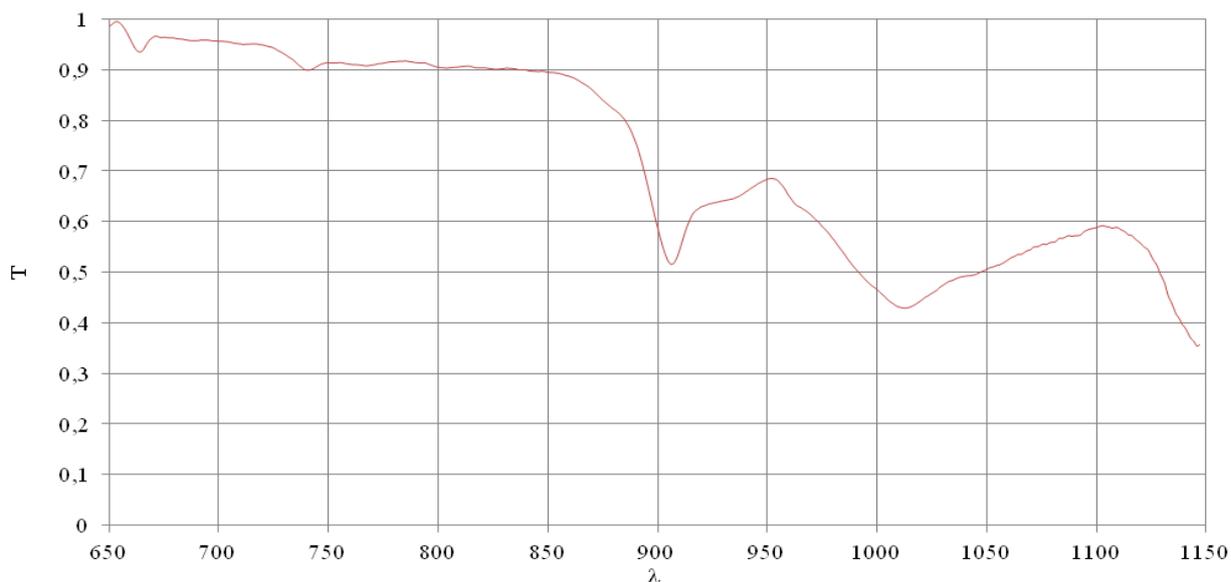


Рис. 6. Спектр пропускания спирта на длине волны [650÷1150] нм с длиной оптического пути 50 мм.

Fig. 6. Alcohol transmission spectrum at a wavelength of [650÷1150] nm with an optical path length of 50 mm.

На рис. 7 приведены нормированные спектры пропускания для всех шести образцов трансформаторного масла с различным содержанием влаги, где четко проявляется полоса воды в районе 980 нм. Форма спектров зависит от структурно-группового состава и от концентрации воды в

трансформаторном масле. Так как интенсивность сигнала от молекул воды значительно слабее, чем от углеводородной составляющей трансформаторного масла, для наглядности выделен и отображен (см. рис. 3) диапазон 900-1050 нм, в котором присутствует сигнал от молекул воды.

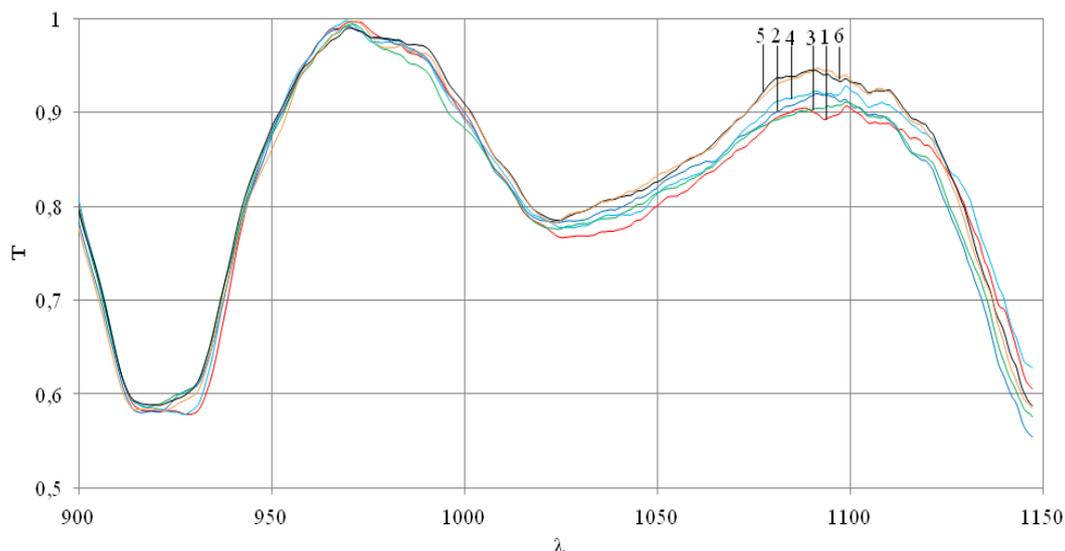


Рис. 7. Нормированные спектры пропускания (T) трансформаторных масел: 1 – «образец 1»; 2 – «образец 2»; 3 – «образец 3»; 4 – «образец 4»; 5 – «образец 5»; 6 – «образец 6».

Fig. 7. Normalized transmission spectra (T) of transformer oils: 1 – "sample 1"; 2 - "sample 2"; 3 - "sample 3"; 4 - "sample 4"; 5 - "sample 5"; 6 - "sample 6".

Используя данные рисунка 3, с помощью формулы (1) получены значения оптической плотности для спектров образцов трансформаторного масла:

$$D = \log(T/100). \quad (1)$$

Полученные нормированные спектры оптической плотности для всех образцов трансформаторного масла в диапазоне длины волны 900-1150 нм представлены на рис. 8.

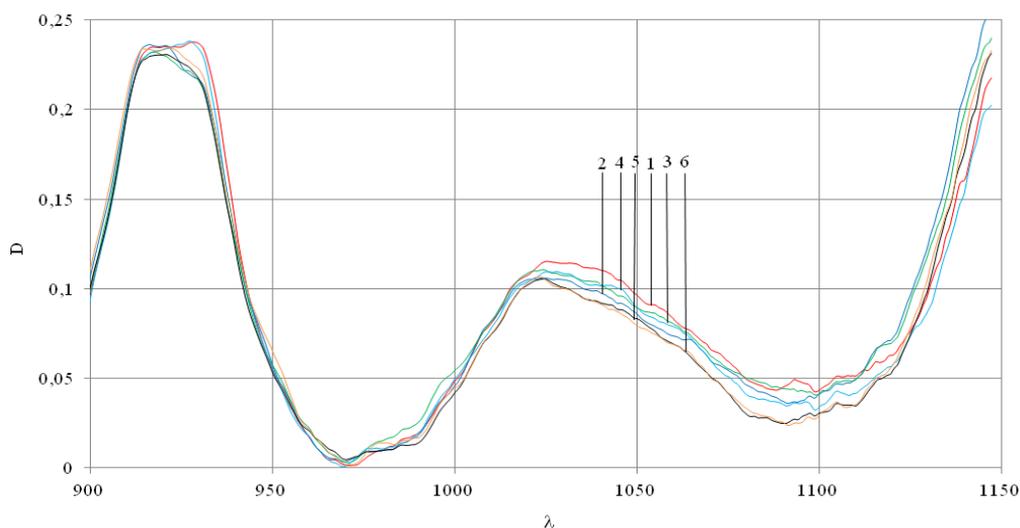
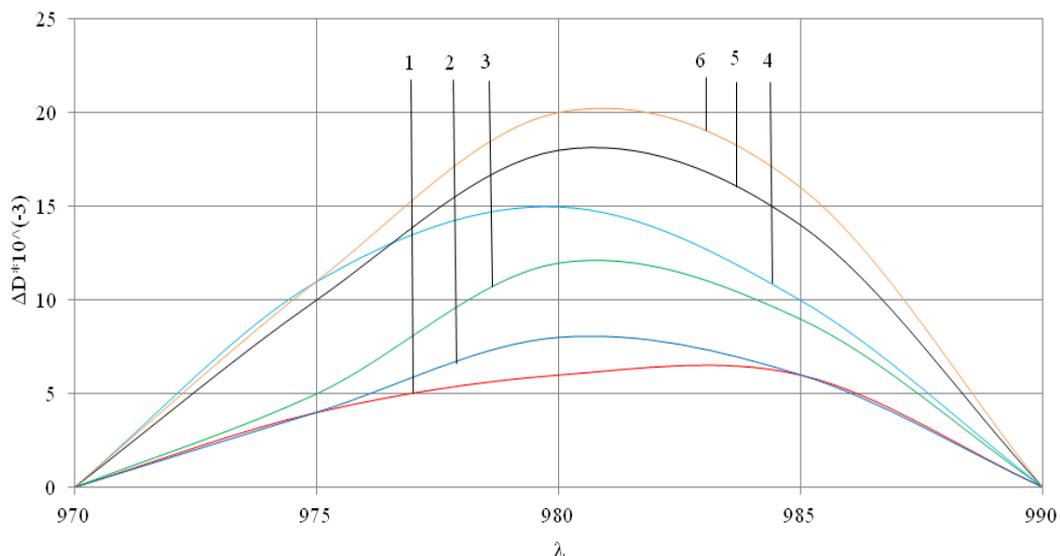


Рис. 8. Нормированные спектры оптической плотности (D) трансформаторных масел: 1 – «образец 1»; 2 – «образец 2»; 3 – «образец 3»; 4 – «образец 4»; 5 – «образец 5»; 6 – «образец 6» с выделенными спектрами молекул воды.

Fig. 8. Normalized spectra of optical density (D) of transformer oils: 1 – "sample 1"; 2 - "sample 2"; 3 - "sample 3"; 4 - "sample 4"; 5 - "sample 5"; 6 - "sample 6" with selected spectra of water molecules.

Далее согласно методу базовой линии [26] для всех образцов масла найдена разница между значениями базовой линии и линией спектра (ΔD) в районе длин волн 980 нм. Согласно полученным результатам построен

график зависимости ΔD от λ (рис. 9). В таблице 2 приведены полученные значения ΔD_{\max} для каждого из образцов трансформаторного масла.



1 – «образец 1»; 2 – «образец 2»; 3 – «образец 3»; 4 – «образец 4»; 5 – «образец 5»; 6 – «образец 6»
 1 - "sample 1"; 2 - "sample 2"; 3 - "sample 3"; 4 - "sample 4"; 5 - "sample 5"; 6 - "sample 6"

Рис. 9. Зависимость ΔD от длины волны (λ) для исследуемых образцов масла.

Fig. 9. Dependence of ΔD on the wavelength (λ) for the studied oil samples.

Согласно данным таблицы 2 была построена линейная аппроксимация и проведена корреляционная прямая для определения количества воды в трансформаторном масле (рис.10).

Таблица 2

Зависимость ΔD_{\max} от влагосодержания

Table 2

Dependence of ΔD_{\max} on moisture content

Sample number	Moisture content K , г/г	$\Delta D_{\max} \cdot 10^{-3}$
1	5,3	6
2	8,94	8
3	12,9	12
4	15,08	15
5	17,53	18
6	20,25	20

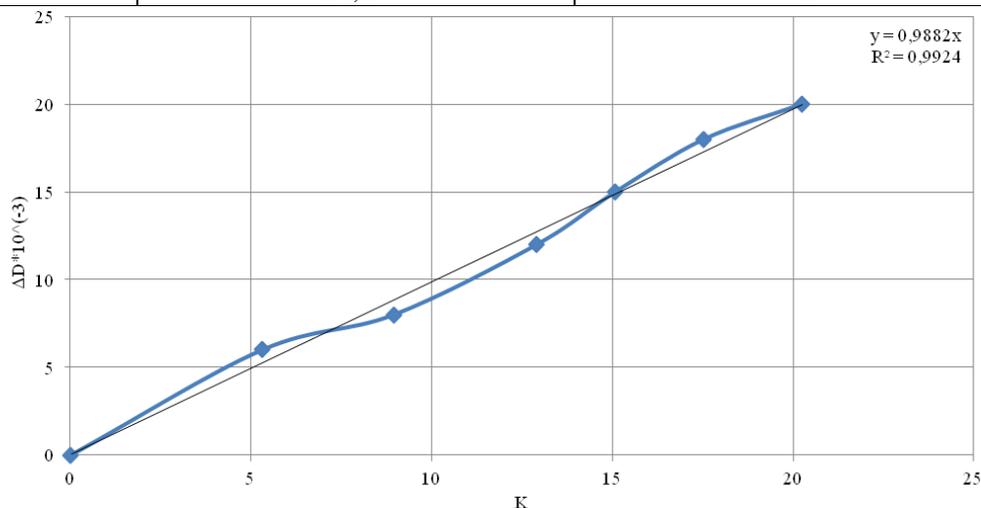


Рис. 10 Корреляционная прямая для определения влагосодержания трансформаторного масла по данным спектра пропускания.

Fig. 10 Correlation line for determining the moisture content of transformer oil according to the transmission spectrum data.

Таким образом, установлена корреляционная зависимость между оптической плотностью трансформаторного масла в области 980 нм и концентрации воды в масле. Предложен метод определения влагосодержания трансформаторного масла для решения актуальной задачи электроэнергетики. Данный метод позволяет с высокой точностью, без использования дополнительных реагентов и сложных вычислений при помощи полученной корреляционной прямой определить влагосодержание трансформаторного масла. Распространенность и доступность оптических спектрометров делает данный метод общедоступным.

Выводы

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

- впервые установлена корреляционная зависимость между оптической плотностью трансформаторного масла в области 530 нм и концентрацией ароматических соединений в масле.

- предложен метод определения ароматических соединений спектральным методом без использования дополнительных реагентов, на основе построенной корреляционной прямой. Для установления состава углеводородов применяют спектроскопию в видимой области спектра.

- впервые установлена корреляционная зависимость между оптической плотностью трансформаторного масла в области 980 нм и влагосодержанием трансформаторного масла.

- предложен метод определения воды в малых количествах в трансформаторном масле спектральным методом, на основе построенной корреляционной прямой, применяя спектроскопию в ближней ИК-области спектра.

Определение параметров влагосодержания и ароматических углеводородов в краткие сроки и без использования дополнительных дорогостоящих реагентов, а также сложных вычислений и специального оборудования без потери точности измерений позволяет улучшить качество диагностики трансформаторного оборудования.

Литература (References)

- [1] Chernozhukov I.I., Kryen S.E. *Okislyaemost' Mineral'nykh Masel* [Oxidability of Mineral Oils]. Moscow, 1955. 371 p. (In Russian).
- [2] Martins M., Augusta G., Gomes A.R. Comparative Study of the Thermal Degradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper. *IEEE Elec. Insul. Mag.*, 2012, vol. 28, no. 2, pp. 22-28.
- [3] Wilson A.C.M., *Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and properties*, London, 1980, 221 p.
- [4] Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. *Transformatornoe Maslo* [Transformer Oil]. Moscow, 1983, 296 p. (In Russian).
- [5] Dumitran L.M., Setnescu R., Notingher P. V., Badicu L.V., Setnescu T., Method for Lifetime Estimation of Power Transformer Mineral Oil. *Journal Fuel*, 2014, vol.117, pp. 756-762. doi:10.1016/j.fuel.2013.10.002.
- [6] Meshkatoddini M.R., Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, vol.1, pp. 384-388, doi:10.3844/ajeassp.2008.384.388.
- [7] Korobeynikov S.M., Lyutikova M.N. Investigation of Technological Operations Affecting the Determination of Concentration of Ionol Additive in Insulating Oil in High-Voltage Equipment *Problemele Energeticii Regionale*, 2018, vol.1 (36), pp. 96-105. doi: 10.5281/zenodo.1217282
- [8] Li H., Zhong L., Yu Q., Mori S., Yamada S. The Resistivity of Oil and Oil-Impregnated Press-Board Varies with Temperature and Electric Field Strength. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 1851-1856.
- [9] Saruhashi Daisuke, Bin Xiang, Zhiyuan Liu, Yanabu Satoru. Thermal Degradation Phenomena of Flame Resistance Insulating Paper and Oils. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 122-127.
- [10] Zukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J. An Analysis of AC Conductivity in Moist Oil-Impregnated Insulationpressboard. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 2156-2164.
- [11] K. Miners, "Particles and Moisture Effect on Dielectric Strength of Transformer Oil Using VDE Electrodes," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, vol. 101, no. 3, pp. 751-756, doi: 10.1109/TPAS.1982.317291.
- [12] Wang S.Q., Zhang G.J., Suwarno M.H., Tanaka Y, Takada T, Effects of Paper-Aged State on

- Space Charge Characteristics in Oil Impregnated Paper Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, vol. 19 (6), pp. 1871-1878.
- [13] Arakelyan V.G. Diagnostika Sostoyaniya Izolyatsii Maslonapolnennogo Oborudovaniya po Vlagosoderzhaniyu Masla [Diagnostics of the State of Insulation of Oil-Filled Equipment by the Moisture Content of Oil]. *Electrical engineering*, 2004, no. 3, pp. 34–39. (In Russian)
- [14] Kaanagbara L., Hilary I., Inyang J. W., Hilger H. Aromatic and Aliphatic Hydrocarbon Balance in Electric Transformer Oils. *Fuel*, 2010, vol. 89, Issue 10, pp. 3114-3118. doi:10.1016/j.fuel.2010.02.013
- [15] Pillai I., Ritchie L., Heywood R., Wilson G., Pahlavanpour B., Setford S., Saini S. Development of an Improved Analytical Method for the Determination of Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Transformer Oil. *Journal of Chromatography A*, 2005, vol. 1064, Issue 2, pp. 205-212. doi:10.1016/j.chroma.2004.12.066.
- [16] Lizunov S.D., Lohanina A.K. *Silovyye Transformatory* [Power Transformers] Moscow, 2004. 616 p. (In Russian).
- [17] Margolis S.A., Mele T. Systematic Bias in the Measurement of Water in Oils by Tubular Oven Evaporation and Azeotropic Distillation. *Anal. Chem.*, 2001, vol. 73, no. 20, pp. 4787–4792.
- [18] Margolis, S. A. Amperometric Measurement of Moisture in Transformer Oil Using Karl Fischer Reagents. *Anal. Chem.*, 1995, vol. 67, no. 23, pp. 4239-4246.
- [19] Arakelian, V.G., Fofana, I. Water in Oil Filled High Voltage Equipment, Part II: Water Content as Physicochemical Tools for Insulation Condition Diagnosis. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2007, vol. 23, pp. 15–24.
- [20] Yusoff S.F.A.Z., Mezher M.H., Amiri I.S., Ayyanar N., Vigneswaran D., Ahmad H., Zakaria R. Detection of Moisture Content in Transformer Oil Using Platinum Coated on D-Shaped Optical Fiber // *Optical Fiber Technology*. 2018. Vol. 45, P. 115-121.
- [21] Dahim M, Al-Mattarneh H., Ismail R. International Simple Capacitor Dielectric Sensors for Determination of Water Content in Transformer Oil. *Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol.7 (3.32), pp. 157-160
- [22] N'cho J. S., Fofana I. Review of Fiber Optic Diagnostic Techniques for Power Transformers. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 7: pp.1789.
- [23] RD 34.45-51.300-97 *Ob'em i Normy Ispytaniya Energooborudovaniya* [The Scope and Standards of Testing Electrical Equipment], Moscow, 2001, 177 p. (In Russian).
- [24] Gaynullina L.R., Tutubalina V.P. Gazostoykost' i Termostabil'nost' Transformatornykh Masel v Elektricheskom Pole [Gas Resistance and Thermal Stability of Transformer Oils in an Electric Field]. *Vestnik YUUrGU. Series "Energy"*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 46-51
- [25] Krishchenko V.P. *Blizhnyaya Infrakrasnaya Spektroskopiya* [Near Infrared Spectroscopy]. Moscow, 1997, 638 p. (In Russian).
- [26] Korovkin M.V., Anan'yeva L.G. *Infrakrasnaya Spektroskopiya Karbonatnykh Porod i Mineralov* [Infrared Spectroscopy of Carbonate Rocks and Minerals]. Tomsk, 2017, 87 p.

Сведения об авторах.



Козлов Владимир Константинович
д.ф.-м.н, профессор.
Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: kozlov_vk@bk.ru



Куракина Ольга Евгеньевна, к.т.н,
доцент. Область научных интересов: диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.
E-mail: random_jj@mail.ru

Development of Low-Temperature Block Type Facility for Sea Water Desalination

Burdo O.G.¹, Terziev S.G.², Mordynskiy V.P.¹, Sirotiyuk I.V.¹, Fateeva Ya.A.¹,
Molchanov M.Yu.¹

¹Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

²PRJSC "ENNI FOODS", Odessa, Ukraine

Abstract. This work is devoted to the fresh water deficit analysis. The importance of the research concerning water treatment is emphasized. A comparative analysis of water demineralization traditional methods is given and prospects for low-temperature desalination methods are shown. The increase in the world interest to the research of the block freezing innovative technologies was established, the priority in which belongs to the authors of this work. The aim of the work is to improve the block freezing devices during their transferring to a continuous operation mode. Achievement of this aim lies in a proposed universal design of the apparatus, in which the processes of crystallization, separation and melting of ice are sequentially implemented. A module for a continuous seawater desalination facility was developed. The energy and operational advantages of the proposed method were described. The system modeling of this equipment was carried out. The target function of the modeling determined the key parameters of the process of the ice block gravitational separation — energy and salinity. It was proposed to correct the traditional calculation principles for the outflow in channels by the "capillary drag" coefficient, which takes into account the relief surface of the ice capillaries. A technique for the engineering calculation of ice block salinity during separation was offered. The most significant result of the work lied in the fact of possibility to transfer the block freezing facilities to the continuous mode of sea water desalination with guaranteed salinity indicators. The significance of the work was that an energy-efficient freezing facility with ice recycling for the sea water demineralization in the flow was created.

Keywords: heat and mass transfer, block freezing, separation, desalination, energy efficiency.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.02>

UDC: 628.165:551.463:66.045.5:66.021.3/.4

Elaborarea unei instalații de tip bloc pentru demineralizarea apei de mare la temperaturi joase

Burdo O.G.¹, Terziev S.G.², Mordânsky V.P.¹, Sirotiuk I.V.¹, Fateeva Ia.A.¹, Molcianov M.Iu.¹

¹Academia Națională de Tehnologii Alimentare din Odessa, Odessa, Ucraina

²SA «Enni Foods», Odessa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a îmbunătăți aparatura de congelare de tip bloc la trecerea acesteia în regim continuu de funcționare. Pentru a atinge acest obiectiv, se propune un design universal al aparatului, în care procesele de cristalizare, separare și topire a gheții sunt desfășurate în mod consecutiv. Este elaborat un modul de instalație de desalinizare continuă a apei de mare. Timpul procesului de formare a blocurilor de gheață este argumentat din considerente de minimizare a cheltuielilor de energie. Parametrii-cheie ai procesului de separare gravitațională a blocurilor de gheață, și anume energia și conținutul de sare, au fost determinați prin funcția-țintă de modelare. Se iau în considerare aspectele statice (balanța energetică și a balanța materială) și cele cinetice (balanța forței capilare și viteza de scurgere) ale separării. Se propune corectarea principiilor tradiționale de calculare a debitului în canale cu ajutorul coeficientului de "frânare capilară", care ia în considerare suprafața de relief a capilarelor de gheață. Valoarea acestui coeficient a fost stabilită în mod experimental. Se propune o metodă de calcul tehnic al conținutului de sare din blocul de gheață în timpul separării. Cel mai important rezultat al lucrării este că s-a dovedit posibilitatea de a transfera unitatea de congelare în bloc la modul de desalinizare continuă a apei de mare cu indici garantați ai conținutului de sare. Semnificația lucrării constă în faptul, că a fost creată o instalație de congelare eficientă din punct de vedere energetic, cu reciclare a gheții pentru demineralizarea apei de mare în flux.

Cuvinte-cheie: schimb de căldură și masă, congelare în bloc, separare, desalinizare, eficiență energetică.

©Бурдо О.Г., Терзиев С.Г.,
Мордынский В.П., Сиротюк И.В.,
Фатеева Я.А., Молчанов М.Ю.

Разработка низкотемпературной установки блочного типа для деминерализации морской воды
Бурдо О.Г.¹, Терзиев С.Г.², Мордынский В.П.¹, Сиротюк И.В.¹, Фатеева Я.А.¹, Молчанов М.Ю.¹

¹Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, Украина

²ЧАО «Энни Фудз», Одесса, Украина

Аннотация. Проведен анализ дефицита пресной воды. Подчеркнута актуальность исследований в направлении водоподготовки. Показано, что основной запас воды на Земле сосредоточен в морях. Даны сравнительный анализ традиционных методов деминерализации воды и приведены перспективы низкотемпературных методов опреснения. Установлен рост интереса в мире к исследованиям инновационных технологий блочного вымораживания, приоритет в которых принадлежит авторам. Целью работы является совершенствование аппаратов блочного вымораживания при переводе их в непрерывный режим работы. Для достижения поставленной цели предложена универсальная конструкция аппарата, в которой последовательно реализуются процессы кристаллизации, сепарирования и плавления льда. Разработан модуль установки непрерывного опреснения морской воды. Из условий минимизации энергетических затрат обосновано время процесса формирования блока льда. Установлено число сепараторов — 3. В пятой емкости осуществляется процесс плавления блока льда и получения пресной воды. Система управления периодически переключает электромагнитные клапана на линиях холодильного агента и продукта, что обеспечивает последовательность и синхронность работы аппаратов. Показаны энергетические и эксплуатационные преимущества предложенного способа. Проведено системное моделирование такого оборудования. Целевой функцией моделирования определены ключевые параметры процесса гравитационного сепарирования блока льда — энергетика и солесодержание. Рассмотрены статика (энергетический и материальный балансы) и кинетика (баланс сил в капилляре и скорость истечения) сепарирования. Предложено традиционные принципы расчета истечения в каналах скорректировать коэффициентом «капиллярного торможения», который учитывает рельефную поверхность капилляров льда. Значение этого коэффициента установлено экспериментально. Предложена методика инженерного расчета солесодержания в блоке льда при сепарировании. Наиболее существенным результатом работы является то, что доказана возможность перевода установки блочного вымораживания в режим непрерывного опреснения морской воды с гарантированными показателями солесодержания. Значимость работы заключается в том, что создана энергоэффективная вымораживающая установка с рециклингом льда для деминерализации морской воды в потоке.

Ключевые слова: теплообмен, блочное вымораживание, сепарирование, опреснение, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит воды в мире растет. Если потребление воды и загрязнение водных ресурсов нашей планеты будет идти такими же темпами, как и сейчас, человечество рискует уже к 2025 году столкнуться с серьезной нехваткой воды. Такие актуальные проблемы как демографический рост, интенсификация хозяйственной деятельности и быстрое развитие промышленного производства, глобальное изменение климата, урбанизация и прочее приводят к истощению водных ресурсов нашей планеты. Экономическое и социальное развитие в большей мере оказывают влияние на уровень потребления воды населением и сферами народного хозяйства. Сегодня в мире один человек потребляет в среднем в два раза больше воды, чем в 1900 году, и эта тенденция продолжится в связи с изменением привычного потребления в странах с развивающейся экономикой. Известны три способа удовлетворения нужд экономики при сохранении природных ресурсов: это уменьшение расхода ресурсов, поиск замены

невозобновляемых ресурсов, а также развитие системы переработки и повторного использования материалов. Дефицит энергетических ресурсов и увеличение их стоимости оказывают значительное влияние на производство воды, использование и очистку, включая перспективу опреснения и повторного использования. В то же время, истощающиеся водные ресурсы необходимы для растущих потребностей при генерации энергии. Необходимо согласовать водную и энергетическую стратегии в сотрудничестве с инициативами сообществ и соответствующими технологиями.

Сложившаяся ситуация стимулирует бурное развитие как самостоятельного научно-технического направления — водоподготовки.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И ГИПОТЕЗ

Нормами на питьевую воду предусмотрено, что их солесодержание должно быть менее 1 г/л, и лишь по специальному решению разрешается

использовать воду с солесодержанием до 1,5 г/л. Однако в ряде регионов поверхностные и подземные воды содержат больше солей. Морская вода, составляющая основной запас воды на Земле, содержит от 10 до 40 г/л солей. Для использования таких вод для питьевых целей ее подвергают опреснению термическими методами, обратным осмосом, электродиализом и комбинированными способами.

Старейшим методом получения обессоленной воды (дистиллята) является термический метод — перегонка, дистилляция, выпарка [1-3]. Теоретические основы термических методов, конструктивное оформление глубоко отработаны. В [4] представлен метод опреснения в выпарной установке с падающей пленкой, в качестве теплопередающей поверхности которой выступает пучок горизонтально расположенных труб. Учеными Шанхайского и Дальнянского морского университетов (Китай) предложен метод солнечного межфазного опреснения [5]. В Университете Сиань Цзяотонга (Китай) рассмотрена распылительная выпарная установка многоэффективной дистилляционной опреснительной системы [6].

Извлечение растворенных веществ из воды может производиться мембранными методами. Уровень обессоливания определяется селективностью мембран [7]. Методом нанофильтрации можно достигнуть частичного обессоливания, удалив соли жесткости вместе с двухзарядными анионами и частично — однозарядные катионы натрия и калия и анионы хлора [8, 9].

Более глубокое обессоливание обеспечивает низконапорный обратный осмос. Обратный осмос характеризуется использованием мембран с минимальным размером пор, соизмеримым с размером одиночных ионов, поэтому извлекаются все растворенные ионы и органические молекулы [10]. Рабочее давление от 7 до 70 атм. Однако, использование обратного осмоса имеет ряд ограничений. Вода, подаваемая на мембраны, не должна содержать железа, грубых механических примесей, должна быть умягченной и т.п. Это необходимо для предотвращения отложения малорастворимых солей на поверхности мембран и их разрушения [11-13].

В таб. 1 приведено оценочное сравнение методов обессоливания по трем уровням: минимальный (Min), максимальный (Max) и средний (Mid).

Таблица 1 / Table 1.

Сравнение методов деминерализации / Comparison of demineralization methods.

Параметр / Parameter	Ионный обмен / Ionic exchange	Обратный осмос / Reverse osmosis	Электродиализ / Electrodialysis	Выпарка / Evaporation
Надежность / Reliability	Max	Mid	Min	Max
Степень обессоливания / Desalination level	Max	Mid	Min	Mid
Удаление органики / Organics removal	Min	Max	Min	Mid
Удаление микрофлоры / Microflora removal	Min	Max	Mid	Max
Удаление взвесей / Mist removal	Min	Max	Min	Max
Удаление растворенных газов / Dissolved gases removal	Min	Min	Min	Max
Требования к подготовке / Preparation requirements	Min	Max	Max	Mid
Расход реагентов / Reagent consumption	Max	Min	Min	Min
Расход питающей воды / Feeding water flow	Min	Max	Max	Min
Объем отходов / Waste volume	Min	Max	Mid	Min
Возможность переработки отходов / Recyclability	Max	Min	Min	Max
Возможность сброса отходов / Waste discharge capability	Min	Max	Mid	Min

Однако, пока сохраняется ориентация на использование простых и технологически отработанных дистилляционных систем. Вместе с тем растет интерес к холодильным технологиям опреснения. Так, учеными Университета Халифа (ОАЭ) представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих актуальность и перспективность технологии опреснения вымораживанием [14]. В Университете Ньюкасла (Австралия) предложен метод опреснения посредством частичной заморозки капель солевых растворов [15]. Совместными усилиями ученых Китая, США, Франции и Великобритании представлена технология опреснения морской воды путем распылительного вымораживания [16].

Помимо того, существуют и комбинированные системы опреснения с применением процесса вымораживания. Например, в Пекинском университете гражданского строительства и архитектуры [17, 18] рассмотрены методы опреснения в системах: «вымораживание — смачивание — центрифугирование», «вымораживание — сепарирование — центрифугирование», «вымораживание — СВЧ обработка — центрифугирование», «вымораживание — СВЧ обработка — сепарирование — центрифугирование».

Ученые Мексики и Франции провели целый комплекс экспериментальных исследований, направленных на изучение проблематики процесса опреснения вымораживанием, в частности попадание кристаллов соли в лед при его формировании [19].

Процесс опреснения соленой воды вымораживанием основан на селективных свойствах кристаллической решетки льда, которая не допускает замены атомов H^+ или O^- атомами других солей. В процессе медленного охлаждения раствора подвижность молекул воды и солей уменьшается, а упорядоченность увеличивается, приближаясь к строению элементарной кристаллической решетки льда. Благодаря разным значениям свободных энергий у молекул воды в решетке льда и молекул солей в их решетках, происходит отделение от льда ионов солей, которые оттесняются от поверхности кристалла льда. Для успешного опреснения воды вымораживанием необходимо на практике

поддерживать такие режимы кристаллизации, когда образуются крупные и пресные блоки кристаллов льда [20].

Достоинством таких установок являются: простота конструкции, надежность, отсутствие системных потерь холода. Проведенный анализ показывает, что термические методы опреснения даже в случаях утилизации низкопотенциальной теплоты производственных процессов либо в составе многоцелевых энергетических комплексов выдвигают достаточно сложную проблему — предотвращение образования накипи на теплообменных поверхностях опреснителей. Методы опреснения вымораживанием не имеют такой проблемы, но они пока либо трудоемки, либо энергоемки, либо требуют сложного оборудования. В добавок к этому всему, отсутствие режима непрерывной работы значительно усложняет применение данной технологии в условиях тоннажного производства, что является критическим недостатком в задачах опреснения. В данной работе поставлена задача доказать возможность перевода установки блочного вымораживания в режим непрерывного опреснения морской воды с гарантированными показателями соленосодержания.

Классификация низкотемпературных систем водоподготовки и формулировка рабочей гипотезы.

Способы водоподготовки существенно отличаются по энергетическим затратам при их реализации. Наименьшие затраты энергии имеют мембранные методы, поскольку они не требуют затраты работы в системе на фазовые преобразования. Наибольшие затраты энергии требуют термические методы, поскольку в результате процесса образуется менее организованная структура воды — пар. А это связано со значительными энергетическими затратами. Холодильные способы обладают меньшей коррозией, меньшими капитальными затратами, более высокой термодинамической эффективностью. У них отсутствует накипеобразование. По сравнению с мембранными опреснителями, холодильные характеризуются большей степенью извлечения пресной воды, они нечувствительны к составу и концентрации примесей, не требуют тщательной

предварительной очистки воды. Физические принципы, которые лежат в основе деминерализации соленой воды вымораживанием, обуславливают ряд его неоспоримых преимуществ. Во-первых, количество энергии, которое необходимо для получения 1 кг пресной воды при вымораживании в 7 раз меньше, чем при термических методах (дистилляции, либо выпарки). Во-вторых, деминерализация вымораживанием нечувствительна к минеральному составу исходной воды. В-третьих, показатель качества пресной воды по сухому остатку (меньше 1 кг солей на 1 м³ воды) может быть достигнут во всех случаях. При обосновании выбора метода опреснения воды в конечном итоге решающее значение имеют экономические показатели. На топливную составляющую падает (45—68)% стоимости опреснения воды дистилляцией и (30—43)% — вымораживанием. Представляется, что определенный импульс к развитию техники опреснения дадут технологии блочного вымораживания. Перспективы применения такой техники высветлены учеными университетов Колумбии, Испании, Марокко, Малайзии [21, 22].

Впервые технология блочного вымораживания была предложена авторами этой статьи (Бурдо О.Г. и др., *патент Украины № UA 35222*). Основные этапы метода следующие: погружение низкотемпературных поверхностей в раствор — намораживание на поверхностях блока льда — сьем блока льда — гравитационное сепарирование блока от раствора. Вымораживающие установки блочного типа оказались эффективными при концентрировании дорогих соков, виноматериалов и экстрактов. Собственно, именно для таких задач они и развивались. Достижения авторов в этих направлениях изложены в монографии (Бурдо О.Г., Мордынский В.П. и др., *Техника блочного вымораживания*, 2011).

Адаптация технологии к опреснению морской воды требует решения ряда вопросов. Во-первых, это производительность установки. Во-вторых, непрерывность в работе. В-третьих, полная автоматизация процессов. При переходе к тоннажному производству оригинальная конструкция пластинчатых испарителей не предполагает масштабирования. С ростом

производительности, а, следовательно, площади пластинчатых испарителей, возникают серьезные сложности с обеспечением регламентаций по параллельности и плоскостности их поверхностей. Операции съема блока льда и сепарирования сложны для автоматизации. Представляется, что решение этих проблем связано с ликвидацией самой операции съема блока льда.

В работе сформулирована научно-техническая гипотеза: «перевод установок блочного вымораживания на непрерывный режим работы при повышении их производительности возможно при исключении традиционной операции съема блока льда и осуществлении процесса гравитационного сепарирования непосредственно на поверхностях кристаллизации». В результате:

- устраняется необходимость в механизмах съема блока и его транспортировки;
- исключаются расходы энергии на расплав адгезионного слоя между блоком и поверхностью;
- упрощается схема автоматического управления процессами в установке.

Все низкотемпературные технологии включают три основных процесса: льдообразование, отделение льда от рассола и плавление льда. Оптимизация технологии требует системного подхода при совершенствовании режимов организации каждого из этих этапов.

Постановка задачи системного моделирования основных процессов.

Основными процессами предлагаемой технологии деминерализации воды являются кристаллизация и гравитационное сепарирование. На первом этапе моделирования важно определить технологический параметр, который имеет существенное значение и на кинетику, и на энергетику процессов и кристаллизации, и сепарирования. Таким связывающим параметром, который позволит «сшивать» математические модели этих двух стадий технологии, предлагается принять температуру поверхности кристаллизации (t_0). Первый этап технологии (процесс кристаллизации) изложен в работе авторов (Бурдо О.Г. и др., *Проблемы региональной энергетики*, 2022). Цель настоящих

исследований установить зависимость между энергетическими, экономическими и качественными показателями процесса сепарирования, разработать инженерную методику и конструкцию установки для деминерализации воды методом блочного вымораживания. Параметрическая модель процесса гравитационного сепарирования имеет вид (рис. 1).

От температуры t_0 зависит время процесса кристаллизации τ_1 и массовый расход льда в блоке M_B и его пористость ε . Эти же

параметры влияют и на содержание солей в очищенной воде X_B .

Важное значение на эффективность сепарирования, на значение производительности по очищенной воде M_B оказывает температура t_C , при которой организуется процесс сепарирования. Мощность N_C , которая необходима для процесса гравитационного сепарирования определяет энергетику и время процесса τ_2 .

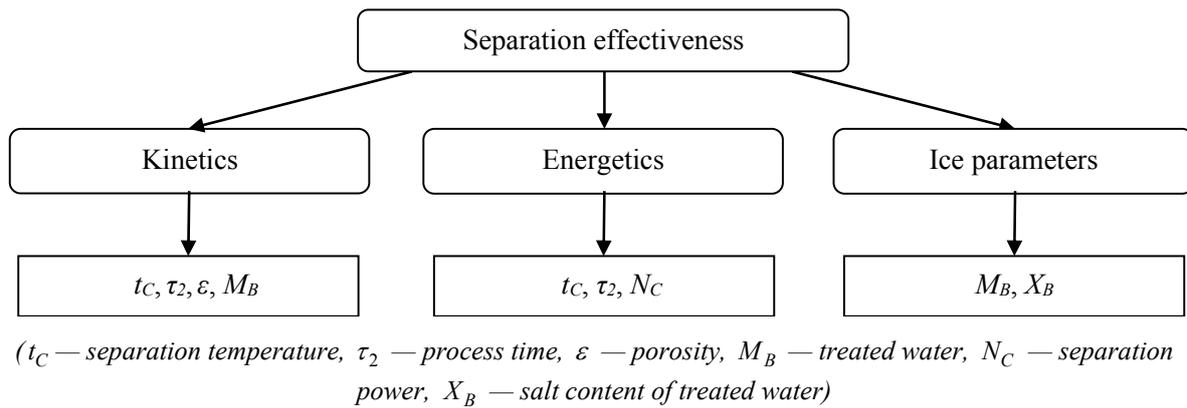


Рис. 1. Взаимосвязь технологических параметров при гравитационном сепарировании.
Fig. 1. Interrelation of technological parameters during gravitational separation.

Рассмотрим тепловой и материальный балансы процесса сепарирования. Опыты по процессам гравитационного сепарирования проводились в исследованиях криоконцентрирования различных экстрактов, виноматериалов, соков, и пр. Целью этих исследований было установить технологически целесообразный режим сепарирования, при котором потери целевых компонентов со льдом окажутся приемлемыми. Работы по исследованию механизмов гравитационного сепарирования, установления количественных зависимостей процесса не обнаружено. Вместе с тем, анализ работ по процессам криоконцентрирования в установках блочного вымораживания показал, что просматривается общая закономерность кинетики сепарирования (рис. 2).

Анализ экспериментальных зависимостей, полученных при сепарировании гранатового сока (рис. 2), и их сравнение с подобными опытами позволяет предложить следующий

механизм процесса. В 1 периоде происходит эвакуация раствора из пограничного слоя. В опытах рост концентрации (X) на разных растворах составляет 2-8%, а период длится 15-40 мин. Очевидно, это соответствует градиенту концентраций в пограничном слое. Во 2 периоде идет эвакуация раствора из капилляров льда. Период характеризуется примерным постоянством расходов удаляемого раствора и его концентрации. В 3 периоде наблюдается монотонное снижение X . Угол наклона в 3 периоде в исследованиях серьезно отличался. Период длился часами, путей управления процессом не предлагалось.

Представляется, что характер периода 3 (снижение X) объясняется подтайкой льда, смешивания концентрата с водой. Организация процесса сепарирования при низких температурах позволит сохранить структуру льда, стабилизировать расход и концентрацию раствора (пунктирная линия, рис. 2).

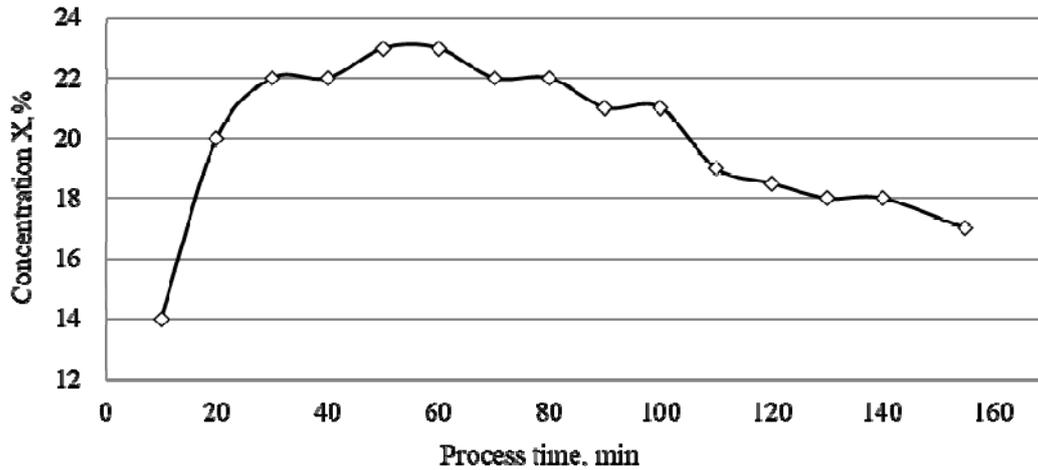


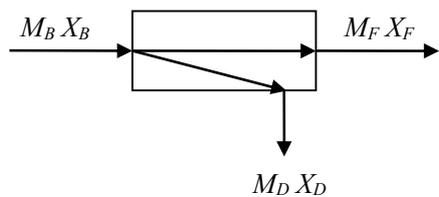
Рис. 2. Кинетика сепарирования. / Fig. 2. Separation kinetics.

Тепловое состояние блока льда определяется его взаимодействием с окружающей средой. От окружающей среды теплота (Q_E) передается конвекцией к поверхности блока и расходуется частично на нагрев льда (Q_H) до температуры плавления и частично на плавление (Q_M):

$$Q_E = Q_B = \alpha F(t_E - t_L) \quad (1)$$

При этом, нагревается и изменяется агрегатное состояние блока льда:

$$Q_B = Q_H + Q_M = M_B c_{pB}(t_M - t_B) + M_B \Omega \quad (2)$$



M_B – начальный массовый поток льда с концентрацией X_B / initial mass flow of ice with concentration X_B ;
 M_F – конечный массовый поток льда с концентрацией X_F / final mass flow of ice with concentration X_F ;
 M_D – массовый поток стоков с концентрацией X_D / mass flow of drains with concentration X_D .

Рис. 3. Балансовая модель материальных потоков при сепарировании. / Fig. 3. Balance model of material flows during separation.

Разделение потоков выражается соотношением полного материального баланса и баланса по сухим веществам:

$$\left. \begin{aligned} M_B - M_F &= M_D \\ M_B X_B - M_F X_F &= M_D X_D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из системы (3) определяются неизвестные составляющие материального баланса процесса сепарирования.

В соотношении (1-2) принято: M_B — массовый расход льда, c_{pB} — удельная теплоемкость льда, Ω — удельная теплота плавления льда.

Таким образом, из капилляра на первом и втором этапах эвакуируется только раствор (M_S), а на 3 этапе — смесь раствора и расплава (воды, M_W).

Статическая балансовая модель материальных потоков при сепарировании (рис. 3) устанавливает связь между ними.

Кинетическая модель процесса сепарирования.

1. Постановка задачи. Рассмотрим капилляр блока льда, заполненный водным раствором. В процессе кристаллизации разность плотностей жидкости внутри капилляра и разделяемого раствора практически близка к нулю. Если блок льда не находится в контакте с разделяемым раствором, что характерно для процесса сепарирования, то возникает движущая сила (разность плотностей раствора в капиллярах и воздуха). Это приводит к эвакуации

раствора из капилляра. Динамика такого процесса определяется соотношением сил, действующих на раствор (рис. 4).

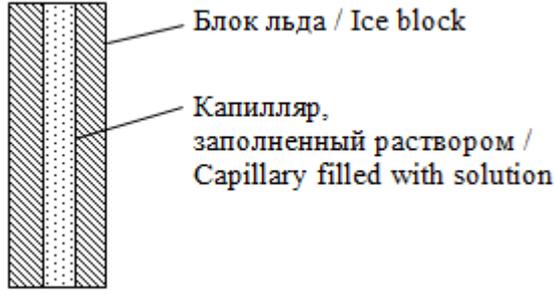


Рис. 4. Схема представительной ячейки.
Fig. 4. Scheme of representable cell.

2. Баланс сил в капилляре.

На жидкость внутри капилляра действует комплекс сил, которые определяют режим движения. Движущей силой является разность давлений внутри капилляра и окружающей блок льда среды (атмосферное давление). Масса жидкости, плотность которой ρ , создает гидростатическое давление, которое пропорционально высоте капилляра l :

$$P_{HS} = \rho \cdot g \cdot l_i \quad (4)$$

Гидростатический потенциал (4) должен обеспечить преодоление сил вязкостного трения при движении жидкости со скоростью w . Общий баланс сил запишется:

$$\Delta P = \rho g l - \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[\frac{\lambda \cdot l_i}{d_i} + \sum \xi \right] - \frac{\sigma}{d_i} \quad (5)$$

В соотношении (5) приняты обозначения: λ — коэффициент трения; ξ — коэффициенты местных гидравлических сопротивлений; d — диаметр капилляра.

В рассматриваемой задаче $[\sum \xi] = 1,5$ [23]. Кроме рассмотренных сил, на характер движения будут оказывать силы поверхностного натяжения, вклад которых обратно пропорционален диаметру капилляра.

Таким образом, из капилляра на первом этапе эвакуируется только раствор (M_S), а на следующем этапе — смесь раствора и расплава (воды, M_W).

Кинетическое уравнение процесса сепарирования запишется:

первый этап — $0 < \tau < \tau_p$

$$\frac{dM_B}{\rho d\tau} = \frac{\Delta P}{R_H} \quad (6)$$

второй этап — $\tau > \tau_p$

$$\frac{dM_B}{\rho d\tau} + \frac{dM_W}{\rho_W d\tau} = \frac{\Delta P}{R_H} \quad (7)$$

Второй этап начинается в момент (τ_p), когда стал плавиться лед.

Сила, которая действует в направлении поля гравитации, определяется по соотношению:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} l (\rho - \rho_W) g \quad (8)$$

Аналитическое решение приведенной модели связано с определением компонент скорости по уравнению Навье-Стокса. Для условий рассматриваемой задачи корректно пренебречь полем давлений в капилляре и перейти к одномерной записи, полагая, что основные изменения происходят в осевой координате. Тогда:

$$\rho w \frac{dw}{dl} = \rho g + \mu \frac{d^2 w}{dl^2} \quad (9)$$

Но, даже при таких упрощениях решение задачи аналитическими методами проблематично.

3. Применение методов теории подобия для моделирования процесса гравитационного сепарирования.

Практика решения задач фильтрования основана полностью на эмпирическом подходе, установлении констант фильтрования. На базе этого опыта и принципов расчета задач истечения составим упрощенную модель сепарирования блока льда. При сепарировании идеальной жидкости справедливо уравнение Бернулли:

$$P_0 + \rho w_0^2 + 2gH_0 \rho = P_1 + \rho w_1^2 + 2H_1 \rho g \quad (10)$$

Откуда:

$$w_1 = \sqrt{2g\Delta H + \frac{P_0 - P_1}{\rho}} \quad (11)$$

Поскольку в рассматриваемом случае $P_0 = P_{atm} = P_1$, то приходим к формуле Торричелли:

$$w_1 = \sqrt{2gH} \quad (12)$$

Формула (12) отражает максимально возможную скорость движения жидкости в капилляре. Действительная скорость корректируется коэффициентом расхода μ_1 .

Принято коэффициент расхода определять по соотношению

$$\mu_1 = a + \frac{B}{\sqrt{Re}} \quad (13)$$

Константы a и B в соотношении (13) зависят от значения числа Рейнольдса:

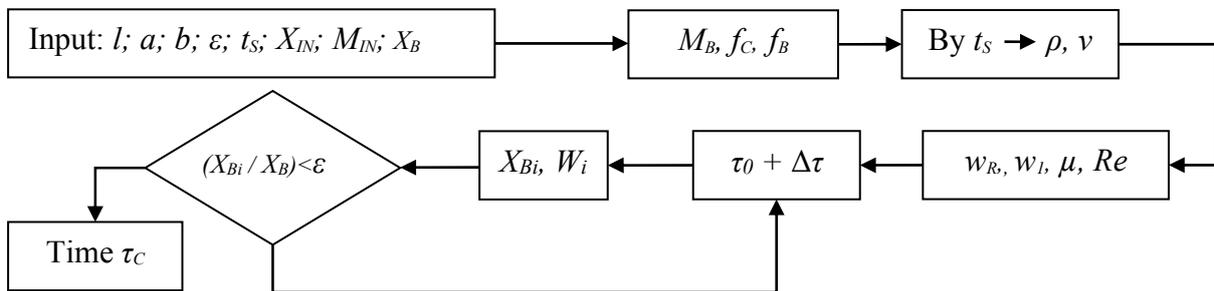
$$Re = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu} \quad (14)$$

Для значения числа Рейнольдса истечения $Re \approx 105$, $a = 0,58$, а $B = 0,89$. Для других значений чисел Рейнольдса эти константы

определяются экспериментальным путем. Число Рейнольдса в комплексе характеризует свойства раствора и геометрические параметры канала. Естественно, исключительно для конкретной системы, для гладких каналов. Однако, каналы блока льда специфичны. Это система микропор и разветвленных микроканалов. Предлагается учесть эти факторы поправочным коэффициентом μ_2 . Это коэффициент «поверхностного торможения», значение которого установлено экспериментально. Для морской воды при температуре кристаллизации -10°C его величина в конструкции блочного вымораживателя равна 0,032. В результате действительная скорость истечения равна:

$$w_R = \mu_1\mu_2\sqrt{2gH} \quad (15)$$

Схема инженерного расчета кинетики процесса гравитационного сепарирования будет иметь вид (рис. 5).



(l, a, b — height, thickness and width of ice block, τ_2 — process time, t_s — solution temperature, X_{IN} — initial salt content of sea water, M_{IN} — initial mass of sea water, X_B — salt content of ice block, M_B — mass of ice block, f_C — total cross-section of channel, f_B — ice block cross-section, ρ — density of sea water, ν — kinematic coefficient of the sea water viscosity, w_1 — theoretical draining speed, w_R — real draining speed, μ_1 and μ_2 — coefficients, Re — Reynolds number, X_{Bi} — current salt content of treated water, W_i — current quantity of separated solution from the ice block, τ_C — separation time)

Рис. 5. Схема расчета процесса сепарирования. Fig. 5. Calculation scheme of separation process.

Практическая реализация схемы (рис. 5) предусматривает наличие данных по блоку льда: его высоты l , толщины a и ширины b , пористости ε . По этим характеристикам рассчитываются: объем блока и его масса M_B и, через пористость, объем в нем раствора и его масса M_S . В зависимости от типа раствора находятся его теплофизические свойства, число Рейнольдса и коэффициенты

μ_1 и μ_2 . Далее рассчитываются теоретическая w_1 и действительная w_R , скорости истечения, сечение блока льда f_B и суммарное сечение каналов f_C . Произведение сечения каналов на действительную скорость определяет объемный расход раствора из каналов. Произведение объемного расхода и времени сепарирования дает количество отведенного

из блока раствора W_i . Далее устанавливается степень концентрирования раствора и текущее значение концентрации сухих веществ в блоке льда:

$$X_{Bi} = \frac{M_S - W_i}{M_B} \left(\frac{M_{IN}}{M_B} \right) X_{IN} \quad (16)$$

В соотношении предполагается, что блок заполнен раствором, который имеет концентрацию такую же, как и остаток, а в

процессе сепарирования плавления льда не происходит.

При сравнении текущих значений X_{Bi} с заданными (нормативными) значениями на пресную питьевую воду X_{BD} , устанавливается искомое время процесса сепарирования.

Проведено сравнение расчета по схеме (рис. 5) с данными экспериментов (рис. 6).

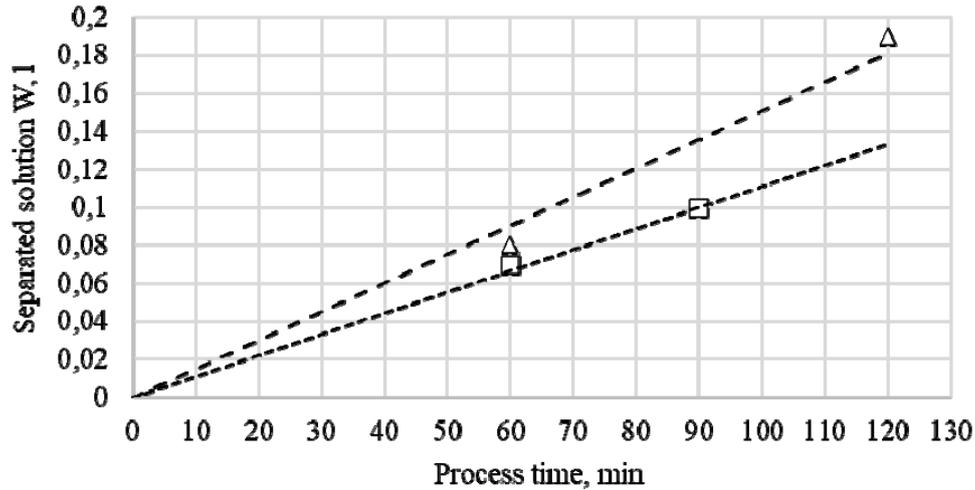


Рис. 6 Сравнение расчетных и опытных данных.
Fig. 6. Comparison of calculation and experimental data.

Эксперименты проведены на воде Черного моря (рис. 6, нижняя линия) и гранатовом соке (рис. 6, верхняя линия). Видно, что расчетные линии удовлетворительно согласуются с результатами опытов. Это является основанием для разработки экспериментального образца опреснителя блочного типа.

Техническая идея разработки в том, что установка — модульного типа. Производительность линии определяется количеством модулей. Каждый модуль

содержит ряд однотипных аппаратов, в которых протекают поочередно процессы кристаллизации, сепарирования и плавления льда. Поскольку время гравитационного сепарирования больше времени вымораживания, то в модуле должно быть несколько аппаратов, в которых происходит сепарирование. Количество таких аппаратов установлено расчетом по схеме (рис. 5). В таблицах (2—4) приведены исходные данные и результаты расчетов.

Таблица 2 / Table 2.

Исходные данные / Input data

M_{IN} , kg	t , °C	X_{BD} , g/l	ε	ρ , kg/m ³	X_{IN} , g/l	Размеры блока, м / Block sizes, m		
						l	a	b
60	-5	0,5	0,012	1013,4	17	1	0,6	0,05

Таблица 3 / Table 3.

Результаты первого этапа расчета / Results of the first stage of calculation

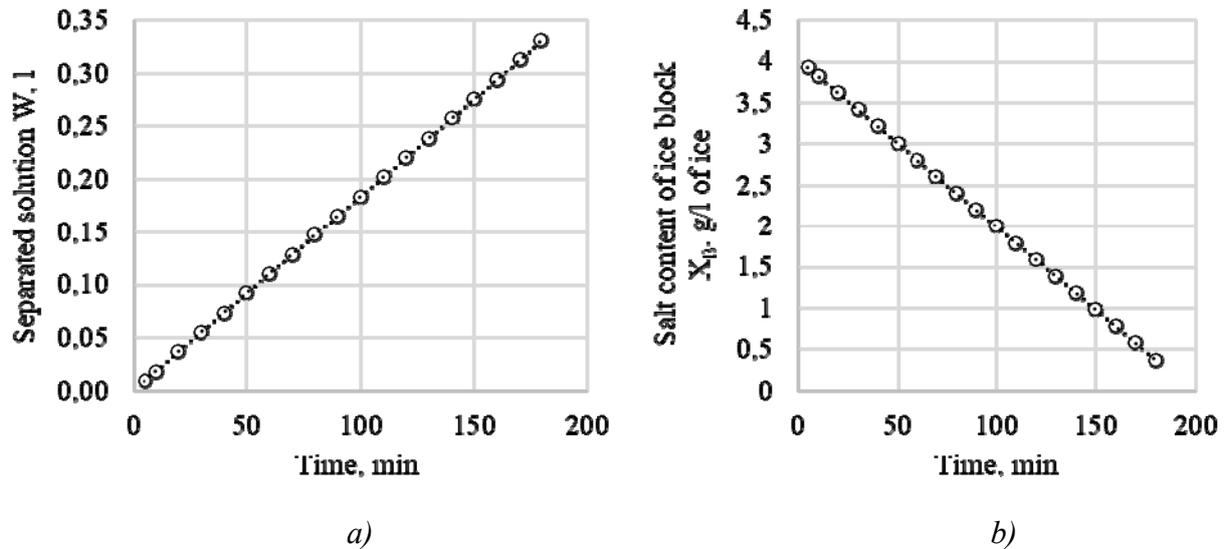
Re	d , m	ν , m ² /s	A	B	μ_1	w_1 , m/s	M_B , kg	M_{WS} , kg
157260	0,092	0,0000026	0,58	0,89	0,58	4,43	30,4	29,6

Таблица 4 / Table 4.

Результаты второго этапа расчета / Results of the second stage of calculation

τ , min	f_B , m ²	V_B , m ³	V_S , m ³	M_S , kg	ν , m ² /s	w_R , m/s	f_C	μ_2	W , l	X_B , g/l
60	0,03	0,03	0,00036	0,364824	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$85,1 \cdot 10^{-6}$	0,00036	$33 \cdot 10^{-6}$	0,11	2,8
120	0,03	0,03	0,00036	0,364824	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$85,1 \cdot 10^{-6}$	0,00036	$33 \cdot 10^{-6}$	0,22	1,59

Итоговые результаты по кинетике сепарирования представлены на рис. 7.



a) объем раствора / solution volume;
 b) концентрация солей в блоке льда / salts concentration in the ice block

Рис. 7. Кинетика сепарирования. Fig. 7. Separation kinetics.

Видно (рис. 7b), что верхняя граница нормативного значения ($X_B = 1 \text{ г/кг}$) достигается при $\tau = 2,5$ часа, а значение ($X_B = 0,5 \text{ г/кг}$) требует $\tau = 3,5$ часа.

Следующим этапом проектирования является согласование режимов работы кристаллизатора и сепараторов. Основными параметрами, влияющими как на энергетические затраты, так и на кинетику процесса кристаллизации являются уровень температур при отводе теплоты кристаллизации и начальная концентрация раствора. Исследованы зависимости удельных энергозатрат J от температуры кипения холодильного агента для различных начальных концентраций раствора. Анализ показал, что для каждой начальной концентрации раствора существует свой ярко выраженный минимум. Установлено, что для всех температур окружающей среды графики $J = f(\tau)$ имеют локальный минимум при значении $\tau = 2$ ч. Причем, для τ больше двух

часов J растет быстрее, чем при τ меньше двух часов. Следовательно, принимаем время цикла вымораживания — 2 часа. Время сепарирования должно быть кратным этому времени. Исходя из результатов расчета (рис. 7b) рациональное число сепараторов в установке должно быть 3.

Таким образом, предлагаемая установка для непрерывного опреснения морской воды содержит 5 одинаковых аппаратов. Если в 1 происходит вымораживание, то во 2, 3 и в 4 осуществляется сепарирование, а в 5 — идет плавление льда. Каждые 2 часа автоматически переключаются электромагнитные клапана на линиях холодильного агента и продукта, что обеспечивает последовательность и синхронность работы аппаратов.

ВЫВОДЫ

За последние 20 лет в мире суммарная производительность опреснительных установок выросла более чем в 50 раз.

Наблюдается тенденция создания как крупных опреснительных систем производительностью до 500000 м³/сутки, так и средних, и малых установок для разнообразных нужд.

Предложенный принцип низкотемпературной деминерализации морской воды в установках блочного вымораживания имеет перспективы в конструкциях разной производительности.

Роль опреснения на современном этапе не ограничивается только проблемой ликвидации дефицита воды в ряде маловодных и безводных регионов мира. Принцип опреснения все шире сопровождается концентрированием растворов с целью получения из них товарных минеральных продуктов. В связи с этим на мировом рынке возрастает спрос на опреснительные установки, обладающие высокими экономическими показателями.

Представляется, что следует ожидать бурного развития принципиально нового для настоящего времени научно-технического направления — технология воды направленного лечебно-профилактического назначения. Предлагаемые аппараты блочного вымораживания являются удобными конструкциями для производства талой воды, насыщенной необходимыми целебными компонентами.

Литература (References)

- [1] Alkhalidi A., Kiwan S., Al-Hayajneh A. Experimental Investigation of Water Desalination Using Freezing Technology. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 28, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.csite.2021.101685
- [2] Micale G., Cipollina A., Rizzuti L. *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*, Springer, 2009. 306p. doi: 10.1007/978-3-642-01150-4
- [3] Ryabchikov B.E. *Sovremennye Metody Podgotovki Vody* [Modern Methods of Water Treatment]. Minsk, 2005. 328p. (In Russian).
- [4] Raju A., Mani A. Heat Transfer Characteristics in Horizontal Tube Bundles for Falling Film Evaporation in Multi-Effect Desalination System. *Desalination*, 2015, no. 375, pp. 129-137. doi: 10.1016/j.desal.2015.06.018
- [5] Xu J., Wang Z., Chang C., Fu B., Tao P., Song C., Shang W., Deng T. Solar-Driven Interfacial Desalination for Simultaneous Freshwater and Salt Generation. *Desalination*, 2020, no. 484. doi: 10.1016/j.desal.2020.114423
- [6] Guo P., Li T., Wang Y., Li J. Energy and Exergy Analysis of a Spray-Evaporation Multi-Effect Distillation Desalination System. *Desalination*, 2021, no. 500. doi: 10.1016/j.desal.2020.114890
- [7] Hwang S.-T., Kammermeyer K. *Membranes in Separations*. New York: John Wiley & Sons, 1975. 559p.
- [8] Mustafa I., Kilbay A., Alhseinat E., Almarzooqi F. Enhanced Membrane Distillation Water Flux through Electromagnetism. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2021, no. 169. doi: 10.1016/j.cep.2021.108597
- [9] Ray S.S., Chen S.-S., Chang H.-M., Thanh C.N.D., Le Q.H., Nguyen N.C. Enhanced Desalination Using a Three-Layer OTMS Based Superhydrophobic Membrane for a Membrane Distillation Process. *RSC Advances*, 2018, vol. 18, no. 8, pp. 9640-9650. doi: 10.1039/C8RA01043A
- [10] Dytneriskii Yu.I. *Obratnyi Osmos i Ul'trafil'tratsiya* [Reverse Osmosis and Ultrafiltration]. Moscow: Khimiya, 1978. 352p. (In Russian).
- [11] Ray S.S., Chen S.-S., Sangeetha D., Chang H.-M., Thanh C.N.D., Le Q.H., Ku H.-M. Developments in Forward Osmosis and Membrane Distillation for Desalination of Waters. *Environmental Chemistry Letters*, 2018. doi: 10.1007/s10311-018-0750-7
- [12] Sanna A., Buchspies B., Ernst M., Kaltschmitt M. Decentralized Brackish Water Reverse Osmosis Desalination Plant Based on PV and Pumped Storage — Technical Analysis. *Desalination*, 2021, no. 516. doi: 10.1016/j.desal.2021.115232
- [13] Byrne P., Fournaison L., Delahaye A., Oumeziane Ya. A., Serres L., Loulergue P., Szymczyk A., Mugnier D., Malaval J.-L., Bourdais R., Gueguen H., Sow O., Orfi J., Mare T. A Review on the Coupling of Cooling, Desalination and Solar Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015 vol. 47, pp. 703-717. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.083
- [14] Zhang H., Janajreh I., Hassan Ali M. I., Askar K. Freezing Desalination: Heat and Mass Validated Modeling and Experimental Parametric Analyses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, no. 26. doi: 10.1016/j.csite.2021.101189
- [15] Barma M. C., Peng Z., Moghtaderi B., Doroodchi E. Freeze Desalination of Drops of Saline Solutions. *Desalination*, 2021, no. 517. doi: 10.1016/j.desal.2021.115265
- [16] Liu Ya., Ming T., Wu Yo., de Richter R., Fang Yu., Zhou N. Desalination of Seawater by Spray Freezing in a Natural Draft Tower. *Desalination*, 2020, no. 496. doi: 10.1016/j.desal.2020.114700
- [17] Yang H., Fu M., Zhan Z., Wang R., Jiang Yu. Study on Combined Freezing-Based Desalination Processes with Microwave Treatment. *Desalination*, 2020, no. 475. doi: 10.1016/j.desal.2019.114201
- [18] Yang H., Sun Z., Zhan Z., Zhang H., Yao Yu. Effects of Watering Parameters in a Combined

- Seawater Desalination Process. *Desalination*, 2018, no. 425, pp. 77-85.
doi: 10.1016/j.desal.2017.10.014
- [19] Castillo-Tellez B., Figueroa P.I. Castillo-Tellez M., Marzoug R., Allaf K. Experimental Analysis of Saline Diffusion During Saltwater Freezing for Desalination Purposes. *Water and Environment Journal*, 2020, vol. 34, pp. 929-936.
doi: 10.1111/wej.12603
- [20] Kucera J. *Desalination (Water from Water)*, Scrivener Publishing, 2019. 768p.
doi: 10.1002/9781119407874
- [21] Zambrano A., Ruiz Y., Hernández E., Raventós M., Moreno F.L. Freeze Desalination by the Integration of Falling Film and Block Freeze-Concentration Techniques. *Desalination*, 2018, no. 436, pp. 56-62.
doi: 10.1016/j.desal.2018.02.015
- [22] Hernández E., Santos A., Pazmiño N., Raventós M., Blanco M., Moreno F.L., Ruiz Y., Rich A., Samsuri S. Two Strategies for Freeze Desalination of Seawater by Progressive and Block Techniques. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 215, pp. 1-9.
doi: 10.5004/dwt.2021.26798
- [23] Spalding D.B., Taborek J. *Heat Exchanger Design Handbook (Heat Exchanger Theory)*. New York, Hemisphere Publ. Corp., 1983. 2080p. (Russ. ed.: Petuhov B.S., Shykov V.K. *Spravochnik po Teploobmennikam: V 2 t. T. 1*. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 560p.).

Сведения об авторах.



Бурдо Олег Григорьевич, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, нанотехнологии в пищевой промышленности, энергоэффективность г. Одесса, Украина
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Терзиев Сергей Георгиевич, д.т.н. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экоиндустрия в АПК, экстрагирование г. Одесса, Украина
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Мордынский Всеволод Петрович, к.т.н., доцент. Сфера научных интересов: технологии криоконцентрирования и опреснения г. Одесса, Украина
E-mail: poem.onaft@gmail.com



Сиротюк Илья Вадимович, ассистент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование, обезвоживание пищевых продуктов, энергоэффективность г. Одесса, Украина
E-mail: ilyxin09@gmail.com



Фатеева Яна Александровна, аспирант. Сфера научных интересов: технологии криоконцентрирования и опреснения г. Одесса, Украина
E-mail: yana.maselska@gmail.com



Молчанов Михаил Юрьевич, студент. Сфера научных интересов: процессы тепломассообмена, экстрагирование г. Одесса, Украина
E-mail: Mihatapok3@gmail.com

Medium-Term Hourly Electricity Tariff Forecasting Using Ensemble Models

Matrenin P.V., Arestova A.Yu., Antonenkov D.V.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

Abstract. Forecasting electricity tariff rates is necessary for large suppliers, consumers, and power brokers working in the wholesale markets. Meanwhile, tariff rates of the retail market are also hourly changed for certain groups of electricity consumers. It creates more efficient electrical load regulation opportunities than the traditional load leveling approach. Power facilities that include controlled load consumers or local generation can use their capabilities by adjusting the load curve according to tariff rates. This work aims to study the potential for medium-term forecasting of retail electricity tariff rates and develop a predictive machine learning model. Hourly data on the retail market tariffs of the Novosibirsk region (Siberia) for four years were collected, several machine learning models were applied, and an analysis of the input parameters for forecasting was carried out. The most significant results are the proof of the possibility of obtaining the month ahead electricity tariff rate forecast with the mean absolute percentage error 4 %. It could be used for electricity costs reduction by regulating the load curve. It was shown that the discrete models based on ensembles of logical rules give higher accuracy than models based on continuous and piecewise continuous functions, such as neural networks. The significance of the obtained results is the proposed approach for month ahead electricity tariff rates forecasting, which was verified on a four-year dataset with an error of 4 %. The approach is based on open data and open-source machine learning models, which allow specialists with even a basic level of data science skills to put it into practice.

Keywords: electricity market, medium-term forecasting, demand response, ensemble model, decision trees.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.03>

UDC: 621.311: 519.25

Proгноза pe termen mediu a tarifelor orare de energie electrică folosind modele de ansamblu

Matrenin P.V., Arestova A.Iu., Antonencov D.V.

Universitatea tehnică de Stat din Novosibirsk
Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Proгноза tarifelor pe piețele de energie electrică este necesară pentru ca marii furnizori, consumatori și intermediari să lucreze pe piețele angro. Scopul lucrării este de a studia potențialul de prognoză pe termen mediu a tarifelor de energie electrică cu amănuntul și de a dezvolta un model predictiv bazat pe machine learning. Pentru a atinge acest obiectiv, timp de trei ani au fost colectate date orare privind tarifele pieței cu amănuntul din regiunea Novosibirsk (Siberia, FR), au fost studiate o serie de modele de învățare automată, precum și o analiză a caracteristicilor necesare pentru a forma o prognoză. Cele mai semnificative rezultate sunt fundamentarea posibilității de a obține o prognoză a tarifului de energie electrică pentru o lună înainte cu o eroare medie de 4% atunci, când este utilizată pentru reducerea costurilor de energie electrică prin reglarea graficului de sarcină și identificarea faptului, că modelele discrete pe baza ansamblurilor de reguli logice oferă pentru problema dată o precizie mai mare decât modelele bazate pe funcții continue și continue pe porțiuni, cum ar fi rețelele neuronale. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul, că a fost propusă și verificată pe un eșantion de date timp de trei ani o abordare a creării unui model de prognozare a tarifelor de energie electrică de pe piața cu amănuntul, dând o eroare medie de prognoză pentru o lună înainte de 4-5%, abordarea se bazează pe utilizarea datelor deschise (open source) și a modelelor machine learning, ceea ce va permite specialiștilor, chiar și cu un nivel de bază de abilități de procesare a datelor, să o aplice în practică.

Cuvinte-cheie: piața de energie electrică și de puteri, prognoză pe termen mediu, managementul cererii, modele de ansamblu, arbori de decizie.

Среднесрочное прогнозирование почасовых тарифов на электроэнергию с помощью ансамблевых моделей

Матренин П.В., Арестова А.Ю., Антоненков Д.В.

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

Аннотация. Прогнозирование ставок тарифов на рынках электроэнергии необходимо крупным поставщикам, потребителям и посредникам для работы на оптовых рынках. В то же время и на розничных рынках ставка тарифа для определенных групп потребителей электроэнергии меняется каждый час, что создает возможности более эффективного регулирования электрической нагрузки, чем традиционный подход по ее выравниванию. Объекты энергетики, которые имеют в своей электроэнергетической системе потребители-регуляторы или источники собственной генерации, могут использовать их, подстраивая график электропотребления под изменение ставок тарифа. Целью работы является исследование потенциала среднесрочного прогнозирования ставок тарифа на электроэнергию розничного рынка и разработка прогнозной модели на базе машинного обучения. Для достижения поставленной цели были собраны почасовые данные о тарифах розничного рынка Новосибирской области (Сибирь) за три года, проведено исследование ряда моделей машинного обучения, а также анализ признаков, необходимых для формирования прогноза. Наиболее существенными результатами являются обоснование возможности получения прогноза ставки тарифа на электроэнергию на месяц вперед со средней ошибкой 4 % при использовании для снижения затрат на электроэнергию путем регулирования графика нагрузки и выявление того, что дискретные модели, основанные на ансамблях логических правил, дают в данной задаче более высокую точность, чем модели, основанные на непрерывных и кусочно-непрерывных функциях, такие как нейронные сети. Значимость полученных результатов заключается в том, что предложен и верифицирован на выборке данных за три года подход к созданию модели для прогнозирования ставок тарифа на электроэнергию розничного рынка, дающий среднюю ошибку прогноза на месяц вперед 4-5 %; подход основан на использовании открытых данных и моделей машинного обучения с открытым исходным кодом, что позволит применять его на практике специалистам даже с базовым уровнем навыков в обработке данных.

Ключевые слова: рынок электроэнергии и мощности, среднесрочное прогнозирование, управление спросом, ансамблевые модели, деревья решений.

ВВЕДЕНИЕ

А. Регулирование режимов электропотребления предприятий

Систему электроснабжения предприятия необходимо рассматривать как динамическую, подвергающуюся внешним воздействиям. Работа всей системы строго регламентируется суточными, недельными, месячными и другими планами (нормами) потребления электроэнергии [1-2].

Отсутствие коррекции электропотребления в такой ситуации и запаздывание в принятии решений может привести к нерациональному использованию оборудования или “штрафам” за превышение установленных лимитов и норм [2-4], поэтому каждое предприятие имеет систему управления технологическим процессом. В рамках такой системы имеется возможность формировать единые информационные базы данных электропотребления и их характеристики, а также получать оперативные планы электропотребления (лимит мощности, заявляемую мощность, план потребления на сутки, неделю, месяц).

К задачам оптимального электропотребления относятся планирование и нормирование

электропотребления, оперативное и автоматическое управление нагрузкой, коррекция расхода электрической энергии, а также обеспечение проектировщиков электрическими характеристиками, основанными на учете закономерностей формирования нагрузок и основных факторов [5-6].

В настоящее время регулирование режимов электропотребления предприятий осуществляется в основном с помощью регулировочных мероприятий, под которыми понимается создание специальных режимов работы потребителей, а также различные организационно-технические и экономические мероприятия, направленные на снижение максимальной активной мощности в часы максимума энергосистемы [7].

Такая концепция состоит в добровольном изменении нагрузок потребителями на основе ряда мероприятий, таких как применение тарифов на электрическую энергию, стимулирующих внепиковое потребление энергии [8]. При возникновении дефицитов мощности или энергии в энергетической системе применяется принудительное управление электропотреблением [9]. Эффективность регулирования режимов электропотребления возрастает

с введением автоматического режима управления. В этом смысле процесс управления неизбежно состоит из измерения и оценки состояния, оптимизации условий принятия решений и регулирования режимов.

Идея использования технических средств для управления нагрузкой заключается не только в выполнении отключений, в соответствии с вводимыми ограничениям, но и в снижении заявленного совмещенного максимума с целью, во-первых, снизить себестоимость продукции, во-вторых, не допустить превышение реальной нагрузки, заявленной из-за возможных случайных отклонений нагрузки, в-третьих, способствовать выравниванию графика нагрузки энергосистемы. Применение комплексов технических средств учета, контроля и регулирования электропотребления для управления расходом электрической энергии предусматривает его коррекцию по технологическим группам и предприятию [10, 11].

В настоящее время существует отдельная концепция “управление спросом на электроэнергию” (demand response), когда изменение электропотребления осуществляется не только для снижения затрат, но и для обеспечения надежности электроснабжения. Управление спросом основано на применении различных тарифных зон, явное управление предусматривает прямое управление нагрузкой по запросу.

В [12] приведены результаты разработки алгоритма функционирования активного потребителя на основе имитационной мультиагентной модели. В качестве целевой функции принято снижение затрат на электроэнергию с учетом не только текущего тарифа, но и графика нагрузки отдельных энергоприемников, стоимость реконфигурации сети, объем и стоимость продаже от собственных источников генерации, потери от отключения части нагрузки. Исследование приведено на примере бытовых потребителей, однако даже такое участие в суммарном графике нагрузки позволяет сглаживать пики потребления и участвовать в оптимизации режима.

В работе [13] подробно описан алгоритм участия горнодобывающего предприятия в процессе управления спросом. Предложено два сценария снижения электропотребления:

- плановый – по результатам анализа режимов работы всех потребителей энергии;
- внеплановый – по слабо прогнозируемым внешним факторам.

Регулирование электрической нагрузки необходимо для снижения максимумов активной мощности, выравнивания нагрузки и обеспечения заданных энергоснабжающей организацией ограничений на потребление мощности и электроэнергии. Меры по регулированию нагрузкой формируют диспетчерские графики включения и отключения электропотребителей: участков, цехов, потребителей-регуляторов [14].

Все разрабатываемые предприятиями мероприятия по организации электропотребления должны быть распределены по группам на организационные (не требующие дополнительных капиталовложений) и технические (требующие их) [15]. К первым относятся:

- управление оборудованием, работа которого может быть смещена из интервалов более дорого электроэнергии без негативного влияния на производство;
- управление оборудованием, которое без ущерба могут допустить произвольные по числу и длительности перерывы в работе;
- поочередная загрузка и остановка однотипных агрегатов в режиме максимума нагрузки;
- планирование графика ремонтов.

Если предприятие имеет электроприемники 1-3 категорий, работающих в длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах, то появляется возможность на основании анализа работы отдельных потребителей электроэнергии рассмотреть варианты полного или частичного отключения их на период максимума нагрузки энергосистемы без ущерба для нормальной работы предприятия.

Ранее в электроэнергетике основным средством регулирования нагрузки и электропотребления было выравнивание графиков нагрузки путем снижения коэффициента формы K_ϕ (отношение эффективной мощности к средней суточной мощности) [16]. Выравнивание графика нагрузки снижает потери электроэнергии, но не учитывает изменение тарифа. В условиях современных рынков электроэнергии и мощности, учитывая изменение стоимости электроэнергии и различные тарифы в течение суток, этот метод уже не является достаточно эффективным по экономическому критерию. Поэтому актуальным является предиктивный подход, то есть управление нагрузкой с учетом среднесрочных и оперативных прогнозов потребления

электроэнергии и ставок тарифа на электроэнергию и мощность.

В. Прогнозирование тарифов на электроэнергию

Фундаментальный обзор [17] показывает, что в задаче прогнозирования рыночных цен на электроэнергию применяется огромное количество подходов, что связано в том числе с тем, что задача имеет множество модификаций в зависимости от рынков, горизонта и целей прогнозирования. Используются методы много-агентного моделирования, статистические модели, основанные на использовании фундаментальных экономических и физических факторов, статистические методы обработки временных рядов, методы искусственного интеллекта [17-19]. При этом ни один из методов не может быть объективно выбран в качестве доминирующего, более того, сравнение одних и тех же методов разными авторами часто дает противоречащее друг другу результаты [17]. Тем не менее в настоящее время чаще всего используются нейросетевые модели [18].

Так же в обзорных работах [17, 19] отмечается, что многие исследователи используют слишком малые выборки данных для тестирования моделей, в то время как для получения достоверных результатов требуются периоды хотя бы в несколько месяцев, а лучше лет. Вместе с тем, можно увидеть тенденцию к усложнению используемых моделей, что приводит к тому, что результаты исследований становятся все более трудными для воспроизводства и применения на практике кем-либо, кроме авторов. В работе [21] отмечаются трудности применения наиболее распространенного подхода на базе искусственных нейронных сетей, связанные с необходимостью настраивать архитектуру и гиперпараметры моделей для их применения. Поскольку рынки электроэнергии и мощности в разных странах, и даже внутри одной страны, отличаются, а также отличаются данные, которые доступны для предприятий, и сроки прогнозирования, возникает проблема очень высокой трудоемкости и сложности практического использования предложенных в различных исследованиях методов.

Для российского рынка можно выделить ряд работ, таких как [21-25]. В них применяются как традиционные для электроэнергетики авторегрессионные модели, так и различные виды искусственных нейронных сетей.

Однако эти работы рассматривают краткосрочное (24 часа вперед) прогнозирование и оптовый рынок электроэнергии. Такой подход неактуален для потребителей, у которых возможность регулировать график нагрузки связана с управлением потребителями-регуляторами, влияющими на технологический процесс, поскольку для них нужен более долгий горизонт планирования. Кроме того, розничный и оптовый рынок отличаются с точки зрения ценообразования.

Прогнозирование цен на электроэнергию актуально не только для потребителей, но и для генерирующих компаний, а также для потребителей, имеющих собственную генерацию. Исследование [26] рассматривает финансовые последствия неточных прогнозов цен на электроэнергию для гидроэлектростанции. Для тепловых станций требуется не только учет взаимосвязи между производством тепла и электричества, но прогнозы ценовых показателей для работы на рынках электрической и тепловой энергии [27]. Обе указанные работы [26, 27] также рассматривают прогноз лишь на 24 часа вперед.

Цель данной работы – исследование потенциала среднесрочного прогнозирования ставок тарифа на электроэнергию розничного рынка и разработка прогнозной модели на базе машинного обучения. Отличием является построение модели прогнозирования ставки тарифа на электроэнергию не в режиме краткосрочного прогноза для оптового рынка, а в режиме среднесрочного (неделя и месяц вперед) прогноза для розничного рынка на примере тарифов Новосибирской области. Исходные данные взяты из открытых источников, применены методы машинного обучения с открытым исходным кодом, процедура предварительной обработки данных и настройки модели подробно описаны. Все это позволит воспроизвести результаты исследования, а также применить предложенный подход для рынка электроэнергии другого региона или страны.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

А. Структура тарифа на розничном рынке электроэнергии

Рынок электроэнергии РФ имеет двухуровневое устройство [28, 29]: оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) и розничный рынок электроэнергии (РРЭ).

В упрощенном виде можно выделить следующие составляющие в структуре тарифов:

- 1) за электрическую энергию,
- 2) за мощность,
- 3) за услуги по передаче электрической энергии за содержание электрических сетей,
- 4) за превышения фактического почасового объема покупки электрической энергии над плановым,
- 5) за превышения планового почасового объема покупки электрической энергии над фактическим,

б) за сумму плановых почасовых объемов покупки электрической энергии,

7) за сумму абсолютных значений разностей фактических и плановых почасовых объемов покупки электрической энергии.

Розничный рынок насчитывает шесть ценовых категорий (ЦК). Основные отличия ЦК представлены в Таблице 1 [30]. Из таблицы видно, что 5-6 ЦК требуют точного почасового планирования потребления, что, в свою очередь, влияет на цену электроэнергии.

Таблица 1¹

Основные параметры ценовых категорий розничного рынка электроэнергии²

Ценовая категория Price Category	Коммерческий учет Revenue metering	Нерегулируемая цена ОПЭМ Non-regulated prices of Wholesale market		Почасовое планирование Hourly planning
1	Интегральный (за месяц) Integral (month)	Одноставочная цена One price		Нет No
2	Зонный (по зонам суток за месяц) Zoned (day/night)	Одноставочная цена, дифференцированная по зонам суток Day/night price		
3	Интегральный (почасовой) Integral (hour)	Цена на мощность Active power price	Цена на ЭЭ, дифференцированная по часам Hourly different price for energy	Нет No
4				Да Yes
5				
6				

Ставки тарифа розничного рынка за электрическую энергию меняются каждый час суток. Возникает задача учета изменения ставок на электрическую энергию для регулирования графика нагрузки и снижения затрат предприятия на электроэнергию. Предприятие может регулировать свою электрическую нагрузку таким образом, чтобы больший объем потребления приходился на часы с меньшей стоимостью электроэнергии.

В. Формирование исходных данных

По данным о тарифах РРЭ, данных о плановых и фактических пиковых часах энергосистемы за 2018–2021 гг. была сформирована выборка, содержащая следующие столбцы: год; месяц; число; день недели; час суток; ставка тарифа за электроэнергию; является ли день рабочим (0/1); относится ли час к диапазону плановых пиковых часов энергосистемы в месяце (0/1); является ли час фактическим пиковым часом энергосистемы в сутках (0/1).

Формат данных приведен в Таблице 2. Ставки тарифа отличаются в зависимости от ценовой категории, уровня напряжения и предельной потребляемой мощности.

Таблица 2³

Формат данных для анализа тарифов РРЭ⁴

Имя столбца Column Name	Тип данных Data Type	Единица измерения Units
Год Year	Целое число Integer	-
Месяц Month	Целое число Integer	-
Число Date	Целое число Integer	-
День недели Day of week	Целое число Integer	-
Час Hour	Целое число Integer	-
Ставка_ЭЭ Rate_ЕЕ	Вещественное число Real number	тыс. руб / МВтч ths. rub/MWh
Рабочий_день Work_day	Логический Logical	-
Фактический_пик Actual_peak	Логический Logical	-
Плановый_пик Planned_peak	Логический Logical	-

Что касается ЦК, то было установлено, что ставки у разных ЦК отличаются по значениям, но совпадают по своей динамике. Для анализа динамики изменения ставки тарифа можно использовать любую ЦК, были выбраны данные 6-й ЦК. Число строк в выборке данных 35064, по числу часов за четыре года. Графики среднесуточных тарифов для 4 и 6 ЦК приведены на Рисунке 1.

Наглядно динамику изменения ставок тарифов по часам можно представить на графике трехмерной поверхности, где высота и цвет точек зависят от цены, а положение точки по двум горизонтальным осям от номера часа и номера дня в месяце. На Рисунках 2-5 показаны примеры 3D графиков для различных дат.

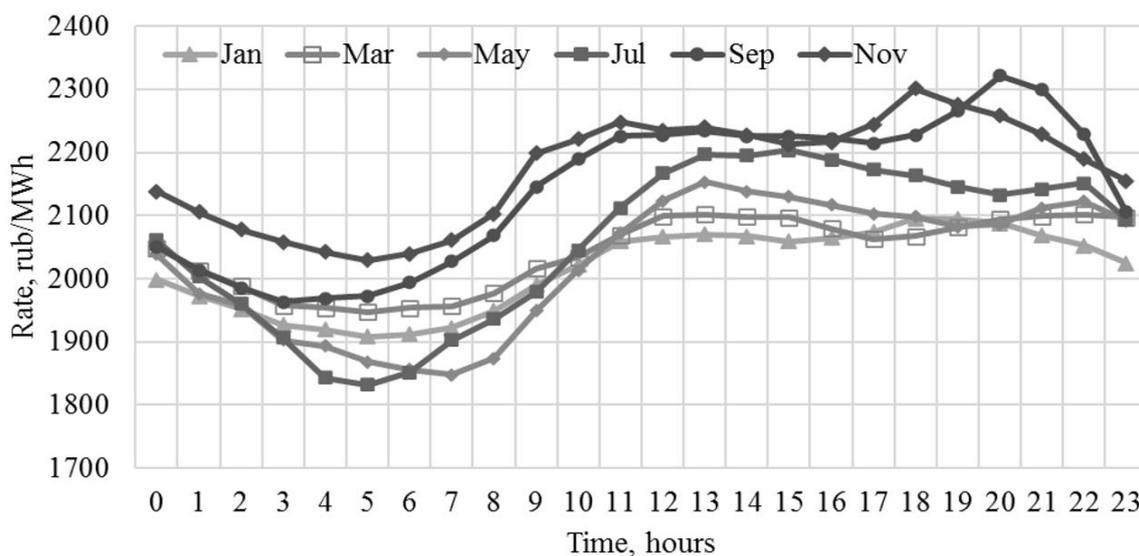


Рис.1. Среднесуточные тарифы 2018 года, 4, 6 ЦК.⁵

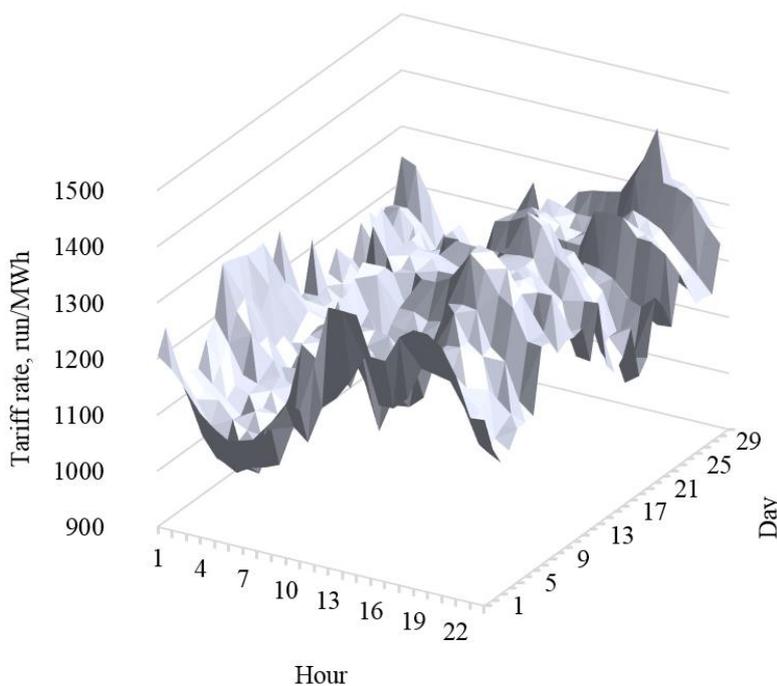


Рис.2. Изменение ставки на ЭЭ, дек. 2018 г.⁶

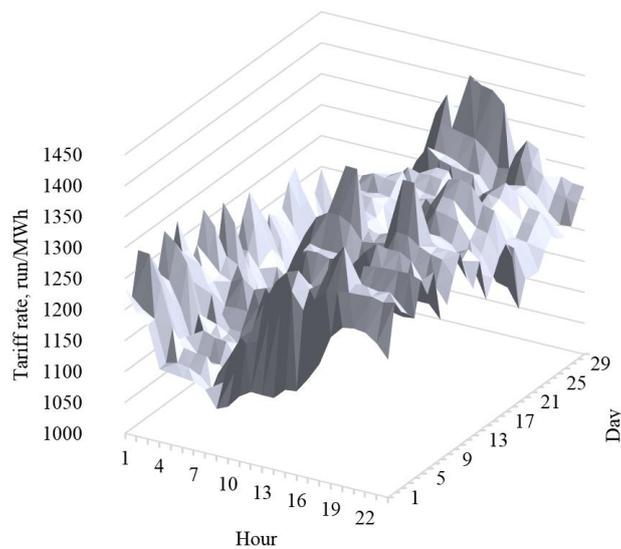


Рис.3. Изменение ставки на ЭЭ, янв. 2018 г.⁷

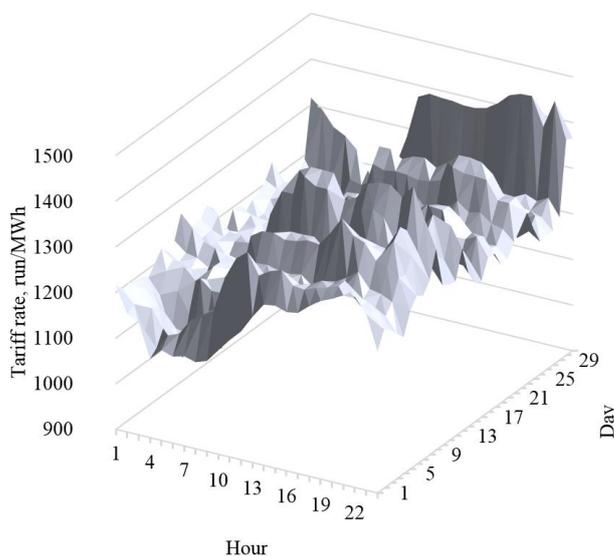


Рис.4. Изменение ставки на ЭЭ, дек. 2019 г.⁸

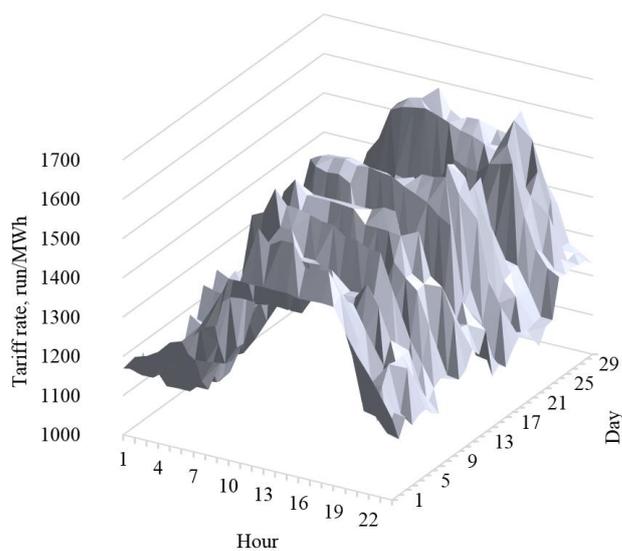


Рис.5. Изменение ставки на ЭЭ, январь 2019 г.⁹

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Прогнозирование ставок тарифа на электроэнергию выполняется на месяц вперед по следующим признакам: год, месяц, число месяца, день недели, час суток, является ли день рабочим, входит ли час прогнозируемой ставки в плановый пиковый интервал.

Отдельно было проведено исследование влияния данных о ставках тарифа в тот же час суток и день недели, но на прошлой неделе. При использовании данных за прошлую неделю горизонт прогнозирования сокращается до одной недели. Без них горизонт прогнозирования составляет месяц.

Для оценки точности моделей использован метод кросс-валидации, как показано на Рисунке 6. Модель на каждой итерации обучается на обучающей части выборки, проверяется на валидационной. Полученные точности на обучающей и валидационной частях выборки усредняются по итерациям.

Iteration	1/2 2018	2/2 2018	1/2 2019	2/2 2019	1/2 2020	2/2 2020
1	validation	training	training	training	training	training
2	training	validation	training	training	training	training
3	training	training	validation	training	training	training
4	training	training	training	validation	training	training
5	training	training	training	training	validation	training
6	training	training	training	training	training	validation

Рис.6. Схем кросс-валидации моделей прогнозирования ставок тарифа.¹⁰

Показателем точности прогноза ставки тарифа на электроэнергию выбран средний модуль относительной ошибки (mean absolute percentage error, MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{ставка}_i - \text{прогноз}_i}{\text{ставка}_i} \right| \quad (1)$$

Используемые в исследовании модели:

- линейная и полиномиальная регрессия с регуляризацией по Тихонову (Ridge) [31, 32];
- адаптивный бустинг над деревьями решений (AdaBoost) [33];
- случайный лес (Random Forest) [34];
- градиентный бустинг над деревьями решений (XGBoost) [35];
- нейросетевая модель (многослойный перцептрон, MLP) [36].

Для применения моделей использована открытая библиотека машинного обучения “Scikit-learn” [37] и репозиторий “eXtreme Gradient Boosting” [38]. Результаты построения моделей прогнозирования ставки тарифа на электроэнергию приведены в Таблице 3.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

A. Полученная точность прогнозирования

Из Таблицы 3 видно, что использование данных за предыдущую неделю не повышает точность прогнозирования в данной задаче, поэтому горизонт прогнозирования составляет 1 месяц. Также модели, обученные на данных 2019-2020 гг. были протестированы на данных 2021 года, результаты приведены в Таблице 4.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что модели машинного обучения позволяют получить прогноз ставки тарифа на электроэнергию на месяц вперед с ошибкой 4–5 %. Современные исследования в области прогнозирования рыночных цен на электроэнергию показывают точность в диапазоне 1–10 % [18], медианное значение для работы из обзора [18] составляет 4 %. С учетом различия горизонтов планирования, рынков, и используемых в моделях факторов, можно сказать, что полученный результат соответствует современному мировому уровню. Также следует отметить, что результаты среднесрочного прогнозирования ставок российского розничного рынка получены впервые, так как существующие исследования рассматривали задачу прогноза ставок тарифов на сутки вперед и для оптовых рынков.

B. Устойчивость модели к изменениям условий

Применение кросс-валидации для оценки точности прогноза позволило проверить работу модели на всей выборке трёхлетних данных, содержащей 26304 элемента. Выборка содержала и 2020 год, во время которого многие потребители энергетики работали в особом режиме из-за карантинных мер, переводе множества сотрудников на удаленную работу, что сказывалось графиках нагрузки и на рынках электроэнергии. Использование выборки наблюдений за несколько лет повышает достоверность полученного результата и свидетельствует об устойчивости подхода к изменению условий на рынках электроэнергии и мощности.

¹⁰ Appendix 1

Таблица 3¹¹

Точность прогнозов почасовой ставки тарифа на электроэнергию на данных 2018-2020 гг. (кросс-валидационная часть выборки)¹²

Модель Model	MAPE без исп. данных прошлой недели, % MAPE Without Last Week's Data, %	MAPE с исп. данных прошлой недели, % MAPE With Last Week's Data, %
Ридж, 1-й степени Ridge, 1th order	9.4	7.1
Ридж, 4-й степени Ridge, 4 th order	7.4	6.3
AbaBoost, макс. глубина 8, 50 деревьев AbaBoost, max depth 8, number of trees 50	5.3	5.8
Random Forest, макс. глубина 8, 30 деревьев Random Forest, max depth 8, number of trees 30	5.5	5.8
XGBoost, макс. глубина 8, 50 деревьев XGBoost, max depth 8, number of trees 50	4.2	4.6
МЛП, архитектура слоев: 64, 32, 16 MLP, layer architecture: 64, 32, 16	6.0	6.2

Таблица 4¹³

Точность прогнозов почасовой ставки тарифа на электроэнергию на тестовом 2021 г. (тестовая часть выборки)¹⁴

Модель Model	MAPE без исп. данных прошлой недели, % MAPE Without Last Week's Data, %
Ридж, 1-й степени Ridge, 1th order	9.18
Ридж, 4-й степени Ridge, 4 th order	6.86
AbaBoost, макс. глубина 8, 50 деревьев AbaBoost, max depth 8, number of trees 50	5.43
Random Forest, макс. глубина 8, 30 деревьев Random Forest, max depth 8, number of trees 30	5.27
XGBoost, макс. глубина 8, 50 деревьев XGBoost, max depth 8, number of trees 50	4.02
MLP, архитектура слоев: 64, 32, 16 MLP, layer architecture: 64, 32, 16	6.47

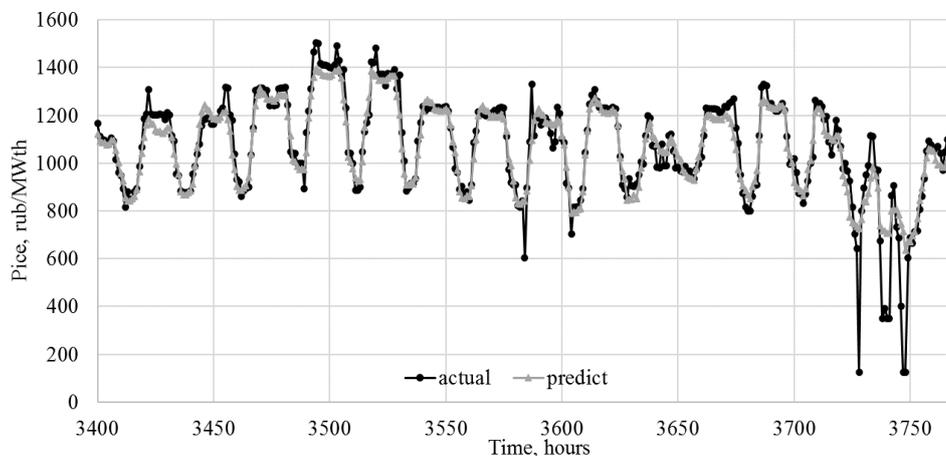


Рис.7. Фактическая и прогнозная почасовая стоимость электроэнергии для фрагмента проверочного набора данных.¹⁵

С. Сопоставление моделей

Исследование показывает, что среднесрочное прогнозирование ставок тарифа на электроэнергию является сложной задачей, которую не способны решать простые регрессионные модели.

Наилучшая точность (минимальная ошибка) была получена при использовании модели градиентного бустинга над деревьями решений (XGBoost). Тот факт, что модели, построенные на базе деревьев решений, работали лучше, чем регрессионные модели и многослойный перцептрон, указывает на то, что задача требует использования скорее логических правил, чем функциональных зависимостей, за счет использованием дискретных (бинарных и категориальных) признаков, таких как день недели, является ли день рабочим, входит ли рассматриваемый час в плановый пиковый интервал.

Большинство исследований (в том числе именно для российского рынка) рассматривали либо модели на базе авто-регрессионного анализа, такие как ARMA (autoregressive moving average), либо нелинейные, но кусочно-непрерывные модели на базе нейронных сетей или метода опорных векторов [17, 18, 21-25], в то время как применение моделей, основанных на логических правилах, существенно проще на практике за счет намного большей скорости и лучшей сходимости процесса обучения, меньшего числа настраиваемых гипер-параметров и вариативности конфигураций таких моделей. Кроме того, они показывают высокую эффективность и в других задачах среднесрочного прогнозирования в энергетике [39, 41].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможности построения модели среднесрочного прогнозирования почасовой ставки тарифа на электроэнергию российского розничного рынка электроэнергии и мощности. Моделирование проводилось на общедоступных данных о стоимости электроэнергии в 2018-2021 гг. для предприятий Новосибирской области (Сибирь, Россия). Показано, что модели, основанные на экстремальном градиентном бустинге и ансамблях деревьев решений, позволяют прогнозировать почасовую ставку тарифа на электроэнергию на месяц вперед с точностью 96 % (средняя абсолютная ошибка в процентах составляет 4 %). Для модели

прогнозирования в качестве входных данных используются календарные данные (год, месяц, день, день недели, является ли день рабочим), входит ли час прогнозируемой ставки в плановый пиковый интервал, и ретроспективные значения ставок тарифа.

Такой среднесрочный прогноз может быть использован для снижения затраты потребителей на электроэнергию за счет регулирования графика нагрузки с учетом почасовых ставок тарифа. Например, краткосрочные отключения или ремонты могут быть запланированы на более дорогие часы, а пиковое значение энергопотребления может быть смещено на более дешевые часы.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

- ^{1,2}**Table. 1.** General parameters of price categories.
^{3,4}**Table.2.** Data set format for tariff analysis.
⁵**Fig. 1.** Average daily rates in 2018 for 4,6th PC.
⁶**Fig. 2.** Electricity rate dynamics in December 2018.
⁷**Fig. 3.** Electricity rate dynamics in January 2018.
⁸**Fig. 4.** Electricity rate dynamics in December 2018.
⁹**Fig. 5.** Electricity rate dynamics in January 2020.
¹⁰**Fig. 6.** Cross-validation scheme of tariff rate forecasting models.
^{11,12}**Table.4.** Accuracy of the hourly electricity tariff rate forecasts for 2018-2020 years (cross-validation set).
^{13,14}**Table.5.** Accuracy of the hourly electricity tariff rate forecasts for 2021 year (test set).
¹⁵**Fig. 7.** The actual and predicted hourly electricity tariff rate for a fragment of the validation data set.

ACKNOWLEDGEMENTS

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект №С22-15

Литература (References)

- [1] Filimonova A. A., Zatsepin E. P., Zatsepina V. I. Multilevel Control of Power Consumption at Metallurgical Plants. *Proc. IEEE Int. Russian Automation Conf.*, Adler, 2018, pp. 1-4.
- [2] Uddin M., Romlie M. F., Abdullah M. F., Abd Halim S., Kwang T. C. A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 3323-3332.
- [3] Dzyuba A.P., Soloveva I.A. Cost-dependent electric consumption as a tool of risk management of non-payment for electric energy of industrial enterprises. *Strategic decisions and risk management*, 2019, vol. 10(1), pp. 8-19.
- [4] Rimsha A., Rimsha K. Development of Threat Modeling and Risk Management Tool in Automated Process Control System for Gas Producing Enterprise. *Proc. XXI Int. Conf. Complex Sys-*

- tems: *Control and Modeling Problems*, Samara, 2019, pp. 596-599
- [5] Sharda S., Singh M., Sharma K. Demand side management through load shifting in IoT based HEMS: Overview, challenges and opportunities. *Sustainable Cities and Society*, 2021, vol. 65, pp. 1-22.
- [6] Krasnyansky M., Matveykin V., Dmitrievsky B., Kobelev A., Terekhova A., Kobeleva V. Digitalization of Energy Management in an Industrial Enterprise. *Proc. IEEE 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*, Lipetsk, 2021, pp. 633-635.
- [7] Parizy E. S., Bahrami H. R., Choi S. A low complexity and secure demand response technique for peak load reduction. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 10(3), pp.3259-3268.
- [8] Pan R., Li Z., Cao J., Zhang H., Xia X. Electrical load tracking scheduling of steel plants under time-of-use tariffs. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 137, pp. 1-18.
- [9] Wang H., Zhang L., Ren Y., Meng L. Day-Ahead Scheduling Model Based on Supply-Demand Interaction Mode Considering Production Process of Short-Process Steel Enterprise. *Proc. IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems*, Jinan, 2020, pp. 934-941.
- [10] Egorov A., Kochneva E., Larionova A., Lyukhanov E., Shender S. E. On-line Electrical Energy Balance Monitoring System for Power Networks Enterprise Facilities. *Proc. IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, Riga, 2019, pp. 1-4.
- [11] Sianaki O. A., Masoum M. A., Potdar V. A decision support algorithm for assessing the engagement of a demand response program in the industrial sector of the smart grid. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 115, pp. 123-137.
- [12] Volkova I. O., Gubko M. V., Salnikova E. A. Active consumer: optimization problems of power consumption and self-generation. *Automation and remote control*, 2014, vol. 75(3), pp.551-562.
- [13] Vöth S., Nikolaev A., Kychkin A. Demand Response Service Architecture for Power System of Russian Mining Enterprise. *Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, Sochi, 2021, pp. 63-67.
- [14] Jiang B., Muzhikyan A., Farid A. M., Youcef-Toumi K. Demand side management in power grid enterprise control: A comparison of industrial & social welfare approaches. *Applied Energy*, 2017, vol. 187, pp. 833-846.
- [15] Prashar, A. Towards sustainable development in industrial small and Medium-sized Enterprises: An energy sustainability approach. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 235, pp. 977-996.
- [16] Bardanov A.I., Vasilkov O.S., Pudkova T.V. Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1753, pp. 1-10
- [17] Weron R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting*. 2014, 30, 1030–1081.
- [18] Pourdaryaei A, et. al. Recent Development in Electricity Price Forecasting Based on Computational Intelligence Techniques in Deregulated Power Market. *Energies*, 2021, vol. 14 (19), art. id. 6104.
- [19] Aggarwal S.K., Saini L.M., Kumar A.. Short term price forecasting in deregulated electricity markets. A review of statistical models and key issues. *International Journal of Energy Sector Management*, 2009, vol. 3 (4), pp. 333–358.
- [20] Singh N., Soumya R.M., Rishabh D.S. Short term electricity price forecast based on environmentally adapted generalized neuron. *Energy*, 2017, vol. 125, pp.127-139.
- [21] Afanasyev D.O., Fedorova E.A. On the impact of outlier filtering on the electricity price forecasting accuracy. *Applied Energy*, 2019, vol. 236, pp. 196-210.
- [22] Maryasin O.Y., Lukashov A.I. A Python Application for Hourly Electricity Prices Forecasting Using Neural Networks. *IEEE Int. Russian Automation Conf.*, Sochi, 2020, pp. 138-143.
- [23] Shikhina A, Kochengin A., Chrysostomou G., Shikhin V. Investigation of autoregressive forecasting models for market electricity price. *Proc. IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conf.*, 2020, pp. 570-575.
- [24] Zolotova I.Y., Dvorkin V. V. Short-term forecasting of prices for the Russian wholesale electricity market based on neural networks. *Studies on Russian Economic Development*, 2017, vol. 28(6), pp. 608-615.
- [25] Dmitri K., Maria A., Anna A. Comparison of regression and neural network approaches to forecast daily power consumption. *Proc. 11th International Forum on Strategic Technology*, 2016 pp. 247-250.
- [26] Ugurlu U, Tas O, Kaya A, Oksuz I. The Financial Effect of the Electricity Price Forecasts' Inaccuracy on a Hydro-Based Generation Company. *Energies*, 2018, vol. 11(8), pp. 1-19
- [27] Žymeřka P., Marcin S. Short-term scheduling of gas-fired CHP plant with thermal storage using optimization algorithm and forecasting models. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 231, pp. 1-15.
- [28] Federal Law 35-FZ dated 26/03/2003, *Ob elektroenergetike* [On Electric Power Industry], *Rossiyskaya Gazeta* [Russian Newspaper], vol. 3174, 2003 (in Russian)
- [29] Government Decision 442, of the Russian Federation dated 04/05/2012, *O funkcionirovanii roz-*

- nichnih rinkov elektricheskoy energii polnom ili chastichnom ogranichenii rejima potrebleniya elektricheskoy energii* [On the functioning of retail electricity markets, full and (or) partial limitation of the mode of consumption of electrical energy], Rossiyskaya Gazeta [Russian Newspaper], vol. 5778, 2012 (in Russian)
- [30] *Assotsiatsiya NP sovet rynka, "Roznichnye rynki"* [Non-profit market council, "Retail pricing"] Available at: <https://www.npsr.ru/ru/market/retail/ceno/index.htm> (accessed 06.02.2022) (In Russian).
- [31] Peyre G., Bougleux S., Cohen L. D. Non-local regularization of inverse problems. *Inverse Problems and Imaging*, 2011, vol. 5(2), pp. 511-530.
- [32] Kennedy P.E. A Guide to Econometrics, 5th ed., Cambridge: The MIT Press, 2003, pp. 205–206.
- [33] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. Elements of Statistical Learning, ed. 2, Springer, 2009, 698 p.
- [34] Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, pp. 5–32.
- [35] Wang Y., Sun S., Chen X., Zeng X., Kong Y., Chen J., Wang T. Short-term load forecasting of industrial customers based on SVM and XGBoost. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 129, pp. 1-14.
- [36] Dudek G. Multilayer perceptron for short-term load forecasting: from global to local approach. *Neural Computing and Applications*, 2020, vol. 32(8), pp. 3695-3707.
- [37] Raschka S., Mirjalili V. Python machine learning: Machine learning and deep learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2. Packt Publishing Ltd., 2019, 770 p.
- [38] Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proc. 22nd SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, New York, 2016.
- [39] Matrenin P., et. al. Medium-term load forecasting in isolated power systems based on ensemble machine learning models. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 612-618.
- [40] Matrenin P., et. al. Adaptive ensemble models for medium-term forecasting of water inflow when planning electricity generation under climate change. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 439-447.
- [41] Chen C., Liu H. Medium-term wind power forecasting based on multi-resolution multi-learner ensemble and adaptive model selection. *Energy conversion and management*, 2020, vol. 206, art id. 112492.

Сведения об авторах.



Матренин Павел Викторович, кандидат технических наук. Младший научный сотрудник Центра технологического превосходства Новосибирского государственного технического университета и доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий НГТУ. Область научных интересов: системный анализ, методы машинного обучения, оптимизация и управление в электроэнергетике.

E-mail: matrenin.2012@corp.nstu.ru



Арестова Анна Юрьевна. Младший научный сотрудник Центра технологического превосходства Новосибирского государственного технического университета и старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ. Область научных интересов: разработка алгоритмов оптимизации и управления в электроэнергетике.

E-mail: arestova@corp.nstu.ru



Антоненков Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук. Доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета и главный энергетик АО «Сибирский Антрацит». Область научных интересов: повышение энергоэффективности горных предприятий, предиктивное управление, технo-ценоз.

E-mail: antonenkov@corp.nstu.ru

Design of Robust Decentralized Control Systems for Distillation Columns

Stopakevych A.O.¹, Stopakevych O.A.²

¹ National University of Intellectual Technologies and Communications

² Odessa Polytechnic National University
Odessa, Ukraine

Abstract. This paper is devoted to the development of a decentralized control system design method with improved robustness, applicable to distillation columns control problem. The aim is attained by solving the following tasks: selection of representative models of columns; development of an effective transfer function identification algorithm; development of a decentralized controller design algorithm, which takes into account the cross-links impact; verification of the developed method for the selected models of columns. The most important result is the developed design method, which includes two algorithms. The first algorithm can be used to identify simplified models of the effective transfer functions. The second algorithm makes it possible to design a decentralized control system based on the ratio between the diagonals of the original model and effective transfer functions. Modified PI controller is used. The achievement of the distillation column control system robustness to the synchronous technologically conditioned deviation of the model parameters by up to three hundred percent of the nominal value is the paper significant result. The digital implementation of the designed controllers is simple. The analysis of the literature shows that none of the previously proposed methods for designing decentralized automatic control systems solved such a problem. The efficiency of the developed algorithms is illustrated using the known models of dynamics of distillation columns. The analysis of limitations of the method as well as its significant differences to the Biggest Log Tuning and H_∞ loop shaping methods is presented.

Keywords: robustness, distillation column, parametric uncertainty, MIMO, multivariable, coupled system, decentralized control system, effective transfer function.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.04>

UDC: 681.51

Sinteza sistemelor descentralizate robuste de comandă pentru coloanele de rectificare

Stopakevici An.A.¹, Stopakevici Al.A.²

¹ Universitatea Națională de Tehnologii Intellectuale și Comunicații

² Universitatea Națională Politehnică Odessa
Odessa, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei lucrări este crearea metodei de sinteză a sistemelor de control descentralizate de robustețe ridicată în aplicarea la comanda coloanelor de rectificare, ale căror modele multidimensionale au cuplaje intersectate întru totul complete. Scopul propus este atins datorită rezolvării următoarelor sarcini: alegerea modelelor reprezentative de coloane; elaborarea algoritmului de determinare a funcției efective de transfer; elaborarea algoritmului de sinteză a regulatorului descentralizat ținând cont de influența cuplajelor intersectate; verificarea metodei obținute pe modelele de coloane alese. Cel mai important rezultat este metoda de sinteză dezvoltată, care include doi algoritmi. Primul algoritm permite obținerea unor modele simplificate ale funcțiilor efective de transfer pe canale de control descentralizate. Aceste funcții generează o matrice diagonală a unui model modificat al unui obiect de control multidimensional complet cuplat. Al doilea algoritm permite sintetizarea unui sistem descentralizat de comandă, ținând cont de relația dintre diagonalele matricei funcțiilor de transfer ale modelului original și matricea funcțiilor efective de transfer. Sintetizarea sistemului conform algoritmului presupune utilizarea unui regulator PI de o formă specială, ai cărui parametri sunt determinați ținând cont de legăturile transversale. Semnificația acestor rezultate constă în faptul că un astfel de sistem, în prezența legăturilor intersectate în canalele de comandă, se obține robustețea pentru o abatere sincronă tehnologic condiționată a parametrilor modelului cu până la trei sute procente din valoarea nominală. O analiză a literaturii de specialitate arată că niciuna dintre metodele propuse anterior pentru sinteza sistemelor de comandă automată descentralizată nu a pus o astfel de problemă. Sunt analizate limitările metodei și diferențele sale relevante față de alte metode similare, cum ar fi Biggest Log Tuning și optimizarea bazată pe contururi H_∞ .

Cuvinte-cheie: robustețe, coloană de rectificare, incertitudine parametrică, MIMO?, sistem multidimensional, sistem cuplaj multiplu, sistem descentralizat de comandă, funcție efectivă de transfer.

Синтез робастных децентрализованных систем управления ректификационными колоннами Стопакевич А. Ал.¹, Стопакевич Ал. А.²

¹ Государственный университет интеллектуальных технологий и связи

² Национальный университет «Одесская политехника»

Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является создание метода синтеза децентрализованных систем управления повышенной робастности в приложении к управлению ректификационными колоннами, многомерные модели которых имеют полные перекрестные связи. Поставленная цель достигается за счет решения следующих задач: выбор представительных моделей колонн; разработка алгоритма определения эффективной передаточной функции; разработка алгоритма синтеза децентрализованного регулятора с учетом влияния перекрестных связей; проверка полученного метода на выбранных моделях колонн. Наиболее важным результатом является разработанный метод синтеза, включающий два алгоритма. Первый алгоритм позволяет получить упрощенные модели эффективных передаточных функций по децентрализованным каналам управления. Эти функции создают диагональную матрицу модифицированной модели многомерного полностью связанного объекта управления. Второй алгоритм позволяет с учетом отношения диагоналей матрицы передаточных функций оригинальной модели и матрицы эффективных передаточных функций синтезировать децентрализованную систему управления. Синтез системы по алгоритму предполагает использование ПИ-регулятора специальной формы, параметры которого определяются с учетом перекрестных связей. Значимость полученных результатов состоит в том, что, в такой системе, при наличии перекрестных связей в каналах управления, достигнута робастность при синхронном технологически обусловленном отклонении параметров моделей на величину до трехсот процентов от номинального значения. При этом не возникает дополнительных проблем, которые бы усложнили цифровую реализацию регуляторов. Анализ литературных источников показывает, что ни в одном из предложенных ранее методов синтеза децентрализованных систем автоматического управления подобная задача поставлена не была. Эффективность разработанных алгоритмов проиллюстрирована на известных моделях динамики ректификационных колонн. Кроме того, приведен анализ ограничений метода и его значимые отличия от других подобных методов, таких как Biggest Log Tuning и поконтурная H_∞ оптимизация.
Ключевые слова: робастность, ректификационная колонна, параметрическая неопределенность, ММО, многомерная, многосвязная система, децентрализованная система управления, эффективная передаточная функция.

ВВЕДЕНИЕ

Задача синтеза систем автоматического управления (САУ) ректификационными колоннами (РК) как объектами управления (ОУ) имеет много подходов к решению, обусловленных особенностями динамики РК, температурного и концентрационного профиля, величины возможных возмущений [1].

Как правило, математическая модель динамики РК идентифицируется в виде матрицы передаточных функций (МПФ) со взаимосвязями, обусловленными самой технологией процесса. Например, увеличение расхода флегмы не только приводит к увеличению концентрации ключевого компонента в дистилляте, но и в кубовом продукте также. Отметим, что МПФ $P(s)$ большинства РК состоят из инерционных звеньев первого порядка с запаздыванием вида

$$P_{i,j}(s) = \exp^{-\tau_{i,j} \cdot s} \cdot (k_{i,j} / (T_{i,j} \cdot s + 1)) \quad (1)$$

За моделями такого вида закрепилось обозначение FOPDT.

Управление уровнями здесь не рассматривается.

Влияние перекрестных связей в каналах управления РК является существенным и может быть доминирующим. Поэтому, если ставится задача синтеза САУ с использованием децентрализованного подхода, то необходимо определить применимость этого подхода и выбрать каналы управления с минимальными перекрестными связями. Для этого, как правило, достаточно матрицы статики, полученной из МПФ.

Степень связанности определяется по значению числа CN (Condition Number) [2,3]. Это число выражает отношение максимального и минимального сингулярного чисел матрицы статики.

Выбор максимально автономных каналов управления проводится на основании результатов расчета матрицы Бристоля (RGA) [4]. Более точный результат дают методы выбора каналов, которые учитывают упрощенно и динамику, например RRA [5] и ERGA [6].

Поскольку влияние перекрестных связей устранить невозможно, то каждый автономный регулятор в децентрализованной САУ

будет работать при постоянном действии возмущений, вызванных работой других регуляторов. Более того, сами перекрестные связи могут превратить минимальнофазовый канал управления в неминимальнофазовый, что существенно снижает запас устойчивости, как продемонстрировано в работе [7]. Наличие запаздывания в каналах РК обусловлено технологически: чем выше запаздывание, тем эффективней разделение.

С точки зрения сложности управления модели FOPDT существенно отличаются в зависимости от отношения времени запаздывания к постоянной времени τ/T . ОУ с существенным (например, больше 0.8) отношением будем называть труднорегулируемыми. Известно, что в зависимости от указанного отношения следует применять разные методы синтеза САУ [8].

Решающим условием успеха решения задачи синтеза децентрализованной САУ РК является правильный выбор регуляторов и метода их настройки, который обеспечивает робастность САУ.

Для децентрализованных регуляторов, которые не включают внутреннюю модель ОУ, вполне адекватной является проверка робастности САУ при учете параметрической неопределённости РК в терминах FOPDT модели. Показательной является работа [9], в которой проведено исследование изменения параметров FOPDT моделей основных каналов РК $P_{i,i}(s)$ в зависимости от изменения кубового и флегмового чисел РК. Показано, что изменение как коэффициента передачи k , так и постоянной времени T , можно описать полиномиальным уравнением. В случае k оно не сложное, а в случае T наблюдается близкое к линейному или экспоненциальное изменение в зависимости от направления входного воздействия относительно номинала. Запаздывания находится в линейной зависимости от указанных технологических параметров РК. Обратим внимание, что изменяются все три параметра FOPDT модели одновременно. Причем, при изменении флегмового числа в 1.8 раза, кратность изменения k составляет примерно 2 раза, а T изменяется в 3 раза. При этом и для РК непромышленного типа показано, что неопределенность параметров в терминах FOPDT моделей тоже достигает 300% [10].

Обобщим результаты анализа наиболее распространённых подходов к решению задачи синтеза децентрализованных САУ.

Подход №1 – расчет регуляторов по каналам основной диагонали МПФ. Самый простой и популярный подход. Поскольку задача расчета настроек каждого регулятора не учитывает наличие других каналов, то для того, чтобы обеспечить требуемый запас устойчивости к влиянию перекрестных связей часто выбирают методы настройки, которые обеспечивают запас по фазе 60° [11]. Для ОУ с существенными перекрестными связями САУ подход может оказаться неработоспособным или не робастным.

Подход №2 – последовательное включение регуляторов с эмпирическим выбором настроек. В инженерной практике используется при неудовлетворительных результатах подхода №1. Подход состоит в последовательном замыкании контуров регулирования [12]. Порядок – от самого быстрого диагонального канала без существенных перекрестных связей. В результате возможно получение САУ, в которой при пуске регуляторы надо включать в таком же порядке. Иначе система может оказаться неустойчивой. Проблема живучести, интегрированности и робастности [13] полученных таким способом САУ может стоять достаточно остро.

Подход №3 – поиск настроек всех регуляторов оптимизацией их параметров. Задача сводится к имитационному моделированию САУ при разных настройках с целью поиска наилучшего процесса. Методы оптимизации потенциально позволяют находить оптимум по прямым показателям качества, однако такие задачи имеют предел по количеству параметров, подлежащих оптимизации. Также результат не гарантирован. В сложных случаях приходится использовать большое количество итераций с перезапуском начальных условий или эвристические алгоритмы.

Подход №4 – исходные настройки ПИ-регулятора стандартной формы определяются по модели канала с помощью метода Циглера-Никольсона. Далее нужно эмпирически оценить множитель $1/F$, $F \in [2..5]$, на который умножаются коэффициент передачи регулятора K_p и время изодрома T_i регулятора. Выбор F базируется на эмпирической связи логарифма максимальной частоты дополнительной функции чувствительности и размерности модели [14]. Как и обычный метод Циглера-Никольсона, BLT показывает существенно худшие прямые показатели качества по сравнению с популярными методами

настройки ПИ-регуляторов, особенно в каналах с существенным запаздыванием.

Подход №5 – поконтурная H_∞ оптимизация с использованием весовых функций. В постановке смешанной чувствительности это функции относительно входа, выхода и ошибки регулирования. Функция `hinfsv` MATLAB позволяет получить настройки комплекса децентрализованных регуляторов фиксированной структуры. Проблемой алгоритма является то, что решения сильно зависят от величин начальных значений и числа итераций.

Поэтому в алгоритме предусмотрено использование перезапусков процедуры поиска при случайных начальных значениях. Кроме того, поскольку в отличие от LQR или стандартной H_∞ задачи [15], регулятор должен иметь меньший порядок, чем порядок модели объекта, то возможна ситуация, когда нужно найти компромисс между недостаточно качественным регулированием отдельных контуров.

Фундаментальная проблема частотной нормы в H_∞ задаче – невозможность расчета норм объектов с запаздыванием без его аппроксимации. Это снижает точность оценки, особенно при значимой величине запаздывания.

Известно, что модели РК чаще всего описываются МПФ с FOPDT элементами и обычно имеют до 4 измерений и 4 управлений (4x4).

Децентрализованное управление обычно ведется с помощью ПИ-регуляторов. Большинство проанализированных подходов к решению задачи управления не обеспечивают устойчивое функционирование и робастности САУ при экспериментально определенном возможном изменении параметров объекта до 300% номинала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей статьи является разработка нового метода синтеза децентрализованных систем управления ректификационными колоннами, которые обеспечивают высокое качество регулирования и робастность САУ колонн при кратном изменении параметров математических моделей РК.

Разработка, в свою очередь, требует решения следующих частных задач:

1. Описание представительных моделей РК.

2. Разработка алгоритма определения эффективной передаточной функции FOPDT вида.

3. Разработка алгоритма настройки децентрализованного регулятора с учетом влияния перекрестных связей.

4. Проверка полученного метода на выбранных представительных моделях РК.

Таким образом, качество разработанного метода состоит в достижении уровня робастности децентрализованных САУ РК к одно-временному изменению трех параметров каждой FOPDT модели МПФ. Проверка должна проходить при любом сочетании изменения 3-х параметров в диапазоне 100-300%, что является максимальной технологически обоснованной для РК целью робастного управления.

ОПИСАНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ РК

Опишем наиболее часто рассматриваемые в литературе модели РК, которые будут использованы для исследования результативности разработанного метода.

Первой опишем модель для управления температурным режимом верха и низа РК [16]. Её обозначим как ВН. МПФ 2x2 с учетом перевода параметров модели из часов в минуты имеет вид

$$P_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0.16 \cdot e^{-0.6s}}{0.6 \cdot s + 1} & \frac{0.60 \cdot e^{-71.4s}}{3 \cdot s + 1} \\ \frac{-0.04 \cdot e^{-0.6s}}{1.2 \cdot s + 1} & \frac{0.49 \cdot e^{-28.2s}}{11.4 \cdot s + 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Модель управляется по диагонали. В целом объект по соотношению τ/T является трудно-регулируемым. Серьезная особенность – канал (1,2) имеет отношение $\tau/T=23.8$.

Вторая модель служит для управления концентрациями верха и низа РК [17]. Модель, которую обозначим как WB, достаточно хорошо исследована с точки зрения синтеза САУ. Её МПФ 2x2 имеет вид

$$P_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{12.8 \cdot e^{-s}}{16.7 \cdot s + 1} & \frac{-18.9 \cdot e^{-3s}}{21 \cdot s + 1} \\ \frac{6.6 \cdot e^{-7s}}{10.9 \cdot s + 1} & \frac{-19.4 \cdot e^{-3s}}{14.4 \cdot s + 1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Управление должно вестись по основной диагонали. Динамика не является трудноре-

гулируемой, хотя канал (2,1) достаточно близок к этому.

Третьей опишем модель для управления двумя концентрациями и температурой низа [18]. Модель обозначим OR. Её МПФ 3x3 имеет вид

$$P_3(s) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$P_{11} = \frac{0.66 \cdot e^{-2.6s}}{6.7 \cdot s + 1}, P_{12} = \frac{-0.61 \cdot e^{-3.5s}}{8.64 \cdot s + 1}, P_{13} = \frac{-0.0049 \cdot e^{-s}}{9.06 \cdot s + 1},$$

$$P_{21} = \frac{1.11 \cdot e^{-6.5s}}{3.25 \cdot s + 1}, P_{22} = \frac{-2.36 \cdot e^{-3s}}{5 \cdot s + 1}, P_{23} = \frac{-0.01 \cdot e^{-1.2s}}{7.09 \cdot s + 1}$$

$$P_{31} = \frac{-34.68 \cdot e^{-9.2s}}{8.15 \cdot s + 1}, P_{32} = \frac{46.2 \cdot e^{-9.4s}}{10.9 \cdot s + 1},$$

$$P_{33} = \frac{0.87 \cdot (11.61 \cdot s + 1) \cdot e^{-s}}{(3.89 \cdot s + 1)(18.8 \cdot s + 1)}$$

Четвертой опишем модель для управления тремя концентрациями и перепадом температуры [19]. Модель обозначим как AL. Её МПФ 4x4 имеет вид

$$P_4(s) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$P_{11} = \frac{4.09e^{-1.3s}}{(33s+1)(8.3s+1)}, P_{21} = \frac{-4.17e^{-5s}}{(45s+1)}, P_{31} = \frac{1.73e^{-18s}}{(13s+1)^2},$$

$$P_{41} = \frac{-11.2e^{-2.6s}}{(43s+1)(6.5s+1)}, P_{12} = \frac{-6.36e^{-1.2s}}{(31.6s+1)(20s+1)},$$

$$P_{22} = \frac{6.93e^{-1.02s}}{(44.6s+1)}, P_{32} = \frac{5.11e^{-12s}}{(13.3s+1)^2},$$

$$P_{42} = \frac{14(10s+1)e^{-0.02s}}{(45s+1)(17.4s^2+3s+1)}, P_{13} = \frac{-0.25e^{-1.4s}}{(21s+1)},$$

$$P_{23} = \frac{-0.05e^{-6s}}{(34.5s+1)^2}, P_{33} = \frac{4.61e^{-1.01s}}{(18.5s+1)},$$

$$P_{43} = \frac{0.1e^{-0.05s}}{(31.6s+1)(5s+1)}, P_{14} = \frac{-0.49e^{-6s}}{(22s+1)^2},$$

$$P_{24} = \frac{1.53e^{-3.8s}}{(48s+1)}, P_{34} = \frac{-5.49e^{-1.5s}}{(15s+1)},$$

$$P_{44} = \frac{4.49e^{-0.6s}}{(48s+1)(6.3s+1)}.$$

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АППРОКСИМИРОВАННОЙ ФОРДТ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

В работе [17] рассмотрена процедура алгебраического расчета эффективной передаточной функции (ЭПФ), по которой было предложено настраивать децентрализованные регуляторы. ЭПФ выводится из формулы метода RGA, но примененной к динамической модели ОУ

$$\lambda = P(s) \otimes (P(s)^{-1})^T, \quad (6)$$

где \otimes – поэлементное умножение матриц.

Для объекта с числом входов и выходов $n=2$

$$P = \begin{bmatrix} P(1,1) & P(1,2) \\ P(2,1) & P(2,2) \end{bmatrix}.$$

Следует получить две ЭПФ P_{e1}, P_{e2} (в общем случае n ЭПФ).

Элементы основной диагонали матрицы λ имеют вид

$$\lambda(1,1) = \lambda(2,2) = \frac{P(1,1) \cdot P(2,2)}{P(1,1) \cdot P(2,2) - P(1,2) \cdot P(2,1)}.$$

Таким образом, ЭПФ для настройки имеют вид:

$$P_{e1} = P(1,1) / \lambda(1,1) = P(1,1) - \frac{P(1,2) \cdot P(2,1)}{P(2,2)},$$

$$P_{e2} = P(2,2) / \lambda(2,2) = P(2,2) - \frac{P(1,2) \cdot P(2,1)}{P(1,1)}.$$

Поскольку метод предполагает вычисление обратной матрицы $P(s)^{-1}$, то для символьных вычислений это сложно. Как указывалось выше, проблема расчета динамического RGA для объектов большой размерности является вычислительно сложной. Кроме того, она алгебраически не всегда вычислима, поскольку предполагает деление блоков запаздывания. Например, в работе [20] показано, что для рассмотренной нефтяной РК [20, 21] 3x3 при использовании аппроксимации Паде получаются неустойчивые ЭПФ 32 порядка. Использование аппроксимации запаздывания рядом Тейлора требует использования большого числа членов, однако, чем их больше, тем больше вероятность получения неустойчивой

ЭПФ. Даже для устойчивой ЭПФ большой порядок уравнений приводит к дополнительной проблеме в MATLAB и схожих пакетах, связанной с особенностями вычислительных алгоритмов.

Рассмотрим простой пример. Зададим систему в пространстве состояний в виде: $A=\text{diag}(1:n)$; $B=\text{ones}(n,1)$; $C=\text{ones}(1,n)$; $\text{sys_ss}=\text{ss}(A,B,C,0)$. Затем преобразуем заданную систему из пространства состояний в передаточную функцию: $\text{sys_tf}=\text{tf}(\text{sys_ss})$. Вычислим собственные значения матрицы A и полюса ПФ sys_tf . В результате можно определить, что при $n=20$ собственные значения матрицы A и полюса ПФ будут мало отличаться, а при $n=60$ получим полное несоответствие.

Отметим, что особенностью определения ЭПФ является то, что она не требует высокой вычислительной точности, поскольку ЭПФ в этой работе предлагается рассматривать в виде FOPDT.

Для того, чтобы иметь малый риск столкнуться с проблемой запаздываний, рационально перейти к расчету в z -ПФ, в которых запаздывание можно представить в виде последовательности $1/z$. Понятно, что при большем шаге дискретности точность аппроксимации запаздывания падает, но и снижается порядок системы.

Например, для модели 2×2 WB при $\Delta t=0.1$ порядок знаменателя первой ЭПФ будет равен 144, а при $\Delta t=1$ порядок будет 18. В обоих случаях задача решается. Однако, например, для модели 3×3 [22, 23] получить устойчивое решение при любом адекватном Δt нельзя. Для $\Delta t=1$ порядок будет 408, для $\Delta t=10$ порядок равен 67, для $\Delta t=14$ – 55. Во всех случаях значения коэффициентов будет Inf. Вычисление z -ПФ не целиком, а по элементам в скобках тоже не позволяет достичь положительного результата.

Исходя из описанной ситуации сделаем выводы: 1) рациональным способом вычисления ЭПФ являются методы имитационного моделирования с последующей грубой аппроксимацией результата в виде FOPDT; 2) для минимизации кумулятивной погрешности шаг дискретности желательно использовать малый.

В MATLAB входит среда имитационного моделирования Simulink, которая подходит для решения поставленной задачи. Задачу расчета ЭПФ в Simulink можно решить с помощью специальной библиотеки Matsim. Эта

библиотека позволяет сформировать связи между блоками исходя из записанных алгебраических выражений. Таким образом, можно рассчитать ЭПФ с помощью построенной в Simulink структурной схемы с осциллографом и экспортом точек переходного процесса (ПП). В данном случае увеличение порядка конкретной z -ПФ не является критичным для вычислений.

Пример сгенерированной разработанной программой схемы для расчета первой ЭПФ РК WB показан на рис. 1 ($\Delta t=0.1$).

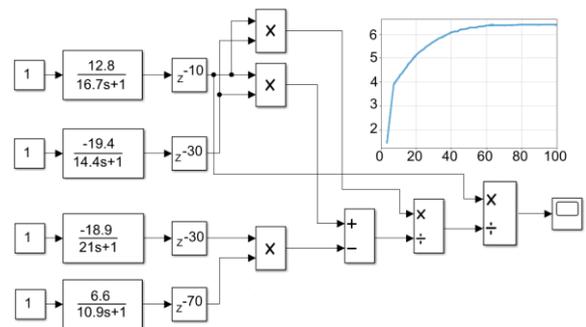


Рис. 1. Сгенерированная схема для получения разгонной характеристики ЭПФ P_{el} WB.¹

Таким образом, задача становится вычислительно реализуемой для объектов размерности до 6×6 , что достаточно для всех известных моделей отдельных РК.

Но при имитационном моделировании систем с алгебраическими операциями над ПФ с запаздыванием возникает проблема определения начала динамики, причем как при непрерывном, так и при дискретном представлении запаздывания. Практически это означает, что начальная часть разгонной характеристики модели будет представлять последовательность NaN, а в сложных случаях возможны и дополнительные разрывы.

Следовательно, после получения разгонной характеристики нужно разработать процедуру идентификации. Основная идея процедуры заключается в том, что разгонная характеристика любой формы должна быть сведена к FOPDT модели.

Определим, далее, диагональ в МПФ P , при необходимости переставив столбцы МПФ таким образом, чтобы по диагонали были каналы с минимумом перекрестных связей. Такую МПФ обозначим как P_{HO} .

Для каждого i -го канала управления идентификацию при единичном ступенчатом сиг-

¹ Appendix 1

нале для вектора точек y размерностью y_c при фиксированном временном интервале предлагается проводить по алгоритму:

- 1) Принять $p=1$ и определить $hd = \max(PFO(r,i) \cdot \tau / PFO(r,i) \cdot T)$, $r=1..n$
- 2) Если $hd \geq 0.8$, то найти индекс j в векторе y , при котором впервые зафиксировано $y_j \geq 0.01$ при положительном коэффициенте передачи, или зафиксировано $y_j \leq -0.01$ при отрицательном коэффициенте передачи, и присвоить $p=j$.
- 3) Если в начале вектора y присутствуют NaN значения, то следует линейно продолжить график до пересечения с осью абсцисс (например, метод 1 в функции `inpaint pans` из Matlab File Exchange) и заменить каждое NaN полученными точками.
- 4) Если в векторе y остались NaN, то следует их заменить на предыдущие не NaN значения.
- 5) Если $hd \geq 0.8$
 - 5.1) Принять $\tau_e = p \cdot \Delta t$, $k_e = y_{yc}$
 - 5.2) Поменять знак вектора y , если $k_e < 0$.
 - 5.3) Рассчитать

$$A_0 = \left(\sum_{i=p}^{yc} k_e - y_i \right) \cdot \Delta t, \quad it_0 = fix \left(\frac{A_0}{|k_e| \Delta t} \right), \quad (7)$$

$$A_1 = \left(\sum_{i=p}^{it_0} y_i - y_p \right) \cdot \Delta t.$$

- 5.4) Рассчитать $Te_1 = 2.7183 \cdot A_1 / |k_e|$
 - 5.5) Определить 95% времени установления ПП T_{95} по y
 - 5.6) Если $Te_1 > (T_{95}/3 - \tau_e)$, то $Te = (T_{95}/3 - \tau_e)$, иначе $Te = \text{mean}(Te_1, T_{95}/3 - \tau_e)$
 - 5.7) $Pe_i = \exp(-\tau_e \cdot s) (k_e / (T_e \cdot s + 1))$
- 6) Если $hd < 0.8$, то алгоритм получения FOPDT модели Pe_i близок п.5, но отличие в том, что: 1) p остается равным 1; 2) в векторе y предварительно рекомендуется обнулить выбросы ниже (или выше 0), а точки со значением выше коэффициента передачи приравнять к этому коэффициенту; 3) время запаздывания следует рассчитать по формуле $\tau_e = (A_0 - 2.7183 A_1) / |k_e|$.

Если из-за резких колебаний получить модель не удаётся, то следует использовать двухэтапную процедуру: получить модель высокого порядка без запаздывания, а потом ее идентифицировать как FOPDT. Важно, чтобы метод идентификации высокого порядка ориентировался на максимальное совпадения площади под кривой.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАСТРОЙКИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РЕГУЛЯТОРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ

Все РК характеризуются существенной инерционностью (переходные процессы измеряются минутами, а то и часами), а каналы управления могут иметь существенное, а то и доминирующее запаздывание. Для таких случаев используется ПИ-закон регулирования.

В работе [24] рассмотрена проблема усовершенствования ПИ-регулятора для объектов с запаздыванием. Предложено включить в интегратор ПИ-регулятора блок запаздывания. Включение запаздывания в закон управления позволяет достичь большую устойчивость и сократить величину колебательности, которую вносит И-составляющая. В работе [25] предлагается использовать ПИ-регулятор модифицированной схемы, показанной на рис. 2. Формирование интегратора здесь осуществляется в виде цепочки положительной обратной связи, включающей два инерционных звена и запаздывание. Кроме того, инерционное звено включено на измерительном входе.

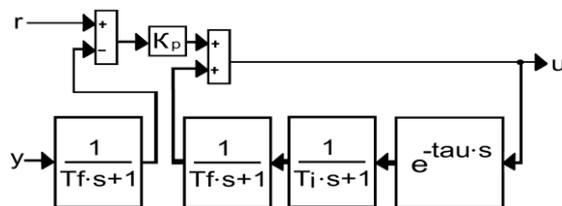


Рис. 2. Структурная схема усовершенствованного ПИ-регулятора. ²

САУ с предложенным регулятором на графике Найквиста обычно имеет большее расстояние до критической точки. Инерционное звено в измерительном канале и в цепи обратной связи включено чтобы компенсировать появление неустойчивости САУ при увеличении времени запаздывания, что для РК возможно при изменении расхода питания или при засорении колонны.

Разработанная нами процедура настройки такого регулятора состоит в следующем:

1. Рассчитать динамическую RGA по модели РНО.
2. Рассчитать ЭПФ. Для объектов 2x2 с моделями FOPDT-типа можно решить задачу аналитически или с помощью механизма символьных вычислений. Для более сложных объектов (хотя, это допустимо для любых)

² Appendix 1

рекомендуется использовать предложенный выше метод моделирования ЭПФ и сформировать множество Pe_1, \dots, Pe_n .

3. Если модель *PHO* имеет каналы, которые описываются более сложной чем FOPDT структурой, то редуцировать к FOPDT. Сформировать из моделей каналов новую модель *PFO*. Иначе $PFO=PHO$.

4. Определить настройки множества ПИ-регуляторов стандартной формы C_1, \dots, C_n для диагональных элементов *PHO*. В случае, если для некоторых каналов такой регулятор невозможен или не настраивается, то следует взять для настройки соответствующую модель канала из *PFO*. Следует использовать метод настройки ПИ-регулятора, который обеспечивает высокий уровень робастности (запас по фазе 60°) и минимум перерегулирования. В данном исследовании мы использовали MATLAB-программу *pidtune*.

5. Вычислить отношение коэффициентов передачи rk_i и постоянных времени rt_i между диагональными элементами матриц *PFO* (i, i) и матрицами множества Pe_1, \dots, Pe_n .

6. Сформировать регуляторы Ce_1, \dots, Ce_n в соответствии со структурой на рис. 2.

Настройки для i -го регулятора вычисляются в зависимости от случая:

а) Для случая $Pe_i.\tau=0$ и $PFO(i, i). \tau > 0$ принять $Ce_i.c=3, Ce_i.d=1$.

б) Для случая $Pe_i.\tau=0$ и $PFO(i, i). \tau=0$ принять $Ce_i.c=1, Ce_i.d=0$.

в) Для случая $Pe_i.\tau/Pe_i.T < 0.8$ принять $Ce_i.c = \max(3, PFO(i, i).T / PFO(i, i).\tau)$

$Ce_i.d = \max(1, 1+3 \cdot rk_i \cdot (PFO(i, i).\tau / PFO(i, i).T))$

г) Для случая $Pe_i.\tau/Pe_i.T \geq 0.8$ и $PFO(i, i).\tau=0 \Rightarrow Ce_i.c=3, Ce_i.d=1$.

д) Для случая $Pe_i.\tau/Pe_i.T \geq 0.8$ и $PFO(i, i).\tau > 0 \Rightarrow Ce_i.c = 0.7, Ce_i.d = (Pe_i.\tau / PFO(i, i).\tau) (1.2 \cdot rt_i)$.

Окончательно настройки Kp, Ti, tau, Tf регулятора Ce_i равны

$$\begin{aligned} Ce_i.Kp &= C_i.Kp / rk_i, Ce_i.Ti = C_i.Ti \cdot rt_i; \\ Ce_i.tau &= PFO(i, i).\tau \cdot Ce_i.d; \\ Ce_i.Tf &= Ce_i.tau / Ce_i.c. \end{aligned} \quad (8)$$

7. Провести имитационное моделирование при всех сочетаниях кратности параметров каналов РК. Для проверки робастности САУ запланируем 27 экспериментов

$$\begin{aligned} e_{01}\{1,1,1\}, e_{02}\{1,2,1\}, e_{03}\{1,3,1\}, e_{04}\{1,1,2\}, \\ e_{05}\{1,2,2\}, e_{06}\{1,3,2\}, e_{07}\{1,1,3\}, e_{08}\{1,2,3\}, \\ e_{09}\{1,3,1\}, e_{10}\{2,1,1\}, e_{11}\{2,2,1\}, e_{12}\{2,3,1\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} e_{13}\{2,1,2\}, e_{14}\{2,2,2\}, e_{15}\{2,3,2\}, e_{16}\{2,1,3\}, \\ e_{17}\{2,2,3\}, e_{18}\{2,3,1\}, e_{19}\{3,1,1\}, e_{20}\{3,2,1\}, \\ e_{21}\{3,3,1\}, e_{22}\{3,1,2\}, e_{23}\{3,2,2\}, e_{24}\{3,3,2\}, \\ e_{25}\{3,1,3\}, e_{26}\{3,2,3\}, e_{27}\{3,3,1\}. \end{aligned}$$

Обозначение $e_{08}\{1,2,3\}$ означает эксперимент №8, в котором все коэффициенты передачи ОУ останутся номинальными, все постоянные времени умножены на два, все запаздывания умножены на три.

ПРОВЕРКА НА МОДЕЛИ ВН

Сначала получим разгонные характеристики ЭПФ для модели и аппроксимируем эти характеристики FOPDT моделями. Разгонные характеристики исходных ЭПФ и их аппроксимированных FOPDT моделей показаны на рис. 3

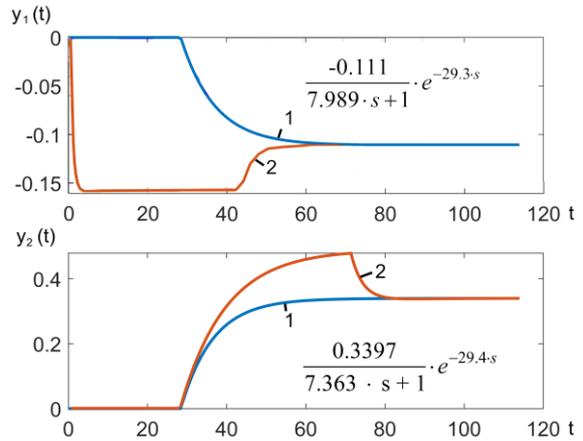


Рис. 3. Разгонные характеристики: 1 – FOPDT аппроксимации ЭПФ модели ВН, 2 – полной ЭПФ.³

Приведенные на рис. 3 графики показывают, что задача аппроксимации ЭПФ некой точной моделью с целью настройки по ней ПИ-регуляторов, как предложено в [17] не всегда может быть решена в принципе, поскольку сам ПИ-регулятор – это регулятор, оптимальный для FOPDT, к которой процесс первого канала вообще свести невозможно.

Отметим, что полученные ЭПФ Pe_1, \dots, Pe_n имеют существенно доминирующее время запаздывания и значительно большее, чем у диагональных каналов модели ВН (здесь это P). С помощью программы *pidtune* определим ПИ-регуляторы

$$\begin{aligned} C_1 &= \text{pidtune}(PHO(1,1)) = -5.21 \cdot (1+1/(0.833 \cdot s)) \\ C_2 &= \text{pidtune}(PHO(2,2)) = 0.629 \cdot (1+1/(14.9 \cdot s)) \end{aligned}$$

Вычислим необходимые коэффициенты

$$rk_1 = -0.1600 / -0.1109 = 1.4422,$$

$$rk_2 = 0.4900 / 0.3396 = 1.4427$$

$$rt_1 = 0.6000 / 7.9890 = 0.0751,$$

$$rt_2 = 11.4 / 7.3627 = 0.1058 = 1.5483$$

Вычислим параметры усовершенствованного ПИ-регулятора для случая доминирующего запаздывания по обоим ЭПФ

$$Ce_{1,d} = (Pe_1 \cdot \tau / PFO(i, i) \cdot \tau) \cdot (1.2 \cdot rt_1) = \dots$$

$$(29.2697 / 0.6) \cdot (1.2 \cdot 0.0751) = 4.3965;$$

$$Ce_{2,d} = (Pe_2 \cdot \tau / PFO(i, i) \cdot \tau) \cdot (1.2 \cdot rt_2) = \dots$$

$$(29.4164 / 28.2) \cdot (1.2 \cdot 1.5483) = 1.9381;$$

$$Ce_{1,c} = 0.7; Ce_{2,c} = 0.7.$$

$$Ce_{1,Kp} = C_1 \cdot Kp / rk_1 = -5.21 / 1.4415 = -3.6123$$

$$Ce_{2,Kp} = C_2 \cdot Kp / rk_2 = 0.629 / 1.4427 = 0.4359,$$

$$Ce_{1,Ti} = C_1 \cdot Ti \cdot rt_1 = 0.833 \cdot 0.0751 = 0.0625$$

$$Ce_{2,Ti} = C_2 \cdot Ti \cdot rt_2 = 14.9 \cdot 1.5483 = 23.1324$$

$$Ce_{1,tau} = PFO(1, 1) \cdot \tau \cdot Ce_{1,d} = 0.6 \cdot 4.3965 = 2.6379$$

$$Ce_{2,tau} = PFO(2, 2) \cdot \tau \cdot Ce_{2,d} = 28.2 \cdot 1.9381 = 54.6558$$

$$Ce_{1,Tf} = Ce_{1,tau} / Ce_{1,c} = 2.6379 / 0.7 = 3.7684$$

$$Ce_{2,Tf} = Ce_{2,tau} / Ce_{2,c} = 54.6558 / 0.7 = 78.0797$$

Для сравнения будем использовать настройки децентрализованных ПИ-регуляторов (с учетом масштабирования времени $d=60$), полученные в работе [16]:

$$C_1.Kp = -0.1, C_1.Ki = -6.67/d,$$

$$C_2.Kp = 0.4, C_1.Ki = 0.53/d$$

Для выявления характера перекрестных связей сначала проверим поведение системы при подаче задания 0.8 (как в указанной работе) на первый регулятор (1 столбик рис.4), а затем – на второй (2 столбик рис.4 столбик).

Видим, что с использованием предложенного метода усредняет выброс в перекрестных каналах. Что касается времени регулирования по заданию, то по заданию первому регулятору процесс 1 разработанной САУ явно лучше, по второму – зависит от заданных показателей качества. Эксперименты тут и далее проводит при подаче единичного задания всем регуляторам. Устойчивость разработанной САУ имеется при всех введенных экспериментах $e_{01}-e_{27}$. Прототипная САУ в целом при отклонении параметров ОУ дает более медленные процессы.

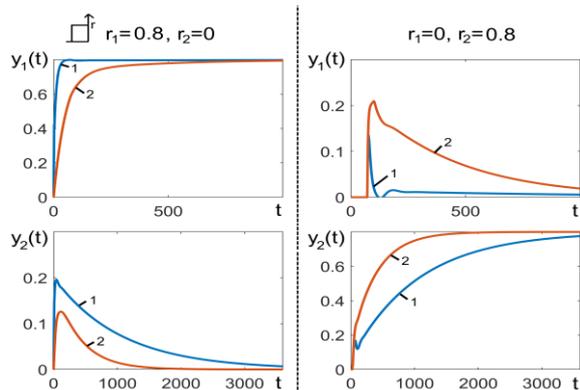


Рис. 4. Переходные процессы по заданию в колонне ВН при номинальных параметрах ОУ: 1 – разработанная САУ, 2 – прототипная САУ из работы [16].⁴

Показателен эксперимент e_{25} , в котором у прототипной САУ процесс колебательный с малым затуханием и устанавливается по двум каналам примерно при $t=3000$ мин. В разработанной САУ по первому каналу наблюдаются два резких (1.68 и 1.45) выброса на $t=5$ и $t=220$. Эти выбросы сразу нейтрализуются регуляторами. В точке около $t=360$ процесс можно считать установившимся по обоим каналам.

ПРОВЕРКА НА МОДЕЛИ WB

Проведем достаточно точную редукцию полученных эффективных ПФ до

$$Pe_1 = \frac{6.4}{12.75s+1}, Pe_2 = \frac{-9.685 \cdot e^{-1.58s}}{10.56 \cdot s+1}.$$

Как видим, ЭПФ Pe_1 запаздывания не имеет, а у $Pe_2 \tau/T=0.15$. Это другая динамика, чем в модели ВН, и синтез САУ по подходу №1 для такой РК не представляет сложности.

С помощью программы pidtune определим ПИ-регуляторы

$$C_1 = \text{pidtune}(PHO(1,1)) = 0.0956 \cdot (1+1/(7.01 \cdot s))$$

$$C_2 = \text{pidtune}(PHO(2,2)) = -0.0829 \cdot (1+1/(10.3 \cdot s))$$

Поскольку в Pe_1 нет запаздывания, а в $PFO(1,1)$ оно есть, то $Ce_{1,c}=3$ и $Ce_{1,d}=1$.

Поскольку в Pe_2 запаздывание не доминирующее, то

$$C_{2,c} = \max(3, PFO(2,2).T / PFO(2,2).\tau) = \dots$$

$$\max(3, 14.4 / 6.7517) = 4.8;$$

$$C_{2,d} = \max(1, 1+3 \cdot rk_2 \cdot (PFO(2,2).\tau / PFO(2,2).T)) = \dots$$

$$\max(1, 1+3 \cdot 2.0009 \cdot (6.7517 / 14.4)) = 2.5506$$

⁴ Appendix 1

Далее

$$\begin{aligned}
 C_{e_1.Kp} &= C_1.Kp / rk_1 = 0.0956 / 2.0093 = 0.0476 \\
 C_{e_2.Kp} &= C_2.Kp / rk_2 = -0.0829 / 2.0009 = -0.0414, \\
 C_{e_1.Ti} &= C_1.Ti \cdot rt_1 = 7.0139 \cdot 1.3094 = 9.1840 \\
 C_{e_2.Ti} &= C_2.Ti \cdot rt_2 = 10.3286 \cdot 1.3632 = 14.0795 \\
 C_{e_1.tau} &= PFO(1,1) \cdot \tau \cdot C_{e_1.d} = 1 \cdot 1 = 1 \\
 C_{e_2.tau} &= PFO(2,2) \cdot \tau \cdot C_{e_2.d} = 3 \cdot 2.2506 = 6.7517 \\
 C_{e_1.Tf} &= C_{e_1.tau} / C_{e_1.c} = 1 / 3 = 0.(3) \\
 C_{e_2.Tf} &= C_{e_2.tau} / C_{e_2.c} = 6.7517 / 4.7 = 1.4066
 \end{aligned}$$

Проведем моделирование переходных процессов при изменении задания первому (1-й столбик) и второму (2-й столбик) регулятору. Такое моделирование позволяет оценить прямые показатели качества при условии, что математическая модель точная. Для сравнения с предложенным выберем 3 метода: BLT ($Kp_1=0.375, Ti_1=8.29, Kp_2=-0.075, Ti_2=23.6$) [14], EOTF [17] ($Kp_1=0.5, Ti_1=10.54, Kp_2=-0.09, Ti_2=7.32$), pidtune по диагонали МПФ ($Kp_1=0.0956, Ti_1=7.01, Kp_2=-0.0829, Ti_2=10.3$). Результаты представлены на рис. 5.

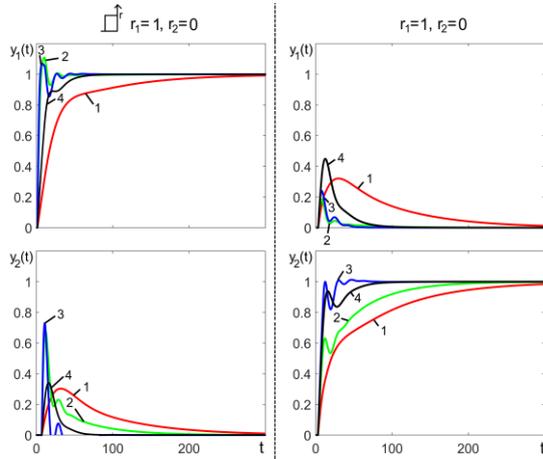


Рис. 5. Переходные процессы по заданию в САУ колонны WB при номинальных параметрах ОУ: 1 – предложенный метод, 2 – BLT, 3 – EOTF, 4 – настройка по диагонали с помощью pidtune.⁵

Анализ рис. 5 показывает, что, как и на рис. 4, наблюдается схожая тенденция: улучшение одного процесса проходит за счет ухудшения другого. Например, при использовании методов EOTF и BLT при изменении задания первого регулятора процесс является быстрым, но он также имеет и значительную амплитуду выбросов в ПП управляемой переменной второго регулятора. С точки зрения

прямых показателей качества при номинальном ОУ полученные графики показывают, что, как и в предыдущем случае, разработанный метод позволяет получить регулятор, который обеспечивает минимум среднего выброса в перекрестных связях, хотя переходные процессы в нем в данном случае самые медленные.

Проверка робастности показывает, что предложенный метод дает сбой в e_{25} (1 случай), настройка по диагонали с помощью pidtune дает сбой в $e_{7-8}, e_{13}, e_{17-19}, e_{22-27}$ (12 случаев), BLT в $e_8, e_{13}, e_{16-17}, e_{22-23}, e_{25-27}$ (9 случаев), EOTF в $e_4, e_8, e_{13-14}, e_{16-19}, e_{22-27}$ (14 случаев). Т.е. предложенный метод имеет существенно больший запас робастности и только в e_{25} дает слабо расходящийся процесс.

ПРОВЕРКА НА МОДЕЛИ ОР

Проведем редукцию полученных эффективных ПФ до

$$\begin{aligned}
 P_{e1} &= \frac{0.3356 \cdot e^{-3.37 \cdot s}}{1.421 \cdot s + 1}, P_{e2} = \frac{-1.247 \cdot e^{-3.29 \cdot s}}{0.4812 \cdot s + 1}, \\
 P_{e3} &= \frac{0.6086 \cdot e^{-0.427 \cdot s}}{10.64 \cdot s + 1}.
 \end{aligned}$$

Отметим, что первые две ЭПФ описывают каналы с существенно доминирующим запаздыванием. Третья ЭПФ имеет малое запаздывание.

С помощью программы pidtune определим ПИ-регуляторы

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \text{pidtune}(PHO(1,1)) = 2.91 \cdot (1 + 1/(10.05 \cdot s)) \\
 C_2 &= \text{pidtune}(PHO(2,2)) = -0.45 \cdot (1 + 1/(5.77 \cdot s)) \\
 C_3 &= \text{pidtune}(PHO(3,3)) = 1.32 \cdot (1 + 1/(2.79 \cdot s))
 \end{aligned}$$

Вычислим необходимые коэффициенты

$$\begin{aligned}
 rk_1 &= 1.9618, rk_2 = 1.8921, rk_3 = 1.4270 \\
 rt_1 &= 4.7140, rt_2 = 10.3903, rt_3 = 1.2391
 \end{aligned}$$

После вычислений, аналогичным ранее показанным, получим

$$\begin{aligned}
 C_{e_1.kp} &= 1.485, C_{e_1.Ti} = 49.4904, C_{e_1.Tf} = 27.2310, \\
 C_{e_1.c} &= 0.7, C_{e_1.d} = 7.3314, C_{e_1.tau} = 19.0617 \\
 C_{e_2.kp} &= -0.2377, C_{e_2.Ti} = 59.9921, C_{e_2.Tf} = 58.6293, \\
 C_{e_2.c} &= 0.7, C_{e_2.d} = 13.6802, C_{e_2.tau} = 41.0405
 \end{aligned}$$

$C_{e_3.kp} = 0.9271, C_{e_3.Ti} = 3.4540, C_{e_3.Tf} = 0,$
 $C_{e_3.c} = 1, C_{e_3.d} = 0, C_{e_3.tau} = 0$

Результаты моделирования при номинальных параметрах ОУ показаны на рис. 6.

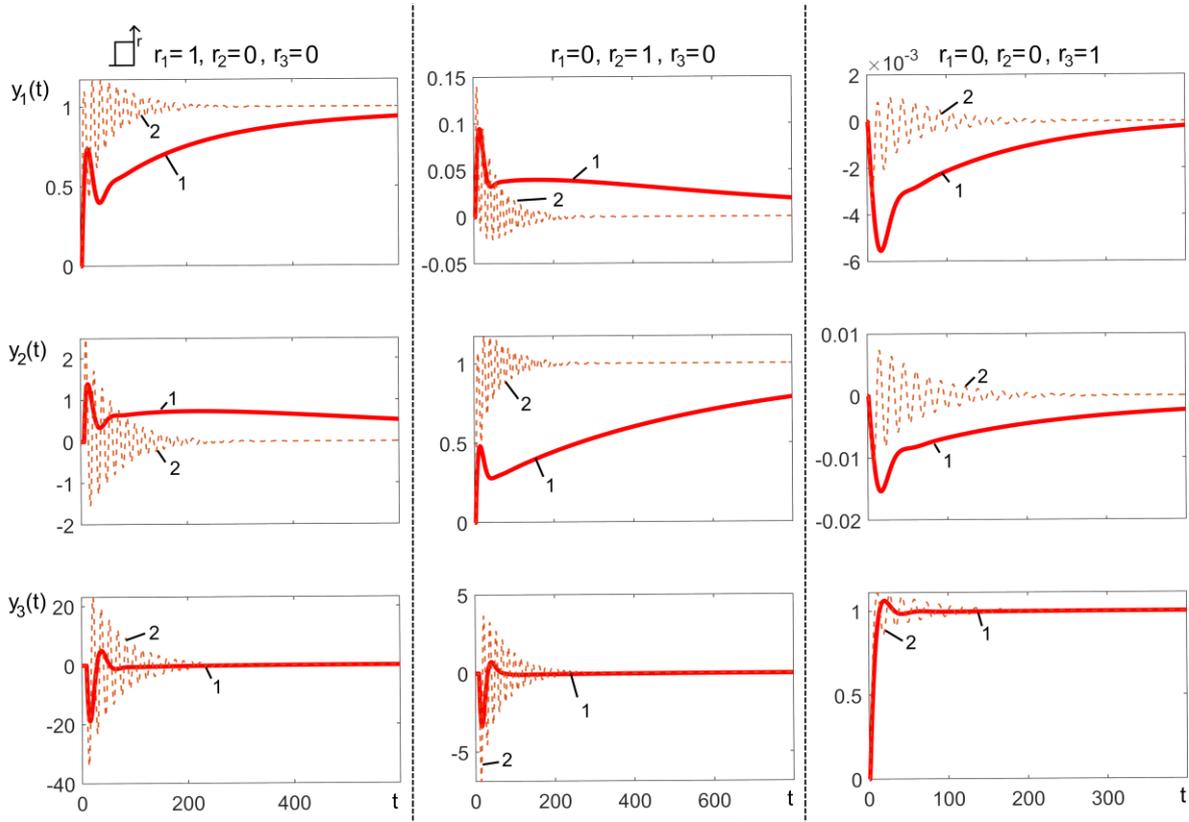


Рис. 6. Переходные процессы по заданию в децентрализованной САУ колонны ОР при использовании: 1 – предложенный метод, 2 – pidtune по диагонали МПФ⁶

Особенностью ПП по заданию первого и второго регуляторов является быстрый скачек примерно к половине шкалы, некоторое падение и потом медленный рост к заданию. Выброс по третьей управляемой переменной в первом и втором столбиках при использовании предложенного метода примерно в два раза меньше, хотя и сравнительно большой. Если принять во внимание физический смысл переменных модели ОР, то такой выброс допустим. Проверка робастности показывает, что предложенный метод не дает сбоев – САУ всегда устойчива. Прямые показатели качества вполне удовлетворительны, за исключением случаев с плавно затухающими высокоамплитудными колебаниями, которые наблюдаются в e_{25-27} . Что касается экспериментов с САУ, настроенной по диагонали с помощью pidtune, то неустойчивые системы получаются в e_{4-11}, e_{13-25} (21 случай) и сильно затухающие колебания в e_1, e_2 .

Таким образом, предложенный метод имеет очевидное преимущество

ПРОВЕРКА НА МОДЕЛИ AL

Проведем редукцию полученных эффективных ПФ до

$$P_{e1} = \frac{6.723}{19.9 \cdot s + 1} \cdot e^{-6.25 \cdot s}, P_{e2} = \frac{2.891}{38.84 \cdot s + 1} \cdot e^{-4.83 \cdot s}$$

$$P_{e3} = \frac{6.227}{13.32 \cdot s + 1} \cdot e^{-3.58 \cdot s}, P_{e4} = \frac{1.484}{43.86 \cdot s + 1} \cdot e^{-24.8 \cdot s}$$

Все ЭФП имеют запаздывание, но оно не является доминирующим.

Получим настройки ПИ-регуляторов и необходимые коэффициенты

$$C_1 = \text{pidtune}(PHO(1,1)) = 0.6627 \cdot (1 + 1/(45.9649 \cdot s))$$

$$C_2 = \text{pidtune}(PHO(2,2)) = 0.0672 \cdot (1 + 1/(18.6882 \cdot s))$$

$$C_3 = \text{pidtune}(PHO(3,3)) = 0.3512 \cdot (1 + 1/(10.5804 \cdot s))$$

$$C_4 = \text{pidtune}(PHO(4,4)) = 0.1059 \cdot (1 + 1/(29.0239 \cdot s))$$

$$rk_1 = 0.6043, rk_2 = 2.3898, rk_3 = 0.7461, rk_4 = 3.0165$$

$$rt_1 = 1.6462, rt_2 = 1.1483, rt_3 = 1.3888, rt_4 = 1.0812$$

⁶ Appendix 1

После вычислений, аналогичных ранее проведенным, получим

$$C_{e_1.kp} = 0.6627, C_{e_1.Ti} = 45.9649, C_{e_1.Tf} = 4.3325, \\ C_{e_1.c} = 3.4045, C_{e_1.d} = 1.5325, C_{e_1.tau} = 14.7497$$

$$C_{e_2.kp} = 0.0672, C_{e_2.Ti} = 18.6882, C_{e_2.Tf} = 0.0272,$$

$$C_{e_2.c} = 43.7255, C_{e_2.d} = 1.1640, C_{e_2.tau} = 1.1872$$

$$C_{e_3.kp} = 0.3512, C_{e_3.Ti} = 10.5804, C_{e_3.Tf} = 0.0619, \\ C_{e_3.c} = 18.3168, C_{e_3.d} = 1.1222, C_{e_3.tau} = 1.1334$$

$$C_{e_4.kp} = 0.1059, C_{e_4.Ti} = 29.0239, C_{e_4.Tf} = 2.7482, \\ C_{e_4.c} = 6.4414, C_{e_4.d} = 2.4049, C_{e_4.tau} = 17.7026$$

Результаты моделирования при изменении четырех заданий поочередно при номинальных параметрах ОУ показаны на рис. 7.

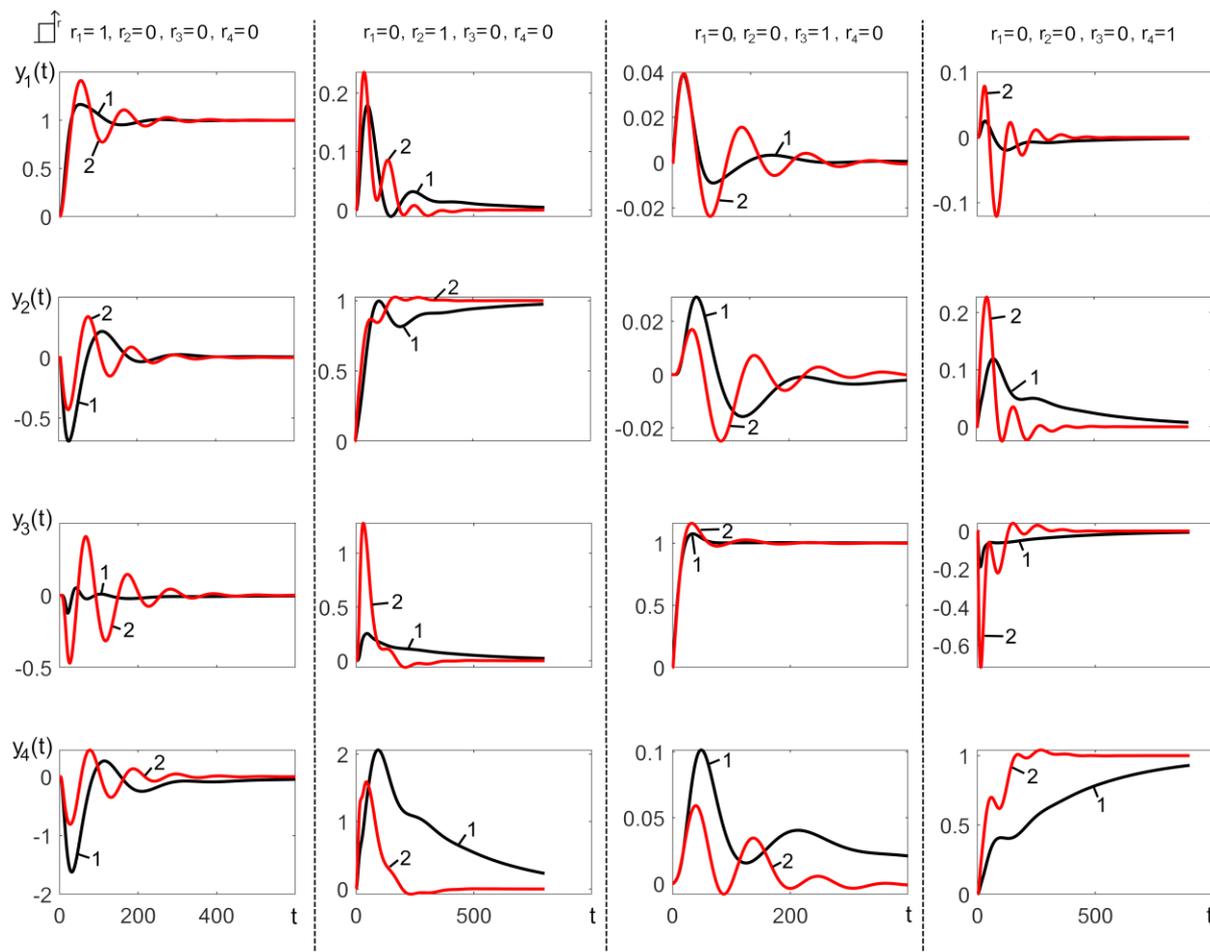


Рис. 7. Переходные процессы по заданию в децентрализованной САУ колонны АЛ при использовании: 1 – предложенный метод, 2 – pidtune под диагонали МПФ⁷

Проверка робастности показывает, что предложенный метод не дает сбоев – САУ всегда устойчива. Прямые показатели качества вполне удовлетворительны.

Что касается экспериментов с САУ, настроенной по диагонали с помощью pidtune, то неустойчивые системы получаются в $e_6, e_{8-9}, e_{15-18}, e_{22-27}$ (13 случаев) и резко затухающе колебательные в e_{12}, e_{13}, e_{14} . Таким образом, предложенный метод имеет очевидное преимущество.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

У разработанного метода имеются ограничения, выявленные путем проверки на опубликованных в литературе представительных моделях динамики более 20 РК:

1) Метод часто делает динамику переходных процессов более плавной и замедленной, следовательно, если простые ПИ регуляторы справляются с управлением по диагонали при рассматриваемых отклонениях параметров

⁷ Appendix 1

модели, то предложенный метод может и не внести улучшений, за исключением случаев, когда исходные процессы колебательные с затуханием.

2) Метод не работает с моделями, в которых с помощью матриц RGA/ERGA/RRA невозможно выделить рабочую диагональ. Известный пример такого объекта – депропанатор Ванга [26], типовая модель которого используется для проверки методов «развязки». Требования 300% робастности не будут выполнены в САУ с колоннами, которые имеют по ключевым каналам близкие или одинаковые постоянные времени. Например, колонна фирмы Shell [22,23].

3) Не допускаются РК как с неквадратной МПФ, так и без перекрестных связей.

4) МПФ модели РК должна описывать динамику достаточно точно, динамика каналов должна адекватно сводиться к FOPDT моделям (каналы без самовыравнивания не допускаются).

5) Не гарантируется использование метода с динамическими моделями РК, в которых динамика имеет существенное «набухание», например, аппараты с существенными возвратными потоками, с подачей двухфазного питания и т.п.

6) Не рекомендуется использование метода для колонн с малым запаздыванием. Пример – колонна Тиреуса и Луйбена [17], которая является особым случаем и задачей с существенным технологическим конфликтом. Если колонна имеет существенное запаздывание и большое CN, то метод дает отличные результаты, например, колонна OR [18].

7) Метод не может использоваться при получении ЭПФ, которые имеют явное и долгое «набухание». Такое набухание нельзя адекватно описать запаздыванием. Тем не менее, резкие кратковременные выбросы не являются показателем того, что метод будет не применим. Однако, эти выбросы не нужно учитывать, как предлагается в предложенной процедуре идентификации.

ВЫВОДЫ

1. Особенностью РК как объекта управления являются: а) существенные перекрестные связи; б) наиболее частая сводимость каналов к FOPDT моделям; в) нелинейность поведения, которая может быть сведена к изменению коэффициентом FOPDT модели, максимальный технологически возможный диапазон изменения которых составляет 300%.

2. FOPDT модели по определению являются неминимальнофазовыми. Для таких моделей значимым является показатель τ/T . Оптимальным для такой модели считается обычный регулятор ПИ-типа, однако это полностью адекватно только при малой величине $\tau/T \leq 1$. С увеличением показателя резко снижается потенциальный запас устойчивости САУ, поскольку обратная связь реализуется по существенно неактуальному состоянию ОУ. Известные методы компенсации запаздывания, а именно предиктор Смита и его вариации, предполагают достаточно точное знание запаздывания, что для РК неприменимо. Классические методы «развязки» также неприменимы, поскольку снижают запас устойчивости САУ [27].

3. Наиболее распространенным в промышленности типом САУ РК является децентрализованная САУ на базе ПИ-регуляторов. Ее очевидным преимуществом является возможность эмпирически скорректировать настройки регуляторов в процессе наладки или при падении качества регулирования в процессе эксплуатации САУ.

4. Децентрализованная САУ РК по определению не может быть оптимальной, поскольку высокое качество регулирования САУ такой структуры может показать только при условии незначимости перекрестных связей, что не относится к рассматриваемому ОУ.

5. Типовым подходом к синтезу децентрализованной САУ является выбор диагонали с минимумом влияния перекрестных связей, например, с помощью метода RGA. Регуляторы настраиваются по моделям каналов диагонали. Однако этот подход без последующей эмпирической донастройки может и не привести к получению рабочей САУ.

6. Процедуру последующей коррекции настроек можно реализовать с помощью методов, таких как BLT или поконтурная H-inf оптимизация. Эти методы работают, однако заложенные в них критерии не учитывают запаздывания.

7. В разработанном методе предлагается корректировать настройки регуляторов по параметрам FOPDT моделей эффективных передаточных функций. Кроме того, сам регулятор расширяется путем введения запаздывания и дополнительного фильтра в контур интегрирования. Показано, что метод обеспечивает высокий уровень робастности, оценённый по 27 экспериментам.

8. Предложенный метод не применим к РК, которые имеют каналы с «набуханием» и астатические каналы. Это может стать первым направлением дальнейшим исследованием. Вторым направлением может стать процедура дальнейшей оптимизации найденных параметров с целью повышения робастности в приложении к другим ОУ теплового типа.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. The Simulink Diagram has been Generated by the Developed Software. The Diagram Lets to Obtain a Step Response of Effective Transfer Function Pe1 for WB Distillation Column Model.

²Fig. 2. Block Diagram of the Improved PI Controller

³Fig. 3. Step Responses of: 1 – FOPDT Approximation of Effective Transfer Functions from BH Distillation Column Model, 2 – Effective Transfer Function.

⁴Fig. 4. System Responses to the Controller's Step Reference Changes in BH Distillation Column Control System with Nominal Plant Model Parameters: 1 – Control System Designed by the Developed Method,

2 – with the Settings Published in Paper [16].

⁵Fig. 5. System Responses to the Controller's Step Reference Changes in WB Distillation Column Control System with Nominal Plant Model Parameters:

1 – Control System Designed by the Developed Method,

2 – by BLT Method, 3 - by EOTF Method, 4 - by Pidtune Used on Plant Model Transfer Function Matrix Diagonal.

⁶Fig. 6. System Responses to the Controller's Step Reference Changes in OR Distillation Column Control System with Nominal Plant Model Parameters:

1 – Control System Designed by the Developed Method, 2 – by Pidtune Used on Plant Model Transfer Function Matrix Diagonal.

⁷Fig. 7. System Responses to the Controller's Step Reference Changes in AL Distillation Column Control System with Nominal Plant Model Parameters:

1 – Control System Designed by the Developed Method, 2 – by Pidtune Used on Plant Model Transfer Function Matrix Diagonal.

Литература (References)

[1] Luyben W. L. Method for Evaluating Single-End Control of Distillation Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, vol. 48, no. 23, pp. 10594–10603. doi:10.1021/ie900778r

[2] Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control. Analysis and design. John Wiley & Sons, 2005.

[3] Zhou K., Doyle J. Essentials of robust control. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1998.

[4] Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE*

Transactions on Automatic Control, 1966, no. 11(1), pp. 133–134.

- [5] Jain A., Babu B.V. Relative Response Array: A New Tool for Control Configuration Selection. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2015, vol.6, no.5, pp. 356–362. doi:10.7763/ijcea.2015.v6.5097.
- [6] Xiong Q., Cai W. J., He M. J. A Practical Loop Pairing Criterion for Multivariable Processes. *Journal of Process Control*, 2005, no. 15 (7). pp. 741–747.
- [7] Zhu Z.X. Structural Analysis and Stability Conditions of Decentralized Control Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, vol. 35, no., pp. 736–745. doi:10.1021/ie950455a.
- [8] Garpinger O., Hägglund T., Åström K.J. Criteria and Trade-offs in PID Design. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2012, vol. 2, pp. 47–52. doi:10.3182/20120328-3-IT-3014.000089
- [9] Chawankul N., Sandoval L.A.R., Budman H., Douglas P.L. Integration of design and control: a robust control approach using MPC. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 85, pp. 433–446.
- [10] Allgöwer F., Raisch J. Multivariable controller design for an industrial distillation column. *The mathematics of control theory. Institute of Mathematics and its Applications conference series*, 1992, pp.381–406. doi:10.18419/opus-4404.
- [11] Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. *Advances in Industrial Control*. London, Springer-Verlag, 2012.
- [12] Hovd M., Skogestad S. Sequential design of decentralized controllers. *Automatica*, 1994, vol. 30, no.10, pp. 1601–1607. doi:10.1016/0005-1098(94)90099-X 9
- [13] Niederlinski A. A heuristic approach to the design of linear multivariable interacting control systems. *Automatica*, 1971, vol. 7. pp. 691–701.
- [14] Luyben W.L. Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, vol. 25, no. 3, pp. 654–660. doi:10.1021/i200034a0107
- [15] Apkarian P., Noll D. The Hinfl Control Problem is Solved. *AerospaceLab Journal*, 2017, no. 13. doi:10.12762/2017.AL13-016
- [16] Bhat V.S., Indiran T., Selvanathan S.P. Design and Implementation of Decentralized PI Controller for Pilot Plant Binary Distillation Column. *International Journal of ChemTech Research*, 2017, vol. 10, pp. 284.
- [17] Vu T.N.L., Lee M. Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes. *Journal of Process Control*, 2010, vol. 20, no. 8, pp. 922–933. doi:10.1016/j.jprocont.2010.06.012

- [18] Ogunnaike B., Lemaire J. P., Morari M., Ray W.H. Advanced multivariable control of a pilot-plant distillation column. *AIChE Journal*. 1983, vol. 29, no 4, pp. 632–640.
- [19] Luyben W.L., Alatlql I.Y. Control of a Complex Sidestream Column/Stripper Distillation Configuration. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1986, no. 25, pp. 762–767.
- [20] Tugashova L.G. Sovershenstvovaniye upravleniya protsessom rektifikatsii nefi v usloviyakh malogo neftepererabatyvayushchego zavoda [Improving the control of the oil distillation process in a small oil refinery]. Tambov, Tambov State Technical Univ., 2018, 216 p.
- [21] Tugashova L.G. Issledovaniye vozmozhnosti upravleniya protsessom rektifikatsii nefi s primeneniym tipovykh regulyatorov. [Investigation of the possibility of controlling the process of oil distillation using standard regulators]. Vestnik YUUrGU. Seriya Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika [Bulletin of SUSU. Computer technologies, control, radio electronics], 2016, vol. 16, no. 3, pp. 120–131, doi:10.14529/ctcr160313hnologies, (In Russian).
- [22] Prett D.M., Morari M. The Shell Process Control Workshop. USA, Stoneham, MA, Butterworth Publishers, 1987.
- [23] Prett D.M., Garcia C.E., Ramaker B.L. The Second Shell Process Control Workshop: solutions to the shell standard control problem. USA, Houston, TX, Butterworth Publishers, 1990.
- [24] Hernández-Diez J.E., Méndez-Barrios C.F., Niculescu S.I. Practical Guidelines for Tuning PD and PI Delay-Based Controllers. *IFAC-PapersOnLine.*, 2019, vol. 52, no.18, pp. 61–66. doi:10.1016/j.ifacol.2019.12.207.
- [25] Pathiran A.R., Muniraj R., Willjuice I.M., Prabhu S.R.B., Jarin T. Unified design method of time delayed PI controller for first order plus dead-time process models with different dead-time to time constant ratio. *Archives of Control Sciences*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 447–476. doi:10.24425/ACS.2021.137427.
- [26] Wang Q.G. Decoupling control. Berlin, Heidelberg, Springer, 2003.
- [27] Visioli A. Practical PID control. London, Springer, 2009.

Сведения об авторах.



Стопакевич Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент. Государственный университет интеллектуальных технологий и связи. Область научных интересов — сложные системы автоматического управления технологическими процессами, программные технологии в области автоматизации производства. Украина, Одесса. E-mail: stopakevich@gmail.com



Стопакевич Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, ст. научн. сотр. Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов — системный анализ и теория сложных систем управления, многомерные системы управления технологическими процессами промышленности, проблемы кибербезопасности. Украина, Одесса. E-mail: stopakevich@op.edu.ua

Increasing the Energy Efficiency of Blast-Furnace Smelting by Choosing Rational Parameters for Loading a Multicomponent Charge

**Ivanča N.G., Muraviova I.G., Vishniakov V.I., Shcherbachov V.R.,
Ermolina K.P.**

Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
Dnipro, Ukraine

Abstract. The purpose of this study was to develop a calculation tool for researchers and technologists - metallurgists, providing the ability to quickly assess the distribution of charge materials in a blast furnace when it is loaded with a multicomponent charge. The goal is achieved by analyzing and summarizing the multidimensional matrix of values for the content of the charge components in the annular zones of the blast furnace, obtained using a mathematical model of its loading under various modes, changing the content of pellets in the charge and the moment the pellets are unloaded onto the main conveyor. The most important results of the studies carried out are the substantiation of the possibility of obtaining and applying calculated dependencies to determine the characteristics of the distribution of charge components with an accuracy acceptable for technological practice, as well as the established relationship between the content of the component in the charge and the value of the set point for the start of unloading it onto the conveyor with the content of this component in the annular zones of the top. Estimated composition of mixtures of charge materials formed in different zones of a blast furnace makes it possible to predict the properties of melts formed from them and to correct them in order to achieve the required level of energy efficiency in melting a multicomponent charge by promptly choosing rational parameters of the loading mode.

Keywords: multicomponent charge, mixtures of iron ore materials, conveyor, distribution of components along the radius, calculated dependencies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>

UDC: 669.162.261.669.162.24.083.133

Sporirea eficienței energetice a topiturii în furnal prin selectarea parametrilor raționali a regimului de încărcare a încărcăturii multicomponente

Ivancea N.G., Muraviova I.G., Vişniakov V.I., Şcerbachov V.R., Ermolina K.P.

Institutul Z. I. Nekrasov de Metalurgie feroasă, Academia Națională de Științe a Ucrainei,
or. Dnepr, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei cercetări este de a dezvolta un instrument de calcul pentru cercetători și tehnologi - metalurgiști, care ar oferi posibilitatea unei evaluări rapide a distribuției materialelor de încărcare în spațiul de lucru al furnalului atunci, când acesta este încărcat cu materiale de încărcare multicomponente, inclusiv, în special, materiale de încărcare de calitate scăzută, fracțiuni de materiale de încărcare substandard (cut-off), precum și diverși aditivi de restaurare a combustibilului. Scopul stabilit este atins prin analiza și generalizarea rezultatelor simulării matematice a procesului de încărcare a furnalului cu transportare pe bandă rulantă a materialelor de încărcare și cu mașină de încărcare fără con, pe baza cărora a fost obținută matricea multidimensională a valorilor conținutului materialelor de încărcare în zece zone ale inelului furnalului, în funcție de programul de încărcare, de raza medie a zonei, de conținutul materialelor de încărcare și de setarea descărcării acestora pe banda rulantă principală. Cel mai important rezultat al cercetării efectuate este argumentarea posibilității de obținere și utilizare a dependențelor de calcul pentru determinarea caracteristicilor de distribuție a componentelor individuale ale încărcăturii pe grătarul furnalului înalt cu o precizie acceptabilă pentru practica tehnologică. Rezultatele importante includ, de asemenea, relațiile stabilite între conținutul de componente din încărcătură și valoarea punctului de reglare pentru descărcarea acestora pe transportorul principal și conținutul relativ al acestei componente într-o anumită zonă inelară a focarului. Semnificația rezultatelor obținute constă în crearea unui instrument de calcul pentru evaluarea conținutului relativ al componentelor încărcăturii în diferite puncte ale razei cuptorului, care oferă posibilitatea de a prezice ulterior compoziția amestecurilor de materiale de încărcare formate în diferite zone inelare ale furnalului.

Cuvinte-cheie: încărcătură cu mai multe componente, amestecuri de minereu de fier, transportor, distribuția pe rază a componentelor, dependențe calculate.

Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты

Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И., Щербачев В.Р., Ермолина К.П.

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины,
г. Днепр, Украина

Аннотация. Целью настоящего исследования являлась разработка расчетного инструмента для исследователей и технологов - металлургов, обеспечивающего возможность оперативной оценки распределения шихтовых материалов в рабочем пространстве доменной печи при загрузке ее многокомпонентной шихтой, включающей, в том числе, шихтовые материалы пониженного качества, некондиционные (отсеваемые) фракции шихтовых материалов, а также различные топливно - восстановительные, гарнисажеобразующие и промывочные добавки. Поставленная цель достигается путем анализа и обобщения результатов математического моделирования процесса загрузки доменной печи с конвейерной доставкой шихты на колошник и бесконусным загрузочным устройством, на основе которых получена многомерная матрица значений содержания компонентов шихты в десяти кольцевых зонах доменной печи в зависимости от вида программы загрузки, среднего радиуса зоны, содержания компонентов в шихте и уставки начала выгрузки их на главный конвейер. Наиболее важным результатом проведенных исследований является выполненное на примере окатышей, загружаемых в составе железорудной порции, обоснование возможности получения и применения расчетных зависимостей для определения характеристик распределения отдельных компонентов шихты на колошнике доменной печи с приемлемой для технологической практики точностью. К важным результатам следует отнести также установленные взаимосвязи содержания компонента в шихте и величины уставки начала выгрузки его на главный конвейер с относительным содержанием этого компонента в конкретной кольцевой зоне колошника. Значимость полученных результатов заключается в создании расчетного инструмента для оценки относительного содержания компонентов шихты в различных точках радиуса колошника, что обеспечивает возможность последующего прогноза состава смесей шихтовых материалов, формирующихся в различных кольцевых зонах доменной печи, свойств, образующихся из них расплавов и их корректировки. Это позволит обеспечить требуемый уровень энергоэффективности плавки путем оперативного выбора рациональных параметров режима загрузки в условиях работы доменных печей на многокомпонентной шихте.

Ключевые слова: многокомпонентная загрузка, железорудные смеси, конвейер, радиусное распределение компонентов, расчетные зависимости.

I. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Устойчивая тенденция увеличения стоимости сырья и топлива, сформировавшаяся в последние годы, предопределяет работу доменных печей в изменяющихся шихтовых условиях, характеризующихся использованием материалов пониженного качества, применением многокомпонентной шихты с одновременным использованием двух и более видов каждого из основных компонентов (агломерата, окатышей и кокса), вводом в состав шихты некондиционных (отсеваемых) фракций шихтовых материалов, а также использованием различных топливно - восстановительных, гарнисажеобразующих и промывочных добавок. Как показано в работах Большакова В.И. [1], Доброскока В.А. [2], Бухвальдера Й., Лонарди Э., Кёлера С. [3], Шепетовского Э.А. [4] и других исследователей для сокращения потребления дефицитных энергоносителей и обеспечения требуемого уровня энергоэффективности

доменной плавки перспективным является совершенствование технологии загрузки доменных печей путем поиска и внедрения рациональных параметров формирования и режимов загрузки порций многокомпонентной шихты. Результаты ранее выполненных исследований и опыт промышленного опробования различных технологических приемов загрузки многокомпонентной шихты показали, что смешивание железорудных шихтовых материалов и кокса перед загрузкой в доменную печь, ввод в состав шихты добавок требуемого назначения с образованием на колошнике доменной печи смешанного слоя шихтовых материалов, а также ввод отсеваемых фракций шихтовых материалов в доменную шихту и загрузка их в составе многокомпонентных смешанных порций является одним из наиболее эффективных путей уменьшения энергоемкости доменной плавки и себестоимости чугуна, при условии обоснованного выбора рациональных параметров формирования смешанных порций шихты и режима их загрузки [1 - 4].

Эффективность использования многокомпонентной шихты определяется уровнем реализации технологических требований к распределению компонентов в различных зонах доменной печи, которые обеспечивают наиболее рациональные тепловой и газодинамический режимы, а также режимы восстановления и шлакообразования, соответствующие составу шихты в указанных зонах. Например, практический опыт ввода окатышей в доменную шихту и результаты многочисленных исследований, выполненных под руководством Большакова В.И. [4], показали преимущества их загрузки в смеси с агломератом в виде смешанных порций с заданной структурой, а также негативные последствия загрузки этих компонентов в виде отдельных порций.

В связи с усиливающимся дефицитом качественного железорудного сырья, коксующихся углей и, соответственно, кокса в доменном производстве широкое распространение получили технологические приемы ввода различных нетрадиционных железосодержащих материалов (в том числе, отсеваемых фракций агломерата и окатышей), топливных и углеродсодержащих добавок в состав шихты, активно разрабатывавшиеся Доброскоком В.А., Бухвальдером Й. [2, 3], Никитиным Л.Д., Бугаевым С.Ф. [5], Ярошевским С.Л., Ноздрачевым В.А., Кузиным А.В. [6, 7] и другими. Информация о распределении компонентов доменной шихты по сечению печи важна не только при выборе либо корректировке программ загрузки, но и при выполнении аналитических исследований процессов в объеме доменной печи. Компонентный состав находящихся в различных зонах печи смесей железосодержащих материалов может быть определен с использованием комплексной математической модели, включающей модели ряда процессов: формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, движения их по тракту загрузки (в том числе, в загрузочном устройстве) и в рабочем пространстве доменной печи, а также распределения шихты на поверхности засыпи. Основные положения комплексной математической модели процесса загрузки доменной печи изложены в отдельной статье (*Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace*) / [Иванча Н.Г., Муравьева И.Г.,

Шумельчик Е.И., Вишняков В.И., Семенов Ю.С.] – *Metallurgist*, May 2018, Volume 62, Issue 1–2, pp. 95–100). Получение информации о распределении компонентов шихты в зонах печи с помощью комплексной математической модели является трудоемким процессом, требующим поддержки пользователя и корректировки на различных стадиях процесса моделирования. Для практических целей – оценки показателей распределения технологами – более целесообразным является использование расчетных зависимостей, обеспечивающих возможность определения показателей распределения компонентов инженерными методами с приемлемой для практики точностью, что позволит получить, как количественные показатели содержания отдельных компонентов в заданных зонах доменной печи, так и определить тенденции их изменения при направленном изменении параметров режима загрузки.

Анализ ранее выполненных исследований в области разработки математических моделей и методов расчета характеристик распределения показал, что значительная часть работ посвящена распределению железорудной и углеродсодержащей частей шихты в целом, без оценки распределения входящих в них компонентов [8 - 19], в том числе, работа Эйджревели А. [17], в которой анализируется влияние переменного содержания окатышей в шихте на ход доменной плавки. Результаты этих работ обобщаются в виде геометрических характеристик слоев и позволяют получить распределение рудных нагрузок по радиусу колошника доменной печи. В некоторых из них, например [18, 19], исследованы процессы выбивания кокса, его перераспределения при выгрузке железорудного материала на слой кокса и формирования смешанных слоев этих материалов на колошнике, уделяется также внимание исследованию загрузки осевых порций кокса и оптимизации их параметров.

Исследования распределения мелкого кокса, загружаемого в составе железорудных порций, можно отнести к работам по изучению распределения отдельных компонентов в слое шихты [20, 21]. Работу Мацуи И., Сато А., Ояма Т., Мацуо Т. [22] следует отметить, как содержащую весьма интересные, с точки зрения практики, результаты. На масштабных физических моделях получены результаты, показывающие

изменение содержания окатышей, загруженных в составе железорудной порции совместно с агломератом, в выходном потоке из бункера и по радиусу колошника в зависимости от расположения дозы окатышей в порции.

Следует также отметить использование метода дискретных элементов (DEM) в работе [23] для оценки сегрегации шихтовых материалов по крупности при загрузке бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) и изменения содержания отдельных фракций в потоке шихтового материала, выгружаемого из бункера. При помощи этого метода Кумаром Р., Пэтелем Ч.М., Яна А.К. [24], Чибве Д.К. [25] и рядом других исследователей к настоящему времени разработаны алгоритмы, обеспечивающие возможность определения последовательности выхода отдельных компонентов из бункера и их массового соотношения в потоке. В комплексе с математическими моделями движения шихтовых материалов по лотку БЗУ, в колошниковом пространстве и распределения их на поверхности засыпи в печи модели этого класса могут обеспечить получение характеристик распределения компонентов шихты по радиусу колошника. Содержание компонентов в выходном потоке шихтовых материалов из бункера БЗУ может быть получено при помощи математических моделей (разработанных Накано К., Исеи И., Сунахара К. [26, 27] в сотрудничестве с коллегами), основанных на разделении всего объема шихты в бункере на массивы, для которых задается определенная последовательность выхода этих массивов из бункера, многократно подтвержденная экспериментально.

Представленная работа отличается от выполненных ранее обоснованием возможности и решением задачи получения расчетных зависимостей для оценки характеристик распределения компонентов железорудной и углеродсодержащей частей шихты, которые характеризуют состав смесей, формирующихся в различных зонах колошника.

Целью работы является получение расчетных зависимостей, обеспечивающих возможность определения показателей распределения компонентов шихты в различных сечениях доменной печи.

II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Процесс формирования порций шихтовых материалов современной доменной печи, оснащенной БЗУ, сводится к реализации заданной структуры порции, которая определяет распределение масс компонентов по ее объему на конвейере или в скипах. В состав железорудных смешанных порций, как правило, входят агломерат, окатыши, а также добавки различного назначения. В настоящей работе возможность получения расчетных зависимостей для определения показателей распределения компонентов доменной шихты по радиусу колошника доменной печи показана на примере распределения окатышей, загружаемых в составе железорудной порции.

Варьирование расположения дозы окатышей в объеме железорудных смешанных порций является инструментом, при помощи которого решается ряд технологических задач, в частности, обеспечение требуемых свойств расплавов в пристеночной зоне печи для формирования самообновляющегося гарнисажного слоя, снижения интенсивности износа футеровки и предотвращения прогара фурм.

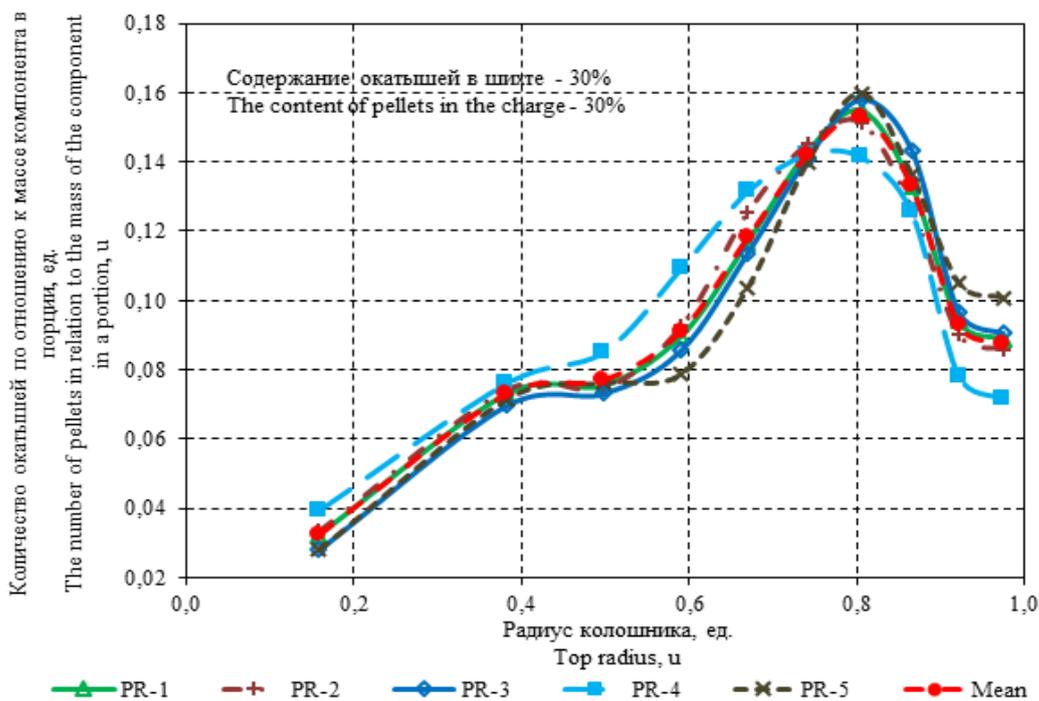
В системах загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник изменение расположения дозы окатышей в объеме порции достигается изменением величины уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер. Эта уставка в системе загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник задается в виде значения массы шихтовых материалов, которая должна быть загружена в бункер БЗУ до начала загрузки в него дозы окатышей.

С целью получения расчетных зависимостей для определения содержания окатышей в различных кольцевых зонах колошника, оценки характера распределения окатышей и возможностей управления их распределением в системах загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник выполнено математическое моделирование процесса загрузки и распределения шихтовых материалов на доменной печи объемом 5000 м³ при изменении массы дозы окатышей от 11 т до 77 т и перемещении этой дозы в объеме железорудной порции массой 110 т с шагом 10 т. Оценка характеристик распределения окатышей по радиусу колошника осуществлялась путем

определения относительного содержания этого компонента в 10 равных по площади кольцевых зонах колошника. В процессе моделирования варьировались пять различных видов программ распределения (PR - 1, PR - 2, PR - 3, PR - 4, PR - 5) масс порций рабочих подач, то есть, порций, формирующих распределение рудной нагрузки в цикле загрузки, исключая подачи специального назначения (промывочные подачи, подачи, предназначенные для активизации осевого газового потока и т. д.). Используемые при моделировании программы распределения масс порций рабочих подач отличались, в первую очередь, различным количеством угловых положений лотка БЗУ, задействованных при выгрузке порций, а также количеством шихтовых материалов, выгружаемых в этих положениях, что, в конечном итоге, выражалось в различиях распределения рудных нагрузок по радиусу колошника. Вместе с тем, используемые программы распределения порций шихты обеспечивали реализацию технологических требований к

распределению рудных нагрузок для работы доменной печи в штатном режиме.

На основе результатов математического моделирования была получена многомерная матрица значений содержания окатышей в десяти кольцевых зонах доменной печи в зависимости от вида программы распределения, среднего радиуса зоны, содержания окатышей в шихте и уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер. Анализ полученной матрицы показал, что в рабочем диапазоне значений содержания окатышей в шихте (20 – 50%) и величины уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер (20 – 50% массы порции) влияние программы распределения масс порций рабочих подач можно считать незначительным. В качестве примера на рисунке 1 показано изменение содержания окатышей в кольцевых зонах колошника при различных программах загрузки, фиксированных значениях содержания окатышей в шихте и величины уставки начала выгрузки окатышей.



PR - 1 ÷ PR - 5 – программы распределения масс порций шихтовых материалов.

Рис. 1. Распределение окатышей по радиусу колошника при различных программах загрузки (величина уставки начала выгрузки окатышей на конвейер – 30% массы железорудной порции).

PR - 1 ÷ PR - 5 – programs for distributing the masses of portions of charge materials.

Fig. 1. Distribution of pellets along the radius of the top at various loading programs (the setpoint value for the start of pellet unloading onto the conveyor is 30% of the weight of the iron ore portion).

Выявленная особенность формирования распределения компонентов смешанных железорудных порций - относительно малое влияние программы загрузки на параметры их распределения - позволила сократить число аргументов зависимостей, определяющих содержание окатышей в заданной кольцевой зоне колошника, исключив программы распределения порций без существенной потери точности расчетов, с использованием средних значений матрицы, полученных

методом математического моделирования процесса загрузки шихтовых материалов с использованием различных программ распределения масс порций рабочих подач.

Содержание окатышей в шихте и величина уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер оказывают определяющее влияние на формирование состава смеси основных железорудных материалов в конкретной кольцевой зоне колошника. Влияние этих параметров показано на рисунках 2 и 3.

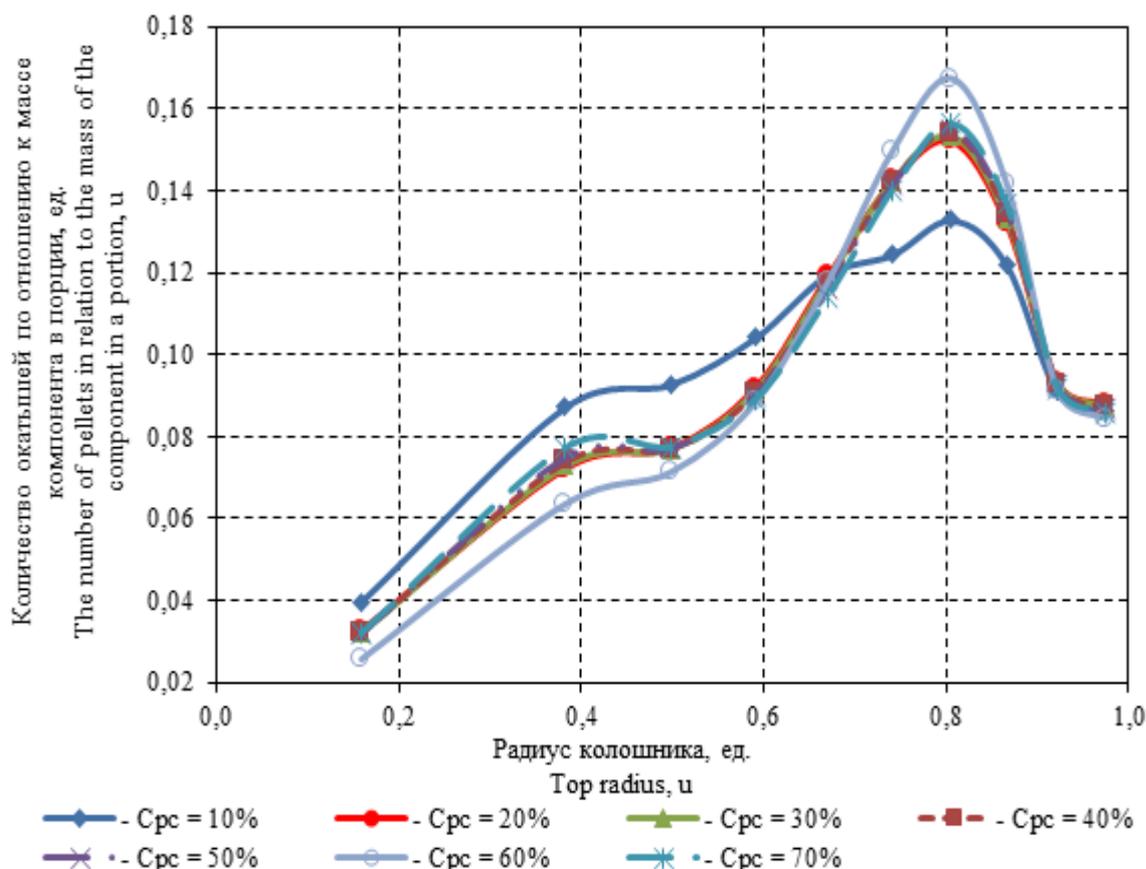


Рис. 2. Распределение окатышей по радиусу колошника в зависимости от содержания окатышей в шихте C_{pc} (величина уставки начала выгрузки окатышей на конвейер – 30% массы железорудной порции).

Fig. 2. Distribution of pellets along the radius of the top depending on the content of pellets in the charge C_{pc} (setting value for the beginning of pellet unloading onto the conveyor is 30% of the weight of the iron ore portion).

В процессе анализа матрицы значений содержания окатышей в кольцевых зонах колошника при различных параметрах формирования порций и их распределения, полученных при помощи комплексной модели процесса загрузки, было установлено, что с достаточно высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0,944), зависимость количества окатышей от

координаты средней линии рассматриваемой зоны вида $C_{pi} = f(r_i)$ может быть представлена кубической функцией

$$C_{pi} = A \cdot r_i^3 + B \cdot r_i^2 + C \cdot r + D, \quad (1)$$

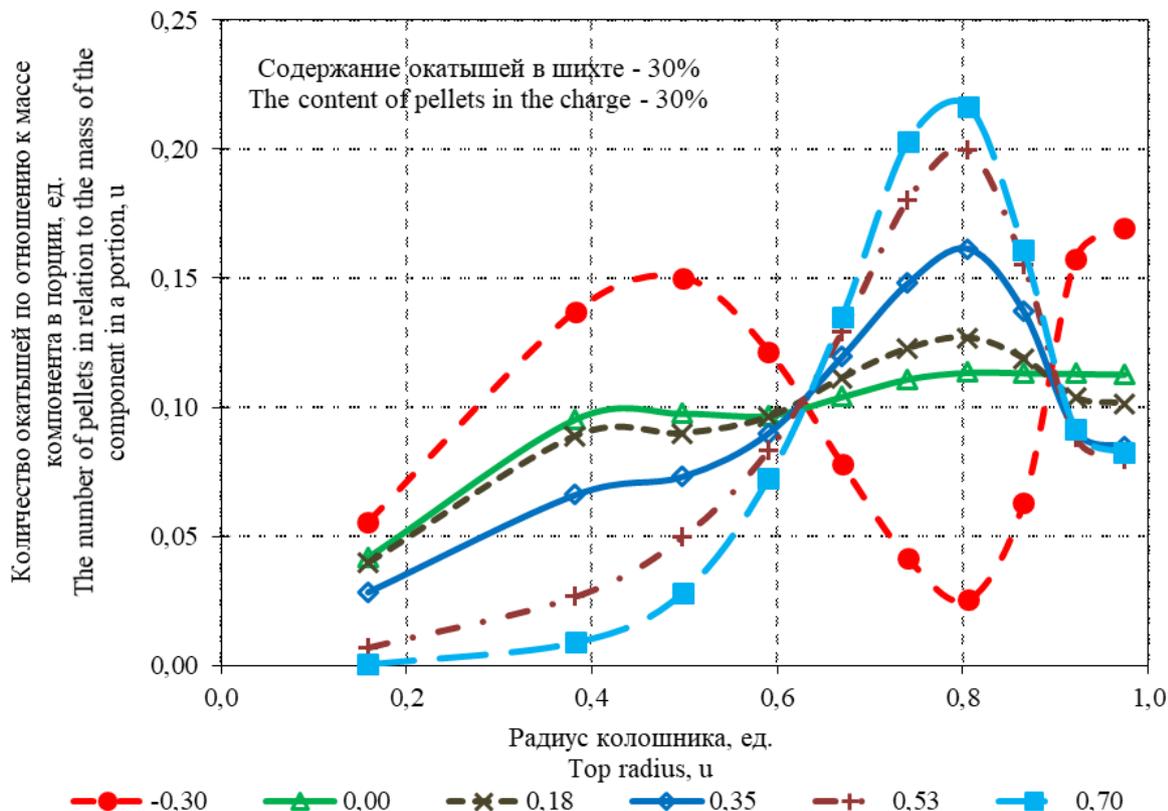
где C_{pi} – относительное (относительно массы дозы окатышей в порции) содержание окатышей в рассматриваемой точке радиуса

колошника доменной печи с конвейерной доставкой шихты на колошник, ед.;

A, B, C, D – численные коэффициенты.

При этом, очевидно, что значения коэффициентов уравнения (1) A, B, C и D

должны учитывать влияние содержания окатышей в шихте и величины уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер.



- 0.30 ÷ 0.70 – относительная величина уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер (по отношению к массе порции).

- 0.30 ÷ 0.70 – the relative value of the setting for the start of unloading the dose of pellets onto the conveyor (in relation to the mass of the portion).

Рисунок 3 – Распределение окатышей по радиусу колошника в зависимости от уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер.

Fig. 3. The distribution of pellets along the radius of the top, depending on the setting for the start of unloading the dose of pellets onto the conveyor.

Анализ значений коэффициентов A, B, C и D позволил установить их зависимость от величины уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер в виде линейной функции с коэффициентом достоверности аппроксимации не менее 0,924.

$$A_j = a_A \cdot m_{sp_j} + b_A, \quad (2)$$

$$B_j = a_B \cdot m_{sp_j} + b_B, \quad (3)$$

$$C_j = a_C \cdot m_{sp_j} + b_C, \quad (4)$$

$$D_j = a_D \cdot m_{sp_j} + b_D \quad (5)$$

где $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D, b_D$ – численные коэффициенты функций аппроксимации.

Далее, по результатам анализа значений коэффициентов $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D, b_D$ и их связи с содержанием окатышей в шихте было установлено, что эта связь с достаточно высокой степенью точности может быть выражена линейной функцией (коэффициент достоверности аппроксимации составлял не менее 0,95). Связь коэффициентов $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D$ и b_D с общим содержанием окатышей в порции может представлена в виде уравнений

$$a_A = a_{a_A} \cdot C_{pc} + b_{a_A}, \quad (6)$$

$$b_A = a_{b_A} \cdot C_{pc} + b_{b_A}, \quad (7)$$

$$a_B = a_{a_B} \cdot C_{pc} + b_{a_B}, \quad (8)$$

$$b_B = a_{b_B} \cdot C_{pc} + b_{b_B}, \quad (9)$$

$$a_c = a_{a_c} \cdot C_{pc} + b_{a_c}, \quad (10)$$

$$b_B = a_{b_c} \cdot C_{pc} + b_{b_c}, \quad (11)$$

$$a_D = a_{a_D} \cdot C_{pc} + b_{a_D}, \quad (12)$$

$$b_D = a_{b_D} \cdot C_{pc} + b_{b_D}, \quad (13)$$

где $a_{a_A}, b_{a_A}, a_{b_A}, b_{b_A}, a_{a_B}, b_{a_B}, a_{b_B}, b_{b_B}, a_{a_c}, b_{a_c}, a_{b_c}, b_{b_c}, a_{a_D}, b_{a_D}, a_{b_D}, b_{b_D}$ – коэффициенты линий аппроксимации линейной функции, описывающей изменение коэффициентов кубического уравнения для определения содержания окатышей в зонах печи в зависимости от содержания окатышей в порции.

В окончательном виде формула (1) для определения содержания окатышей в заданной кольцевой зоне колошника с учетом всех введенных коэффициентов выглядит следующим образом

$$C_{p_i} = \left[(a_{a_A} \cdot C_{pc} + b_{a_A}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_A} \cdot C_{pc} + b_{b_A}) \right] \cdot r_i^3 + \left[(a_{a_B} \cdot C_{pc} + b_{a_B}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_B} \cdot C_{pc} + b_{b_B}) \right] \cdot r_i^2 + \left[(a_{a_c} \cdot C_{pc} + b_{a_c}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_c} \cdot C_{pc} + b_{b_c}) \right] \cdot r_i + \left[(a_{a_D} \cdot C_{pc} + b_{a_D}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_D} \cdot C_{pc} + b_{b_D}) \right] \quad (14)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации распределения окатышей с помощью функции трех аргументов достаточно высок и составляет 0,919.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов определения характеристик распределения окатышей с помощью комплексной модели с результатами расчета с использованием выражения (14), показало, что погрешность определения относительного содержания окатышей в рассматриваемой кольцевой зоне колошника при помощи предложенного выражения, в среднем, составляет $\pm 0,03$ ед., при среднеквадратическом отклонении 0,01 ед. Указанный уровень погрешности позволяет

использовать упрощенные зависимости расчета показателей распределения окатышей по радиусу колошника для оценки характера их распределения и влияния на него изменений параметров формирования железорудных порций.

Аналогичные уравнения получены для оценки характеристик распределения других компонентов шихты: агломерата и добавок различного назначения. Использование полученных зависимостей дает возможность исследователям и технологам получить оценку влияния параметров режима загрузки на распределение компонентов шихты по радиусу колошника без выполнения трудоемкой процедуры математического моделирования процесса, определить состав смесей шихтовых материалов в различных зонах доменной печи, что, свою очередь, позволяет оценить состав и свойства образующихся расплавов и внести необходимые корректировки в применяемые режимы плавки для получения требуемых ее технико – экономических показателей.

IV. ВЫВОДЫ

Показано, что распределение массы конкретного компонента шихты по радиусу колошника доменной печи с БЗУ и конвейерной доставкой шихты на колошник с достаточной для практики точностью может быть описано уравнением третьей степени, включающим основные параметры формирования многокомпонентных порций – содержание компонента в шихте и величину уставки начала его выгрузки на конвейер.

Получены зависимости для определения характеристик распределения шихтовых материалов в различных зонах доменной печи, которые без трудоемкого математического моделирования обеспечивают возможность оперативной оценки параметров распределения компонентов шихты с приемлемой для практики точностью.

Предложено использовать полученные зависимости в качестве расчетного инструмента для оперативной оценки распределения компонентов шихты на колошнике, что позволит осуществлять обоснованный выбор рациональных параметров режимов загрузки многокомпонентной шихты в доменную печь с реализацией наиболее экономичных технологических режимов плавки, обеспечивающих снижение энергозатрат на

производство чугуна и его себестоимости, а также повышение энергоэффективности металлургического передела в целом.

References

- [1] Bol'shakov V.I. *Tekhnologiya vysokoeffektivnoy energosberegayushchey domennoy plavki*. [High-efficiency energy-saving blast smelting technology]. Kiev, 2007. 412 p.
- [2] Dobroskok V.A. Spetsial'nye sistemy zagruzki domennykh pechey [Special loading systems for blast furnaces]. *Chyornye metally - Steel and iron*, 2007, no. 9, pp. 13–21. (In Russian).
- [3] Bukhval'der J., Dobroskok V.A., Lonardi E., Goffin R., Tillen G., Kyoler S. Sovremennye tekhnologii zagruzki domennykh pechey [Modern blast furnace loading systems]. *Chyornye metally - Steel and iron*, 2008, no. 9, pp. 21–25. (In Russian).
- [4] Shepetovskiy E.A. Ratsional'noe formirovanie stolba shikhty v domennoy pechi [Rational formation of charge column in a blast furnace]. *Stal' – Steel*, 2003, no. 5, pp. 11–15. (In Russian).
- [5] Nikitin L.D., Dolinskiy V.A., Bugayov S.F., Mar'yasov M.F., Denisov Yu.M., Chudnova N.T., Fyodorov I.P. Formirovanie racional'noj struktury stolba shihtovykh materialov v domennoy pechi [Formation of a rational structure of a column of charged materials in a blast furnace]. *Metallurg - Metallurgist*, 2004, no.2, pp. 26–28. (In Russian).
- [6] Yaroshevskiy S.L., Nozdrachev V.A., Chebotareyov A.P., Rudenko V.A., Feshchenko S.A., Kuznetsov A.M., Padalka V.P., Hlaponin N.S., Kuzin A.V. Effektivnost' ispol'zovaniya koksa fraktsii menee 40 mm v domennoy plavke [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metallurg - Metallurgist*, 2000, no.12, pp. 32–35. (In Russian).
- [7] Litvinov L.F., Yaroshevskiy S.L., Kuznetsov A.M., Padalka V.P., Hlaponin N.S., Kuzin A.V. Effektivnost' tekhnologii domennoy plavki pri zagruzke v pech' koksovogo oreshka v smesi s zhelezorudnoy shihtoy [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metall i lit'yo Ukrainy - Metal and casting of Ukraine*, 2004, no.12, pp. 5–9. (In Russian).
- [8] Gupta P.K., Rao A. S., Sekhar V.R., Ranjan M. and Naha T.K. Burden distribution control and its optimization under high pellet operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 2010, vol. 37, pp. 235-239.
- [9] Fojtik D., Tuma J., Faruzel P. Computer modelling of burden distribution in the blast furnace equipped by a bell-less top charging system. *Ironmaking & Steelmaking*, 2021, vol. 48, pp. 1226-1238. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1952829>
- [10] Li, M.; Wei, H.; Ge, Y.; Xiao, G.; Yu, Y. A Mathematical Model Combined with Radar Data for Bell-Less Charging of a Blast Furnace. *Processes*, 2020, 8, 239. <https://doi.org/10.3390/pr8020239>
- [11] Saxen H., Helle M., Li H. (2019). Mathematical model of burden distribution in the blast furnace. In F. Kongoli, P. Assis, M.C. Gomez-Marroquin, S. Kitayama, H. Konishi, A. Murao, S. Nomura, H. Ono, H. Saxen, K. Seto, J.I. Tani Eds.), *Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS)*, 2019, vol. 8: *Usui Intl. Symp. / Advanced Sustainable Iron and Steel Making* (pp. 243-248). Montreal, Canada:
- [12] Hinnelä J., Saxén H., Pettersson F. A Modeling of the Blast Furnace Burden Distribution by Evolving Neural Networks. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, vol. 42, no. 11, pp. 2314–2323. Publication Date: April 29, 2003. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>.
- [13] Park J.I., Jung J.H., Jo M.K., Oh H.S., Han J.W. Mathematical modeling of the burden distribution in the blast furnace shaft. *Publication: Metals and Materials International*, 2011, vol. 17 (3), pp. 485-496.
- [14] Shi P.Y., Zhou P., Fu D., Zhou C.Q. Mathematical model for burden distribution in blast furnace. *Iron-making & Steelmaking*, 2016, vol. 43:1, pp. 74-81. DOI:10.1179/1743281215Y.0000000052
- [15] Chen J., Zuo H., Xue Q., Wang J. A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*, December, 2021. DOI:10.1016/j.powtec.2021.117055
- [16] Nag S., Gupta A., Paul S., Gavel D. J., B. Aich, Prediction of Heap Shape in Blast Furnace Burden Distribution, *ISIJ International*, 2014, vol. 54, pp. 1517-1520.
- [17] Agrawal A. Blast Furnace Performance Under Varying Pellet Proportion. *Trans. Indian Inst. Met.*, 2019, vol. 72, pp. 777–787. doi: 10.1007/s12666-018-1530-6.
- [18] Mitra T. *Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace*. Doctor of Technology Thesis. Thermal and Flow Engineering Laboratory Faculty of Science and Engineering Åbo Akademi University. Turku/Abo, Finland, 2016. 89 p.
- [19] Li Z., Kuang S., Liu S., Gan J., Yu A., Li Y., Mao X. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace. *Powder Technol.*, 2019, vol. 353, pp. 385–397. doi: 10.1016/j.powtec.2019.05.047.
- [20] Yu X., Shen Y. Model study of central coke charging on ironmaking blast furnace performance: Effects of charring pattern and nut coke. *Powder Technol.*, 2020, vol. 361, pp. 124–135. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.012
- [21] Kashihara Y., Iwai Y., Ishiwata N., Oyama N., Matsuno H., Horikoshi H., Yamamoto K., Kuwabara M. Development of New Charging Technique for Mixing Coke in Ore Layer at Blast Furnace with Center Feed Type Bell-less Top. *ISIJ International*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 665–672.
- [22] Matsui Y., Sato A., Oyama T., Matsuo T. All Pellets Operation in Kobe No. 3 Blast Furnace under Intensive Coal Injection. *ISIJ International*, January 2003, vol. 43 (2), pp. 166-174. DOI:10.2355/isijinternational.43.166
- [23] Mio H., Kadowaki M., Matsuzaki S., Kunitomo K. Development of particle flow simulator in the

- charging process of blast furnace by discrete element method. *Minerals Engineering*, 2012, vol. 33, pp. 27-33.
- [24] Kumar R., Patel C.M., Jana A.K., Gopireddy S.R. Prediction of hopper discharge rate using combined discrete element method and artificial neural network. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29 (11), pp. 2822-2834.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.08/002>
- [25] Chibwe D. K. *Optimized burden delivery for blast furnace operations*. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the Degree of doctor of philosophy. Faculty of Engineering and Built Environment at The University of Newcastle. Newcastle, Australia, 2019. 295 p.
- [26] Nakano K., Isei Y., Natsui T., Watanabe K., Kishino T. Technical Report Tracking Technique of Burden Materials for Blast Furnace with Bell-less Top by Using RFID. *Nippon Steel technical report*, March 2020, no. 123, pp. 83-89.
- [27] Nakano K., Sunahara K., Inada T. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International*, 2010, vol. 50, no. 7, pp. 994-999.

Сведения об авторах.



Иванча Николай Григорьевич, старший научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: ing.witc@gmail.com



Вишняков Валерий Иванович, научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: vishnyakov.v.i.0705@gmail.com



Муравьева Ирина Геннадьевна, д.т.н., старший научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: irinamuravyova@gmail.com



Щербачев Вадим Родионович, ведущий инженер отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: vadim0072vadim@gmail.com



Ермолина Екатерина Петровна, ведущий инженер отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: ketrinerm11@gmail.com

Influence of Wind Turbines on the Operating Modes of the Distribution Network

Lupu M., Zaitsev D., Tirsu M., Golub I.

Institute of Power Engineering
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The paper aim was to study the normal functioning modes of consumers power supply by the distribution network, taking into account the electricity production using wind turbines, as well as to develop recommendations that allow optimizing power consumption modes. The goal was achieved by analyzing the initial information on the network section topology, the technical characteristics of linear and transformer equipment, as well as consumption and generation profiles. The most significant result of the paper was the determination of the fact that the connection of wind turbines according to the “install and forget” principle without prior justification of both connection place and wind turbine capacity often leads to significant change in the operating characteristics and additional technical losses of active power. In this case, the main part of the losses falls on power lines. The significance of the obtained results lies in the fact that the main problems, associated with the coordination of the operating modes of distributed generation facilities and load, were identified and possible technical solutions were proposed to improve the situation. Based on the obtained results it is possible to conclude that when connecting a wind turbine to a distribution network, it is necessary to take into account both the capacity and the installation location of the equipment, which significantly change the values of the operating parameters of electrical networks. It has been shown that use of energy storage devices, as well as the network reconstruction, can make it possible to minimize active power losses and carry out balance of regimes.

Keywords: operation mode of the distribution network, active power losses, distributed generation, wind turbines, electric energy storage devices.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.06>

UDC: 621.316.13

Influența instalațiilor eoliene asupra regimului de funcționare a rețelelor electrice de distribuție

Lupu M., Zaițev D., Tîrșu M., Golub I.

Institutul de Energetică
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia regimurile normale de alimentare a consumatorilor conectați la rețeaua de distribuție, ținând cont de producerea energiei electrice de către instalațiile eoliene, precum și de a elabora recomandări care să permită optimizarea regimurilor de consum de energie. Scopul a fost atins prin analiza informațiilor inițiale privind topologia secțiunii de rețea, caracteristicile tehnice ale echipamentelor liniare și de transformare, precum și a profilurilor de consum și generație. Rezultatul cel mai semnificativ a fost stabilirea faptului, că conectarea turbinelor eoliene conform principiului „instalați și uitați” fără justificarea prealabilă a locului de conectare și puterea turbinei eoliene duce adesea la o schimbare semnificativă a caracteristicilor de funcționare și la pierderi tehnice suplimentare de putere activă. În acest caz, cea mai mare parte a pierderilor revine liniilor electrice. Importanța rezultatelor obținute ține de faptul, că au fost identificate principalele probleme asociate coordonării regimurilor de funcționare a instalațiilor de generare distribuită și sarcină, și au fost propuse posibile soluții tehnice pentru îmbunătățirea situației. Rezultatele obținute ne-au permis să concluzionăm, că la conectarea unei turbine eoliene la o rețea de distribuție, este necesar să se țină cont atât de puterea, cât și de locația de instalare a echipamentului, care modifică semnificativ valorile parametrilor de funcționare ai rețelelor electrice. Se arată, că utilizarea dispozitivelor de stocare a energiei, precum și reconstrucția rețelei, pot face posibilă reducerea la minimum a pierderilor de putere activă și efectuarea echilibrării regimului de funcționare.

Cuvinte cheie: regim de funcționare a rețelelor electrice de distribuție, pierderi de putere activă, generare distribuită, turbină eoliană, dispozitiv de stocare a energiei electrice.

Влияние ветрогенерационных установок на режимы работы распределительной сети

Лупу М.Л., Зайцев Д.А., Тыршу М.С., Голуб И.В.

Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Объектом исследования является участок распределительной сети, с подключенными к нему двумя ветроустановками (ВЭУ). Целью работы является исследование нормальных режимов

электроснабжения потребителей распределительной сети с учетом производства электроэнергии с помощью ветроустановок, а также разработка рекомендаций, позволяющих оптимизировать режимы энергопотребления. Поставленная цель достигнута за счет анализа исходной информации по топологии сетевого участка, технических характеристиках линейного и трансформаторного оборудования, а также профилях потребления и генерации. Были подготовлены базы данных, позволившие осуществить расчетные эксперименты и провести сравнительный анализ характерных режимов работы исследуемого участка распределительной сети. Наиболее существенным результатом стало установление того факта, что подключение ВЭУ по принципу «установил и забыл» без предварительного обоснования места подключения и мощности ВЭУ часто приводит к существенному изменению режимных характеристик и дополнительным техническим потерям активной мощности. При этом основная часть потерь приходится на линии электропередачи. Это объясняется тем, что уровень генерации ВЭУ обычно значительно превышает требуемую мощность для покрытия существующей нагрузки, что приводит к нарушению баланса генерации и потребления и возникновению обратного перетока в сеть высшего класса напряжения. Значимость полученных результатов состоит в том, что были определены основные проблемы, связанные с согласованием режимов работы объектов распределенной генерации и нагрузки, а также предложены возможные технические решения, позволяющие улучшить ситуацию. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что при подключении ВЭУ к распределительной сети необходимо учитывать, как мощность, так и место установки оборудования, существенно изменяющие значения режимных параметров электрических сетей. Показано, что использование накопителей энергии, а также реконструкция сети могут позволить минимизировать потери активной мощности и осуществить балансирование режима.

Ключевые слова: режим работы распределительной сети, потери активной мощности, распределенная генерация, ветроустановки, накопители электрической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительный рост внедрения объектов распределенной генерации в электрические сети, вызванный более высокими требованиями защиты окружающей среды и постепенным процессом либерализации энергетического рынка [1–5]. Многие страны начали процесс либерализации своих электроэнергетических систем, открыв доступ к передающим и распределительным сетям. Это сопровождается быстрым ростом количества относительно небольших источников распределенной генерации, основанных на возобновляемых источниках энергии. Увеличение количества подключений во многих случаях было основано на философии «установил и забыл», что приводит к необходимости преодолевать некоторые технические, экономические и нормативные трудности [6–14].

Возникающие проблемы могут быть успешно решены в контексте реализации концепции местной энергетической автономии в рамках новой инновационной модели организации отношений между местными производителями и потребителями энергии, получившей название энергетических кооперативов.

Текущее состояние развития энергетических кооперативов показывает, что большинство проектов представляют собой

местные инициативы, в которых используется распределенная генерация, основанная на использовании возобновляемых источников энергии.

Часто участники энергетического кооператива объединяются через локальную сеть (микросеть), также называемую интеллектуальной сетью, работающую изолированно от электросетей оператора энергосистемы. В то же время существование энергетического кооператива не исключает возможности эксплуатации параллельно с энергосистемой.

Энергетические кооперативы обычно представляют собой небольшие проекты, и их мощности по производству электроэнергии подключены к распределительным сетям. Стохастический характер выработки энергии на возобновляемых источниках энергии часто приводит к нарушению баланса выработки и потребления в распределительной сети, что может привести к изменению основных режимных параметров.

Подходящим решением для соблюдения баланса мощностей может быть использование электрохимических батарей в качестве накопителей избыточной электроэнергии, вырабатываемой сверх уровня потребляемой нагрузки в данный момент времени. Аккумуляция электроэнергии может способствовать

ускорению интеграции возобновляемых источников в локальную систему электроснабжения и обеспечивать ее работу в полностью автономном режиме [19–29].

В данной работе рассматриваются вопросы эксплуатации возобновляемых источников генерации, подключенных к распределительной сети (на примере фидера №2 10кВ подстанции Единец 110/35/10, принадлежащей предприятию SA RED Nord), при формулировании сценариев обеспечения местной энергетической автономии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор объекта исследования обусловлен наличием характерных проблем, возникающих при подключении распределенной генерации к распределительным сетям. В качестве примера для анализа выбран фидер №2 подстанции Единец 110/35/10кВ. Общая информация об объекте:

- количество трансформаторных подстанций – 14шт.;
- количество трансформаторов в составе трансформаторных подстанций – 26шт.;
- установленная мощность трансформаторов – 9725кВА;
- количество трансформаторов под нагрузкой – 20шт.;
- мощность трансформаторов под нагрузкой – 7625кВА;
- длина фидера – 10,866км (ВЛ – 7,685км, КЛ – 3,481км);
- питание фидера осуществляется от головной подстанции Единец 110/35/10кВ и от ветроэнергетических установок (ВЭУ) мощностью 1,2МВт каждая, присоединенных к шинам 0.4кВ трансформаторной подстанции №414.

Моделирование режимов работы фидера, выполнено с использованием специализированного программного комплекса для расчета установившихся режимов RastrWin.

В качестве исходных данных для выполнения расчетных экспериментов были использованы:

- данные по топологии сети, параметрам ЛЭП и трансформаторных подстанций, а также составе действующего оборудования;

- профиль потребления электроэнергии по каждой трансформаторной подстанции и по фидеру в целом;

- профиль выработки электроэнергии на ВЭУ.

Вся техническая информация по фидеру, была предоставлена службой режимов оператора распределительных сетей SA RED Nord [15–18].

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРНЫХ РЕЖИМОВ

Анализ режимов работы проводился за период январь–сентябрь 2021 года с учетом среднемесячных нагрузок. В качестве базовых были приняты режимы без распределенной генерации ВЭУ. В этом случае питание потребителей осуществлялось из одного источника со стороны энергосистемы. Для примера на рис.1 представлено потокораспределение в базовом режиме для сентября 2021 года.

На первом этапе сравнительный анализ режимных параметров проводился для базовых режимов и режимов с генерацией обеспеченной ВЭУ. Для примера на рис.2 представлено потокораспределение в режиме генерации ВЭУ для сентября 2021 года, т.е. питание потребителей осуществлялось из двух источников. Анализ информации, приведенной на рис.1,2 позволяет сделать вывод о существенном изменении потокораспределения на головных участках фидера при работе ВЭУ.

Результаты обработки информации, полученной в ходе исследования за 1-9 месяцы 2021 года, приведены в виде зависимостей и гистограмм для характерных параметров режима.

На рис.3 представлены зависимости, характеризующие уровень генерации ВЭУ (P_g) и обменной мощности с энергосистемой (внешний переток) при (P_{gef}) и без (P_{ef}) работы ВЭУ в течение рассматриваемого периода. Видно, что уровень генерации ВЭУ значительно превышает мощность, требуемую для покрытия существующей нагрузки фидера, что приводит к возникновению обратного перетока мощности в сеть высокого напряжения.

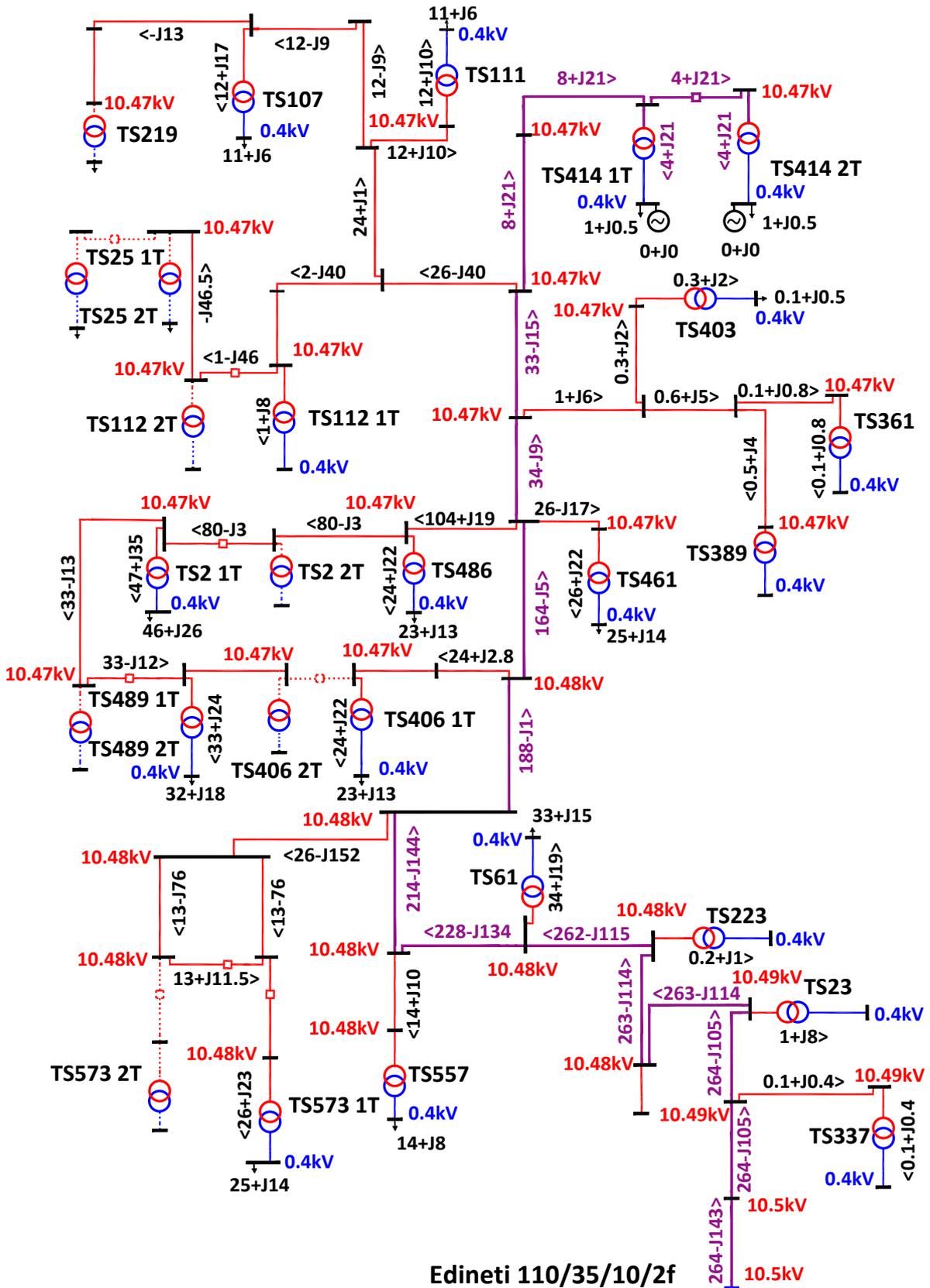


Рис.1. Параметры и потокораспределение в базовом режиме на примере сентября 2021 года.¹

¹ Appendix 1

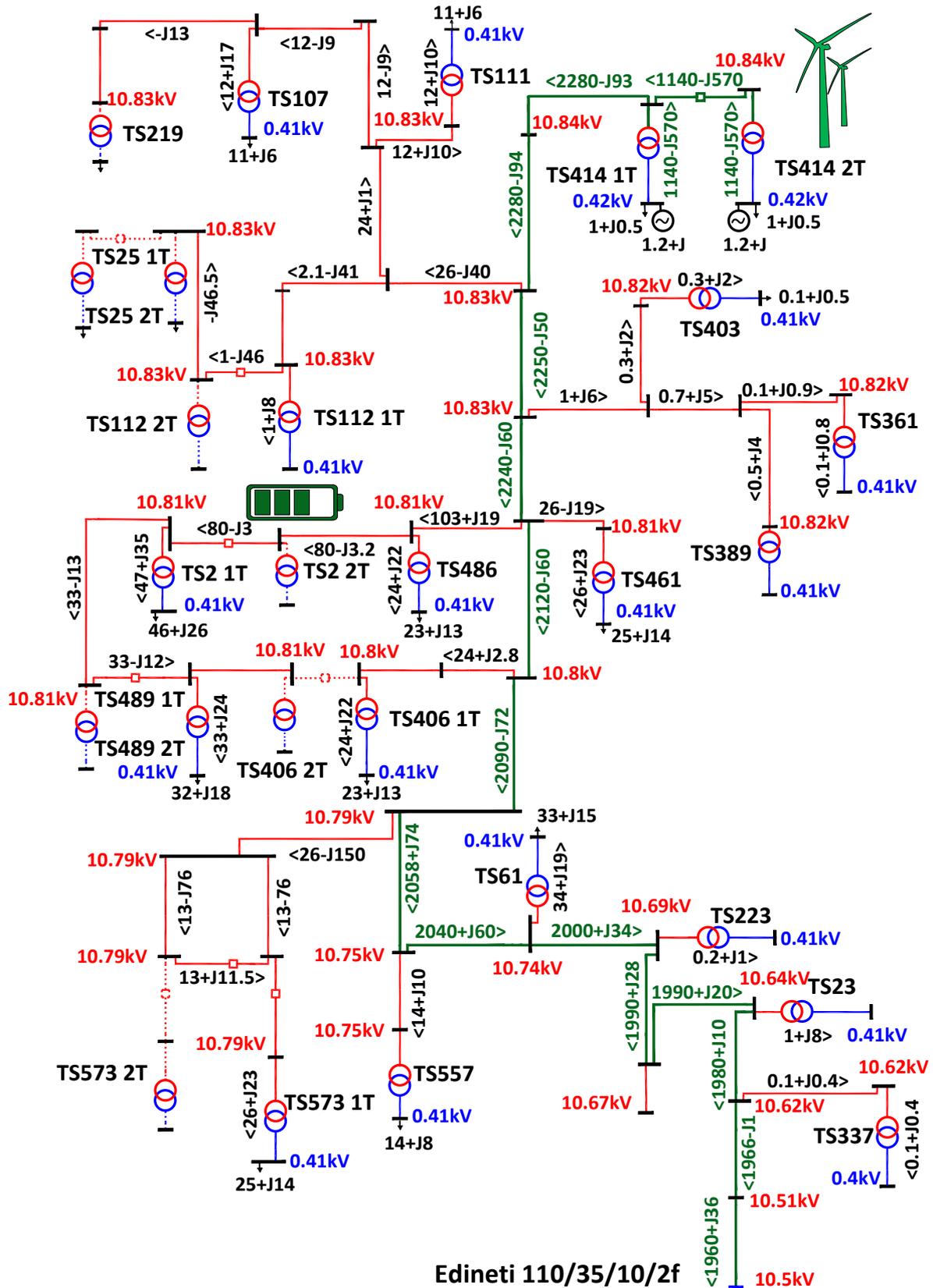


Рис.2. Параметры и потокораспределение с ВЭУ на примере сентября 2021 года².

На рис.4 представлены гистограммы иллюстрирующие соотношение величины нагрузки (P_L), полных потерь активной

мощности в базовом режиме (ΔP) и при работе ВЭУ (ΔP_g). Видно, что уровень

² Appendix 1

потерь при выработке на ВЭУ в фидере выше как в именованных единицах, так и в процентном выражении к общему потреблению и прогнозируемо увеличивается по мере повышения уровня генерации на ветроустановках.

На рис.5,6 представлены гистограммы показывающие уровень потерь активной мощности в линиях электропередачи

$(\Delta P_{pl}, \Delta P_{gpl})$ и в трансформаторах $(\Delta P_{id}, \Delta P_{tr}, \Delta P_{gr})$ за 9 месяцев 2021 года в именованных единицах и процентах от суммарного потребления. Результаты получены для базового и режима выработки электроэнергии на ВЭУ.

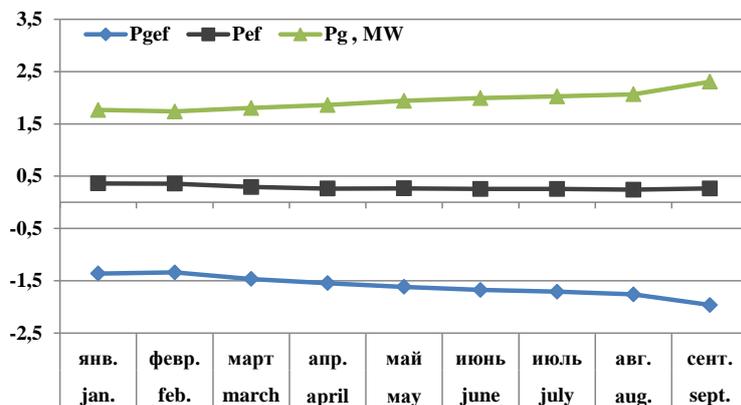


Рис.3. Уровни генерации и обменной мощности³.

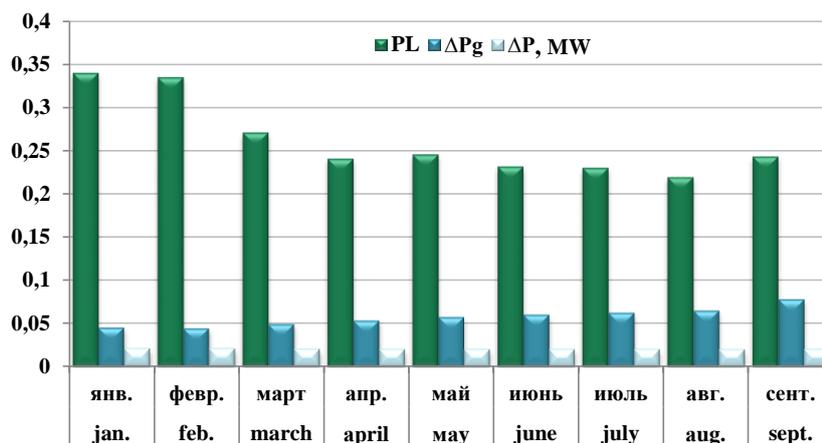


Рис.4. Активная нагрузка и потери мощности.⁴

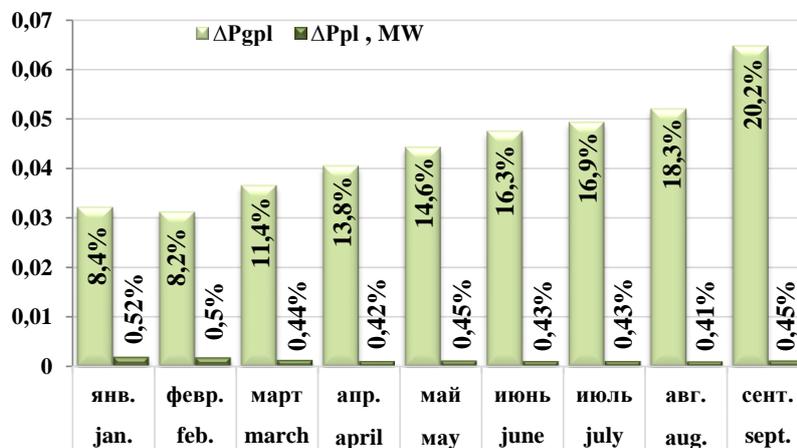


Рис.5. Потери мощности в ЛЭП.⁵

3.4.5 Appendix 1

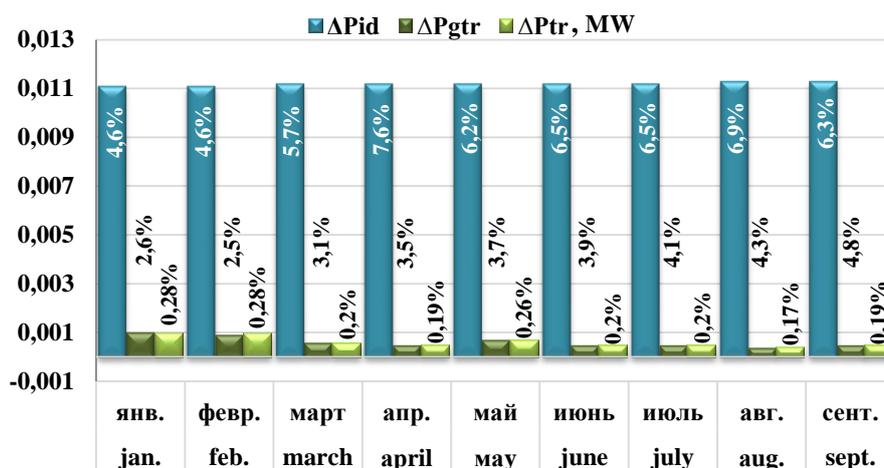


Рис.6. Потери мощности в трансформаторах.⁶

Анализ представленных характеристик позволяет сделать следующие выводы:

- Потери холостого хода трансформаторов практически не меняются.
- Нагрузочные потери в трансформаторах в именованных единицах (МВт) не меняются, при работе ВЭУ и в базовом режиме, но существенно увеличиваются в процентном отношении из за повышения уровня потребления (нагрузка + суммарные потери).
- Потери в ЛЭП без генерации ВЭУ практически стабильны из-за слабого изменения уровня нагрузки по месяцам.
- Основная составляющая потерь активной мощности ложится на ЛЭП при работе ВЭУ за счет протекания излишков мощности от ветроустановок к началу фидера.

Для оценки зависимости режимных параметров от уровня загрузки ТП на примере профиля сентября 2021 года проведены расчеты потерь как в элементах (ΔP_{pl} , ΔP_{tr}) так и в сети в целом (ΔP) с генерацией ВЭУ. Анализ проводился для двух уровней нагрузки (существующей и равной 80% от номинальной мощности ТП).

Результаты в виде гистограмм приведены на рис.7, где приняты следующие обозначения:

- 1- режим с генерацией ВЭУ;
- 2- режим с генерацией ВЭУ (нагрузка 80%);
- 3- режим без генерации ВЭУ;
- 4- режим без генерации ВЭУ (нагрузка 80%).

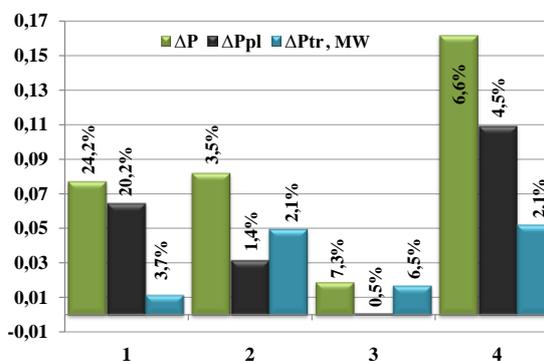


Рис.7. Структура потерь в различных режимах.⁷

Видно, что при увеличении нагрузки потери во всех элементах и в сети в целом возрастают в именованных единицах, уменьшаясь в процентном отношении. Такая картина говорит о недогруженности сетевого и трансформаторного оборудования фидера в реальных режимах.

ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Для повышения эффективности работы исследуемого участка распределительной сети можно предложить несколько путей решения:

1. Подключение ВЭУ как можно ближе к голове фидера, что позволит сохранить потокораспределение близкое к проектному.
- В данном случае, подключение ВЭУ в голове фидера не представляется возможным т.к. питающая подстанция расположена в

^{6,7} Appendix 1

черте города, что исключает размещение ветроустановок.

2. Реконструкция сети с увеличением сечения по направлению обратного перетока в случае превышения уровня генерации по отношению к потреблению.

Минусами данного решения являются значительные затраты при замене проводов в сочетании с несущественным снижением потерь активной мощности.

На рис.8 представлена гистограмма, иллюстрирующая уровни потерь в ЛЭП при различных вариантах реконструкции:

- 1- сечение провода 70мм² (существующее);
- 2- замена провода на сечение 95мм²;
- 3- замена провода на сечение 120мм².

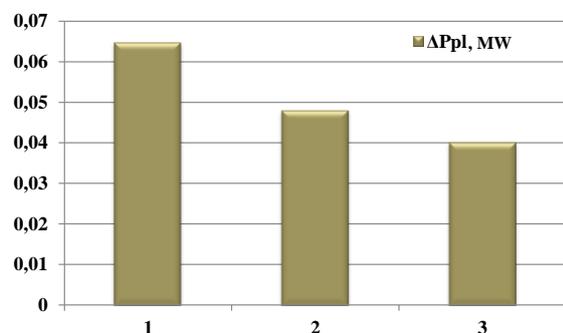


Рис.8. Потери в ЛЭП при различных вариантах реконструкции.⁸

3. Применение накопителей энергии для балансирования режимов генерации и потребления.

Для оценки эффективности применения накопителя в фидере в безветренный период для 9 месяцев 2021 года были проведены расчеты, позволившие определить мощность накопителя для обеспечения одного из двух условий:

- минимальный уровень суммарных потерь активной мощности (ΔP) в исследуемом фидере;
- нулевой переток мощности (P_{ef}) в голове фидера.

Результаты расчетов представлены в таблице 1 и гистограммах рис.9,10 на примере режима сентября 2021 года. Данные, соответствующие вышеперечисленным условиям отмечены в табл.1 серым цветом. При моделировании режимов накопитель был установлен на трансформаторной подстанции №2.

^{8,9,10,11,12} Appendix

Таблица 1⁹.
Мощности накопителя для обеспечения заданных условий¹⁰.

	ΔP	$P_{вн}$
0	0,01928	-0,26423
0,1	0,01875	-0,16368
0,2	0,01923	-0,06417
0,26	0,02	-0,0051
0,3	0,0207	0,03436
0,4	0,02314	0,13193
0,5	0,0265	0,22855
0,6	0,03079	0,32427

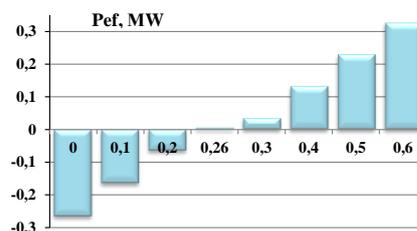


Рис.9. Внешний переток при различных мощностях накопителей.¹¹

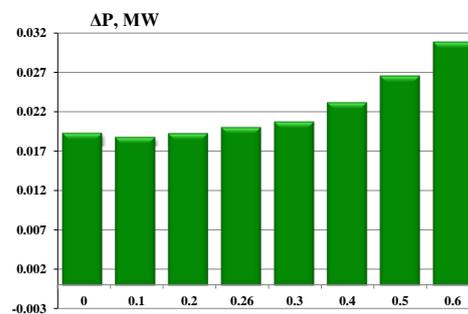


Рис.10. Потери активной мощности в фидере при различных мощностях накопителя.¹²

Динамика изменения требуемой мощности накопителей по месяцам исходя из минимума суммарных потерь (ΔP_{min}) в фидере представлена на рис.11.

Результаты позволили определить требуемую установленную мощность накопителя равную 0,14МВт. С учетом возможности секционирования батареи накопителя это позволит обеспечить минимум потерь во всех режимах.

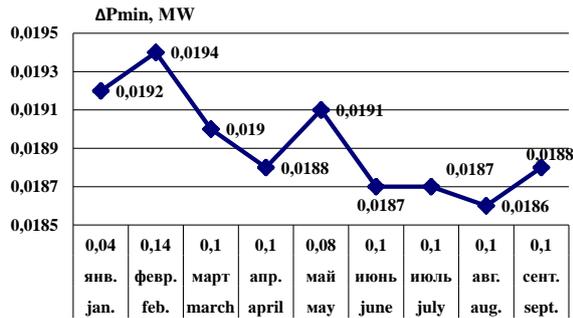


Рис.11. Мощность накопителей, обеспечивающая минимальные потери.¹³

Динамика изменения требуемой мощности накопителя по месяцам исходя из поддержания нулевого перетока в голове фидера проиллюстрирована на рис.12

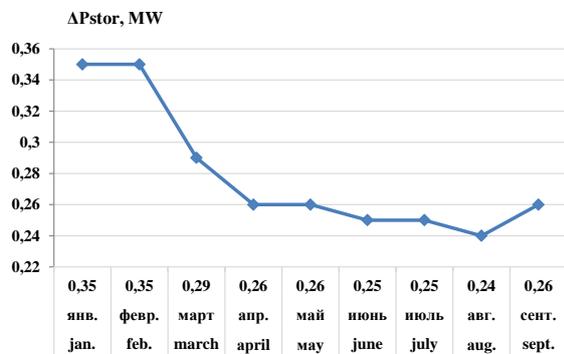


Рис.12. Мощность накопителей, обеспечивающая нулевой внешний поток.¹⁴

Результаты позволили определить требуемую, в этих условиях, установленную мощность накопителя равную 0,35МВт. С учетом возможности секционирования это позволит обеспечить нулевой переток мощности в голове фидера во всех режимах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы размещения распределенной возобновляемой генерации в распределительных сетях требуют обоснования установленной мощности устройств и мест их установки. Игнорирование этих условий может привести к значительному увеличению дополнительных технических потерь в сетевых элементах, большая часть которых приходится на линии электропередач. Проблема может быть решена за счет корректного выбора места установки ВЭУ, реконструкции участков распределительной сети, а также использования накопителей энергии с реализацией различных стратегий

управления. Показано, что наиболее предпочтительным техническим решением для рассматриваемого участка сети является использование управляемых накопителей энергии. Предложенные рекомендации позволят оптимизировать режим работы распределительной сети в контексте реализации концепции местной энергетической автономии.

Проведенное исследование опиралось на инновационные разработки в области возобновляемых источников энергии, представленных в серии публикаций Международного агентства по возобновляемым источникам энергии [29].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Результаты были получены в рамках проекта Госпрограммы с номером 20.80009.7007.18: «Эко-инновационные технические решения по снижению энергопотребления зданий и разработка опций по развитию интеллектуальных сетей с высокой интеграцией ВИЭ в Молдове».

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

- ¹Fig. 1. Parameters and flow distribution in basic mode on the example of September 2021.
- ²Fig. 2. Parameters and flow distribution with wind turbines on the example of September 2021.
- ³Fig. 3. Generation and external flow.
- ⁴Fig. 4. Active load and power losses.
- ⁵Fig. 5. Power losses in power lines.
- ⁶Fig. 6. Power losses in transformers.
- ⁷Fig. 7. Loss structure in different modes.
- ⁸Fig.8. Losses in power lines with various reconstruction options.
- ^{9,10}Table 1. Storage capacity to ensure specified conditions.
- ¹¹Fig. 9. External flow at different storage capacities
- ¹²Fig. 10. Losses of active power in the feeder at different storage capacities
- ¹³Fig. 11. Storage capacity to ensure for minimal loss
- ¹⁴Fig. 12. Storage capacity to ensure for zero external flow.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] Di Fazio A.R, Erseghe T., Ghiani E., Murrioni M., Siano P., Silvestro F. Integration of renewable energy sources, energy storage systems, and electrical vehicles with smart power distribution networks., Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing volume 4, pp. 663–671 (2013) DOI10.1007/s12652-013-0182-y.
- [2] Celli G., Giani E., Soma G.G., Pilo F. Planning of Reliable Active Distribution Systems. CIGRE

- 2012 Session, Paris, 2012. p.8
DOI:10.1109/PES.2010.5590051.
- [3] D'Adamo C. Active Distribution Networks: General Features, Present Status of Implementation and Operation Practices. *Electra*, 2009, no. 246, pp. 22–39.
- [4] Mc Donald J. Adaptive Intelligent Power Systems: Active Distribution Networks. *Energy Policy*, 2008, no. 36, pp. 4346–4351. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.038.
- [5] Ippolito M., Telaretti E., Zizzo G., Graditi G. A New Device for The Control and the Connection to the Grid of Combined RES-Based Generators and Electric Storage Systems. *Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2013 International Conference on: IEEE, 2013, pp.262–627. DOI:10.1109/ICCEP.2013.6586999.
- [6] Ahmed S. A. Awad; Dave Turcotte; Tarek H. M. El-Fouly. Impact Assessment and Mitigation Techniques for High Penetration Levels of Renewable Energy Sources in Distribution Networks: Voltage-Control Perspective. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* pp.1–9 Date of Publication: 05 April 2021 DOI:10.35833/MPCE.2020.000177.
- [7] Abbas Rabiee Seyed, Masoud Mohseni-Bonab., Maximizing hosting capacity of renewable energy sources in distribution networks: A multi-objective and scenario-based approach. *Energy* Volume 120, 1 February 2017, pp. 417-430 DOI:10.1016/j.energy.2016.11.095.
- [8] Parastoo Nezamabadi; G.B. Gharehpetian., Electrical energy management of virtual power plants in distribution networks with renewable energy resources and energy storage systems. Published in: 16th Electrical Power Distribution Conference Date of Conference: 19-20 April 2011 Conference Location: Bandar Abbas, Iran ISBN:978-1-4577-0666-0.
- [9] Pavlos S. Georgilakis; Nikos D. Hatziargyriou., Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research. Published in: *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: 28, Issue: 3, Aug. 2013) Page(s): 3420-3428. Date of Publication: 23 January 2013. DOI:10.1109/TPWRS.2012.2237043.
- [10] N.S. Rau; Yih-Heui Wan., Optimum location of resources in distributed planning. *IEEE Transactions on Power Systems* (Volume: 9, Issue: 4, Nov. 1994) Page(s): 2014–2020 DOI:10.1109/59.331463.
- [11] Antonio Colmenar-Santos Cipriano Reino-Rio David Borge-Diez Eduardo Collado-Fernández. Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario of DG units embedded in the new distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 59, June 2016, Pages 1130-1148
- [12] Vinogradov A. V., Sejfullin A. Yu., Analiz koncepcij postroeniya sistem elektrosnabzheniya sel'skih potrebitelej, soderzhashchih neskol'ko istochnikov elektricheskoy energii. [Analysis of concepts of construction of power supply systems for rural consumers containing several sources of electric energy]. *Vestnik NGIEI 2020 №2 (105)* pp.32-43 (In Russian).
- [13] Gallyamova L. Kh. Analiz problem, vznikayushchikh pri podklyuchenii ob'ektov maloy generatsii k raspredelitel'noy seti. [Analysis of problems arising when connecting small generation facilities to the distribution network]. *Konferentsiya Dispetcherizatsiya i upravlenie v elektroenergetike, Kazan'*, 28–30 oktyabrya 2015 goda, pp: 69-74(In Russian).
- [14] Savvateev A. Perspektivy i problemy razvitiya raspredelennoj generacii v elektricheskikh setyah. [Prospects and problems of the development of distributed generation in electric networks]. *Conference «International Scientific review of the problems and prospects of modern science and education. Boston*, 22–23 noyabrya 2018 goda pp. 36-40. (In Russian).
- [15] SA „Rețelele Electrice de Distribuție Nord”. *Indicatorii tehnico-economice privind activitatea operatorului rețelei de distribuție pentru anii 2013-2020*. [Accessed 17.10.2020]. Available: <https://rednord.md/index.php/ro/indicatorii-tehnico-economice>.
- [16] SA „Rețelele Electrice de Distribuție Nord”. *Raportul conducerii SA „RED Nord” pentru anul 2019*. [Accessed 17.10.2020] Available: <https://rednord.md/index.php/ro/rapoarte-anuale-privind-activitatea-sa-red-nord>.
- [17] Biroul Național de Statistică. *Populația stabilă pe medii, Anuarul statistic al Republicii Moldova 2019*. [Accessed 21.10.2020] Available: <https://statistica.gov.md/pageview.php?l=ro&idc=263&id=2193>
- [18] Biroul Național de Statistică. *Principalele rezultate ale recensământului populației și al locuințelor 2014*. [Accessed 21.10.2020]. Available: <https://statistica.gov.md/newsview.php?l=ro&idc=168&id=5583>
- [19] Lezhnyuk P.; V. Komar; O. Buslavets. Impact of renewable sources of energy on the level of active power losses in distribution networks. 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) Kyiv, Ukraine 7-11 June 2016 DOI:10.1109/IEPS.2016.7521856.
- [20] Celli G.; S. Mocci; F. Pilo; M. Lodo. Optimal integration of energy storage in distribution networks. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 28 June-2 July 2009 DOI:10.1109/PTC.2009.5282268.
- [21] Divya, K. Battery energy storage technology for power systems – An overview. *Electric Power*

- Systems Research. – 2009. – No. 79. – P. 511–520. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.09.017.
- [22] Gusev YU.P. Vliyaniye nakopitelej elektroenergii na propusknyuyu sposobnost' raspredelitel'nyh setej napryazheniem 6–10 kV. [Influence of electric energy storage devices on the capacity of distribution networks with a voltage of 6–10 kV]. Elektrichestvo. – 2018. – № 1. – S. 13–18 (In Russian).
- [23] Raubal' E.V., Rashevskaya M.A., Gamazin S.I., Loginova S.V. Perspektivy primeneniya nakopitelej elektroenergii dlya setej elektrosnabzheniya 0,4 kV. [Prospects for the use of energy storage devices for power supply networks of 0.4 kV]. Vestnik MEI. – 2013. – № 3. – S. 55–57 (In Russian).
- [24] Zhang Y., K. Meng, F. Luo et al. Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration. IET Renewable Power Generation. – 2016. No.10 (8). pp.1105–1113. DOI:10.1049/iet-rpg.2015.0542.
- [25] Xiao J., Z. Zhang, L. Bai, H. Liang. Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation. Generation Transmission & Distribution IET. – 2016. – No. 3 (10). – pp. 601–607. DOI:10.1049/iet-gtd.2015.0130.
- [26] Sedghi M., A. Ahmadian, M. Aliakbar-Golkar. Optimal Storage Planning in Active Distribution Network Considering Uncertainty of Wind Power Distributed Generation. IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – No. 1 (31). – pp.304–316. DOI:10.1109/tpwrs.2015.2404533.
- [27] Qing Z., Y. Nanhua, Z. Xiaoping et al. Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network. IEEE PES ISGT Europe 2013. pp.1–5. DOI:10.1109/isgteurope.2013.6695235.
- [28] Gusev Y.P., Soobbotin P.V. Razrabotka usovershenstvovannoj metodiki vybora parametrov i mest razmeshcheniya sistem nakopleniya elektroenergii v raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah. [Novel method for sizing and placement of energy storage systems in distribution grids]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2019, vol. 19, no.2, pp. 48–61 DOI:10.14529/power190206 (In Russian).
- [29] The International Renewable Energy Agency (IRENA). *Innovation landscape for a renewable-powered future*. [online]. February 2019. [Accessed 12.10.2020]. ISBN: 978-92-9260-111-9. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future>.

Сведения об авторах.



Лупу Михаил Леонидович,
Институт Энергетики
Молдовы, Заведующий
лабораторией. Область
научных интересов связана с
исследованиями в области
возобновляемых источников
энергии и
энергоэффективности.
mihu.lupu@gmail.com



**Зайцев Дмитрий
Александрович**, Институт
Энергетики, кандидат
технических наук. Научные
интересы лежат в области
исследования режимов
энергосистем, содержащих
гибкие межсистемные связи.
dmitrii.zaitsev@energetca.md



**Тыршу Михаил
Степанович**
Институт Энергетики,
кандидат технических наук.
Научные интересы связаны с
диагностикой
высоковольтного
оборудования и силовой
электроникой.
tirsu.mihai@gmail.com



**Голуб Ирина
Владимировна**, Институт
Энергетики, кандидат
технических наук. Область
научных интересов: режимы
энергосистем, управляемые
линии электропередачи
переменного тока.
irina.golub@mail.ru

Automatic Control of the Hybrid Heat Pump for Heating of Multi-Storey Buildings

Șit M.L., Juravliov A.A., Timchenko D.V.

Institute of Power Engineering

Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The work is devoted to control systems for hybrid heat pumps using the heat of return network water and outside air, designed to operate in district heating systems based on CHPP. The aim of the research is to develop control systems for heat pump operating on qualitative, quantitative and quantitative-qualitative heat schedules. The set goal is achieved by introducing two controlled heat exchangers: one of "refrigerant-water" type, installed after the evaporator and "refrigerant-air" type, installed after the gas cooler. The most important results are the hydraulic scheme of the heat pump, the control system scheme of gas superheater installed after the evaporator and gas supercooler installed after the gas cooler. The significance of the obtained results consists in obtaining a technical solution, which ensures the operation of the heat pump at different heating schedules. Equations of heat pump apparatuses have been obtained, in which the influence of flow rate and temperature of the working body on the heat pump operating mode is emphasized. The obtained heat balance equations allowed obtaining structures of automatic control systems for heat exchange apparatuses, compressors and controlling valves of the hybrid heat pump. The developed scheme of the heat pump air duct allowed using a minimum of heat of return network water in the heat pump. It is established that the scheme of this automatic control system should include a functional converter linking the temperature of the outside air and the coordinates of the working body state at the outlet of the gas subcooler.

Keywords: carbon dioxide heat pump, district heating, automatic control.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.07>

UDC: 697.34; 621.577.42

Controlul automat al unei pompe de căldură hibride pentru încălzirea clădirilor cu mai multe etaje

Șit M.L., Juravleov A.A., Timcenco D.V.

Institutul de Energetică

Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Lucrarea este dedicată sistemelor de comandă pentru pompele de căldură hibride care utilizează căldura apei de încălzire de retur și a aerului exterior, concepute pentru a funcționa în sistemele de încălzire urbană bazate pe CET. Scopul cercetării este de a dezvolta sisteme de comandă ale pompelor de căldură care funcționează pe baza unor legi de reglare a regimului termic calitative, cantitative și cantitative-calitative. Obiectivul stabilit este atins prin introducerea a două schimbătoare de căldură comandate: unul de tip "apă-agent frigorific", instalat după evaporator și celălalt de tip "aer-agent frigorific", instalat după răcitorul de gaz. Cele mai importante rezultate sunt schema hidraulică a pompei de căldură, sistemul de control al supraîncălzitorului de gaz după evaporator și al supraîncălzitorului de gaz după răcitorul de gaz. Semnificația rezultatelor obținute constă în obținerea unei soluții tehnice care asigură funcționarea pompei de căldură la diferite programe de încălzire. S-au obținut ecuații ale aparatelor pompei de căldură, în care se accentuează influența debitului și a temperaturii corpului de lucru asupra unui mod de funcționare a pompei de căldură. Ecuațiile de echilibru termic obținute au permis elaborarea structurilor sistemelor de reglare automată ale aparatelor de schimb de căldură, ale compresoarelor și ale supapelor de reglare a pompei de căldură hibride. Schema dezvoltată pentru conducta de aer a pompei de căldură a permis utilizarea unui minim de căldură din apa de retur a rețelei de termoficare în pompa de căldură.

Cuvinte-cheie: pompa de căldură cu dioxid de carbon, încălzire, sistem de comandă al pompei de căldură.

Автоматическое управление гибридным тепловым насосом для отопления многоэтажных зданий

Шит М.Л., Журавлев А.А., Тимченко Д.В.

Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Работа посвящена системам управления гибридными тепловыми насосами, использующими теплоту обратной сетевой воды и наружного воздуха, предназначенными для работы в системах централизованного теплоснабжения на базе ТЭЦ. Целью исследования является разработка систем управления тепловым насосом, работающего по качественному, количественному и количественно-

качественному тепловых графикам. Поставленная цель достигается за счет введения двух управляемых теплообменников: одного типа «вода-хладагент», установленного после испарителя, и «воздух - хладагент», установленного после газоохладителя. Наиболее существенными результатами являются гидравлическая схема теплового насоса, схема системы управления перегревателем газа после испарителя и схема системы управления переохладителем газа после газоохладителя. Значимость полученных результатов состоит в получении технического решения, которое обеспечивает работу теплового насоса при различных отопительных графиках. Получены уравнения аппаратов теплового насоса, в которых акцентировано влияние расхода и температуры рабочего тела на режим работы теплового насоса. Полученные уравнения теплового баланса позволили разработать структуры систем автоматического регулирования теплообменными аппаратами, компрессорами и регулирующими клапанами гибридного теплового насоса. Разработанная схема воздушного тракта теплового насоса позволяет использовать минимум теплоты обратной сетевой воды в тепловом насосе. Установлено, что в схему этой САР должен быть включен функциональный преобразователь, связывающий температуру наружного воздуха и координаты состояния рабочего тела на выходе переохладителя газа. Разработана структурная схема регулирования режима теплового насоса посредством включения после газоохладителя и первичного контура внутреннего теплообменника, так называемого, балансирующего теплообменника. Режим работы этого теплообменника выбирается из условия обеспечения режима работы регулирующего клапана теплового насоса только на однофазной среде. Разработана структурная схема системы автоматического регулирования значения величины перепада энтальпий на этом теплообменнике.

Ключевые слова: тепловой насос на диоксиде углерода, отопление, система управления тепловым насосом, термодинамический цикл.

Условные обозначения

Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование
\dot{m}_K	Массовая производительность компрессора, кг/с	V_K	Объем вытеснения (перемещения) компрессора, м ³
n_K	Скорость вращения компрессора, об/с	γ_K	Удельный объем пара на входе в компрессор, м ³ /кг
η_K	Объемная эффективность компрессора	c_p	Удельная теплоемкость трубки
ρ	Плотность материала трубки	x_O	Качество парожидкостной смеси на входе в испаритель
\bar{q}_l	Коэффициент теплоотдачи от двухфазной смеси к стенке трубки	m_{in}	Массовый расход хладагента на входе в испаритель
$\bar{\gamma}$	Среднее паросодержание	h_g	Удельная энтальпия насыщенной газовой фазы
h_l	Удельная энтальпия насыщенной жидкой фазы	k	Показатель изоэнтропы
v_i	Удельный объем газа в точке i	t_a	Температура воздуха внутри отапливаемых помещений
$t_C(t_{ext})$	Температура рабочего тела на выходе компрессора в зависимости от температуры наружного воздуха	f	Частота вращения ротора привода компрессора
*	Значок, определяющий базовые условия	ρ_S	Плотность газа на входе в компрессор
f_f	Массовая доля жидкости в двухфазном потоке	f_g	Массовая доля газа в двухфазном потоке
Δp_f	Падение давления жидкой фазы, МПа	Δp_g	Падение давления газовой фазы, МПа
Υ	Коэффициент расширения	γ_g	Массовая плотность газовой фазы на входе в вентиль, кг/м ³
γ_f	Массовая плотность жидкой фазы на входе в вентиль, кг/м ³	k	Отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме
x_T	Коэффициент перепада давления (данное значение указывается изготовителем клапана в брошюре о продукте).	F_P	Коэффициент геометрии трубопровода $F_P = 1$, когда условный проход клапана равен условному проходу трубы.

m_h	Массовый расход хладагента	m_a	Массовый расход воздуха
T_{E_OUT}	Температура газа на выходе из испарителя	$T_{A_IN_EV}$	Температура воздуха на входе в испаритель
p_E	Давление хладагента в испарителе	T_E	Температура хладагента в испарителе

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы управления тепловыми насосами для отопления зданий использующих воздух в качестве источника низкопотенциальной теплоты (НПТ), проблемы управления комбинированными тепловыми насосами, использующими теплоту воздуха и теплоту солнечных коллекторов и другие, исследовались в [1-4]. В нашей статье рассматриваются гибридные тепловые насосы, использующие НПТ обратной сетевой воды системы теплоснабжения и окружающего воздуха (публикации авторов в данном журнала за 2020 год).

Цель исследований, проводимых в данной работе: разработка схемных технических решений систем управления гибридными тепловыми насосами (ГТН), предназначенными для работы при трех законах управления тепловым режимом зданий: качественных, количественных и качественно-количественных.

Поставленную цель планируется достичь за счет разработки математического описания теплового насоса (ТН), предназначенного для реализации поставленных решений, теоретического анализа структур САУ, моделирования этих структур, их анализа.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В математическом описании теплового насоса, предназначенном для отопления жилых зданий, используются зависимости температуры прямой воды, расхода и температуры прямой воды, называемые температурными графиками [10].

К ГТН предъявляются требования реализации зависимости между температурой хладагента на входе в газоохладитель, расходом хладагента, температурой наружного воздуха и температурой ОСВ. Это требование определяет COP теплового насоса.

$$t_C(t_{ext}) = t_H + t_{01}. \quad (1)$$

$$t_{01} = f(t_a, \varphi(\vec{t}_s)) \quad (2)$$

$\varphi(\vec{t}_s)$ - функция от вектора текущих и расчетных температур сетевой воды [10].

t_H - разность температур между температурой хладагента на выходе компрессора и температурой воды на входе на входе в отопительные приборы. Уравнения (1), (2) определяют температуру воды на входе в отопительные приборы.

Определим уравнение зависимости давления в испарителе в зависимости от давления и температуры рабочего тела на выходе из компрессора. Для этого запишем уравнение изоэнтропы, которая описывает процесс работы компрессора. Уравнение изоэнтропы имеет вид [9]:

$$\frac{p_C}{p_E} = \frac{v_E^k}{v_C^k}, \quad (3)$$

где v_C, v_E , значения удельных объемов рабочего тела на выходе и входе в компрессор, определяются уравнениями состояния рабочего тела теплового насоса. Температура рабочего тела на выходе из компрессора определена из уравнения (1), а температура рабочего тела на входе в компрессор определяется из уравнения (3) и уравнений состояния рабочего тела ТН при давлении p_E и температуре T_E . Давление p_E определяется из условий получения максимального COP ТН и из ограничений на условия функционирования компрессора.

На рис.1 приведена схема подключения здания, снабженного тепловым насосом через теплообменник «вода-воздух», обозначенным на рис.1 поз.4, и установленным в обратном трубопроводе сети теплоснабжения. Наружный воздух подогревается в теплообменнике поз.4, рис.1 и поступает на испаритель теплового насоса НР. В данной схеме теплообменник HEX1 выступает в качестве звена, регулирующего температуру хладагента, поступающего на вход регулирующего клапана теплового насоса, RVP –выполняет роль узла, суммирующего теплоту наружного воздуха и теплоту,

отбираемую от обратной сетевой воды. Подогретый в HEX1 и RVP поступает на испаритель EV теплового насоса. Пусть наружный воздух имеет температуру 0°C, и воздух, подогретый в теплообменнике «вода-воздух», поз.4, рис.2. имеет температуру 20°C. Тогда этот подогретый воздух вызывает испарение CO2 в испарителе, поз.7, при 15°C.

На рис.2 цифрами черного цвета обозначены точки на H-p диаграмме. T.4 – температуру хладагента после переохладителя газа, поз. 4, т.8. определяет режим работы внутреннего теплообменника, поз.2.

Наружный воздух поступает на рекуператор RC, в котором он подогревается воздухом, выходящим из воздушной системы ТН. Подогретый воздух поступает на переохладитель хладагента после газоохладителя, в котором регулируется температура хладагента на выходе этого аппарата. Регулирование производится изменением расхода воздуха, поступающего на этот теплообменник. После переохладителя HEX1 воздух поступает на теплообменник HEX3, в котором он подогревается для подачи на испаритель теплового насоса EV. После испарителя воздух поступает на рекуператор RC. Регулирование режима работы испарителя осуществляется с использованием байпаса (рис.1).

Рассмотрим модели компонентов ТН с позиций того факта, что ТН должен передавать переменную тепловую мощность, и также того факта, что расход и температура на входе ГО переменны.

МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА

Регулирующий клапан при работе на однофазном потоке описывается следующим уравнением [13]:

$$\dot{m}_{EEV} = C_V A_{EEV} \sqrt{\rho_H \cdot \Delta p_{EEV}} \quad (4)$$

$$C_V = 0.02005 \cdot \sqrt{\rho_H} + 0.634 \cdot v_H. \quad (5)$$

При работе на двухфазном потоке [15]

$$C_V = \frac{m_{EEV}}{8.64 \cdot F_P} \sqrt{\frac{f_f}{\Delta p_f \gamma_f} + \frac{f_g}{\Delta p_g \cdot \gamma_g \cdot Y^2}}. \quad (6)$$

$$Y = 1 - x/3F_K x_T, \quad (7)$$

$$F_K = k/1.4 \quad (8)$$

Из рассмотрения уравнений (4-6) становится очевидным, что при проектировании теплового насоса следует исключать работу регулирующего клапана в области двухфазного состояния рабочего тела. Моделям регулирующихся клапанов также посвящены работы [16-19] и многие другие.

МОДЕЛЬ КОМПРЕССОРА

Компрессор и газоохладитель должны удовлетворять уравнению массового баланса хладагента, а также балансу энергии в испарителе. Уравнения статики компрессора в зависимости от изменения частоты питания инвертора имеют вид [13]

$$\dot{m}_K = k_m \cdot V_K^* \cdot \rho_S \cdot \eta_K / \gamma_K \quad (7)$$

Величина η_K определяется типом компрессора и зависит от отношения давлений нагнетания и всасывания.

Так в [13] для k_m предлагается формула

$$k_m = c_1 + c_2 (f/f^*) + c_2 (f/f^*)^2 \quad (8)$$

Когда изменяется расход хладагента, то потери давления увеличиваются и коэффициент дросселирования η_K уменьшается по отношению к увеличению скорости вращения компрессора [13]. Различным моделям компрессоров посвящены также работы [20-22] и многие другие.

Очевидно, что, изменение производительности компрессора влияет на изменение давления на выходе компрессора, и контур регулирования производительности компрессора должен быть связан с контуром регулирования перепада давлений между входом и выходом компрессора.

МОДЕЛЬ ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ

Уравнения газоохладителя при переменном расходе и при переменной температуре хладагента [14,23]:

- со стороны хладагента (многозонная модель)

$$Q = \sum_{j=1}^N m_h (h_{j,in} - h_{j,out}) = \dots \sum_{j=1}^N \alpha_{h,j} F_{h,j} (t_{h,j} - t_{w,j}) \quad (9)$$

- со стороны воды (нагрузки)

$$Q_a = m_a (h_{a,in} - h_{a,out}) = \alpha_a F_a (t_{a,out} - t_{a,in}) \quad (10)$$

- уравнение баланса энергии

$$Q_r = Q_a. \quad (11)$$

Уравнения статики испарителя при переменном расходе и температуре испарения

МОДЕЛЬ ИСПАРИТЕЛЯ

$$G_{RG} \cdot (h_{OUT} - h_{IN}) = G_A \cdot c_A (t_{IN} - t_{OUT}) \quad (12)$$

Из рассмотрения уравнения статики очевидно, что для регулирования режима работы испарителя при небольших отклонениях от установившегося режима необходимо поддерживать постоянным соотношение расходов теплоносителей.

При значительных отклонениях мощности испарителя от заданной и при постоянных температурах на краях испарителя становится необходимым регулировать также и площадь поверхности теплообмена испарителя в соответствии с уравнением

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (13)$$

Такая ситуация возникает, когда при повышении мощности испарителя (при отоплении в зимнее время необходимо максимизировать COP).

В качестве базовой принята динамическая модель испарителя, приведенная в [5,6]. Нами выбран испаритель вертикального типа, где поток хладагента рассматривается как одномерный и передача теплоты вдоль оси потока пренебрежимо мала. Динамика изменения уровня хладагента описывается уравнением

$$(c_p \rho A)_e \frac{dT_W}{dt} = \pi D_o \alpha_o (T_A - T_W) - \dots \dots \pi D_i \alpha_i (T_W - T_E) \quad (14)$$

где: $h_{1g} = h_g - h_l$; тепловой поток на единицу длины трубки испарителя.

Можно рассматривать τ , в качестве времени, необходимого для испарения жидкости в двухфазной области. Входной

массовый расход газовой фракции на входе в испаритель будет равен $m_{in} x_0$, а массовый расход газовой фракции на выходе будет равен m_{out} – в случае перегрева газа.

Расход газа, полученного из жидкой фазы в процессе ее испарения в двухфазной области, будет равен q/h_{1g} . Поэтому, при допущении, что объем жидкой фазы намного меньше объема газовой фазы, получим уравнение баланса газовой фазы в испарителе:

$$\frac{dM_V}{dt} = V \frac{d\rho_g(T_e)}{dT_e} \frac{dT_e}{dt} = m_{in} x_0 + \frac{q}{h_{1g}} - m_{out}, \quad (15)$$

В уравнении (3) предполагается, что объем части испарителя, занимаемой паром, намного больше, чем объем жидкости, где

$$k = \frac{d\rho_g(T_e)}{dT_e}. \quad (16)$$

Авторами [5] показано, что уравнение (3) может быть переписано в виде (4):

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{\pi D_i \alpha_i l (T_w - T_e) + \frac{x_0}{k} \dot{m}_{in} - \frac{1}{k} m_{out}}{k h_{1g}}, \quad (17)$$

Из вышеизложенного следует, что в САУ ТН необходимо ввести регулируемый электропривод компрессора, регулируемый перегреватель газа после испарителя, регулируемый расход наружного воздуха переохладитель хладагента после газоохладителя, регулируемый привод вентилятора обдува теплообменника в трубопроводе обратной сетевой воды.

Расход воздуха, подаваемого на испаритель G_{A_EV} , вычисляется с использованием следующей формулы:

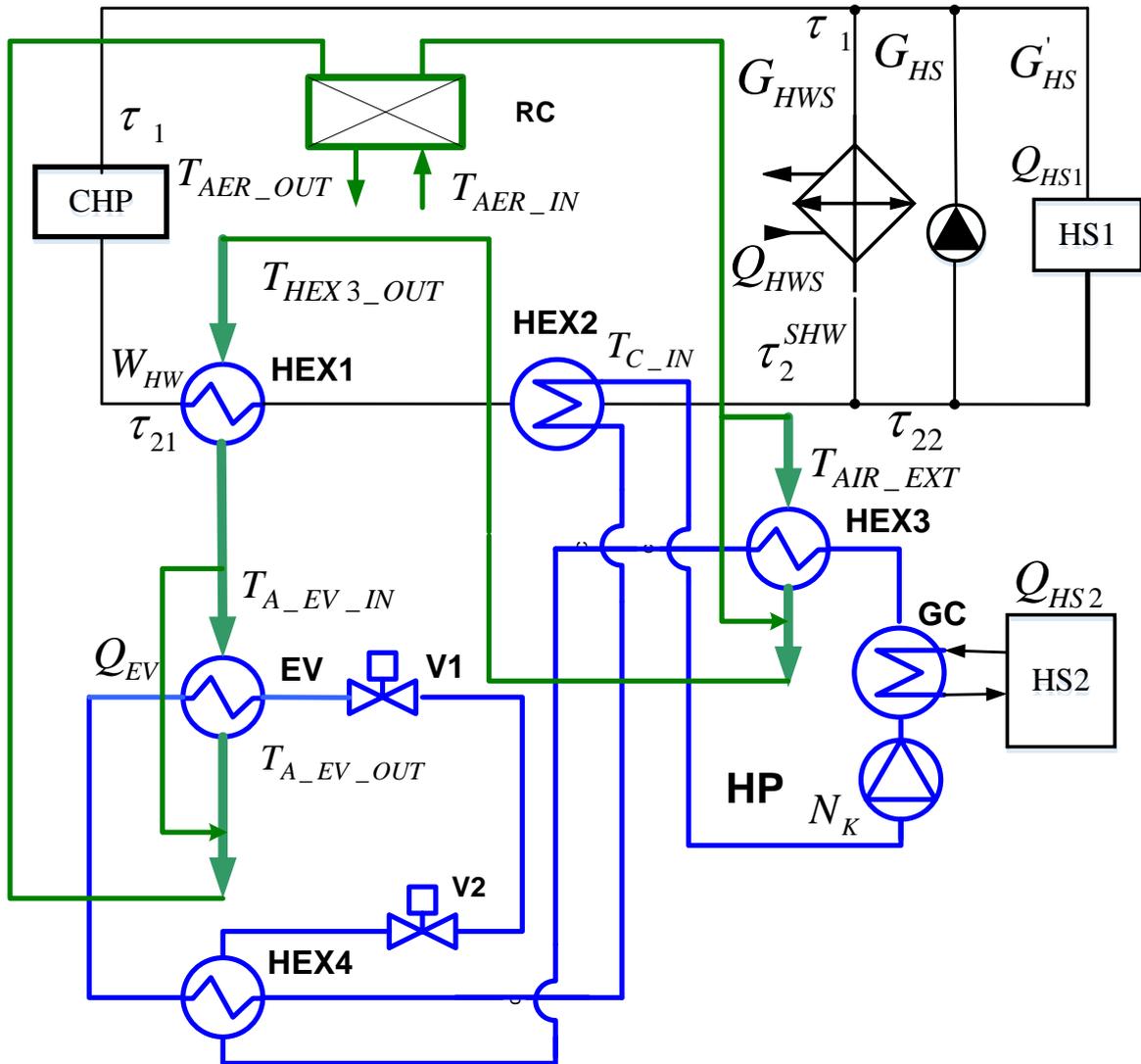
$$G_{A_EV} c_A (T_{A_EV_IN} - T_{A_EV_OUT}) = G_{CO2} (h_1 - h_2) \quad (18)$$

Расход воды, подаваемой на теплообменник HEX2, определяется из условий:

$$G_{W_HEX2} (t_{WOUT_HEX2} - t_{WIN_HEX2}) = \dots \dots G_H (h_{OUT_HEX2} - h_{IN_HEX2}) \quad (19)$$

Требования к теплообменнику перегрева хладагента HEX2 следующие: обеспечить температуру хладагента, необходимую для получения заданной температуры газа после компрессора в соответствии с заданной температурой на входе в газоохладитель. Управлением для этой температуры является расход ОСВ, и осуществляется в статике по формуле (19).

В этом уравнении возмущением процесса регулирования температуры хладагента на выходе теплообменника HEX2 является температура воды на входе в теплообменник HEX2. Это возмущение компенсируется за счет изменения расхода воды через этот теплообменник.



HS1- существующая система теплоснабжения зданий, HS2- система теплоснабжения нового здания, HP- тепловой насос; HEX1 - теплообменник отбора теплоты от обратного трубопровода системы теплоснабжения, CHP- ТЭЦ, Q_{HWS} – система ГВС здания, HEX2-теплообменник «вода-хладагент» для регулирования перегрева газа за испарителем EV, EV- испаритель, HEX3- переохладитель хладагента после газоохладителя, GC-газоохладитель, HEX4- внутренний теплообменник, RC-рекуператор.

Рис1. Схема включения теплового насоса в систему теплоснабжения с ТЭЦ.

HS1- heating system of the existing building, HS2- heating system of the new building, HP- heat pump; HEX1 - heat exchanger for heat extraction from the return pipe water-refrigerant» for control of the gas superheat behind the evaporator EV, EV- evaporator, HEX3- refrigerant’s supercooler after gas cooler, GC-gas cooler, HEX4- internal heat exchanger, RC- recuperative heat exchanger.

Fig.1. Schematic of proposed design of including of heat pump in district heating system based on CHPP.

Задание САР температуры на выходе этого теплообменника вычисляется по формулам, реализующим решение уравнений Шпана-Вагнера (Span-Wagner) состояния диоксида углерода для вычисленной по уравнению (1) плотности газа и при заданном давлении испарителя. Структурная схема САУ имеет следующий вид (рис.2.). На этом рисунке буквой N обозначен блок, решающий уравнение состояния диоксида углерода Шпана-Вагнера и строящий изоэнтропы. Алгоритм работы блока следующий. Вначале задаются уравнением, связывающим координаты точек, характеризующих давления и температуры газа после компрессора в зависимости от уравнений температурного графика системы теплоснабжения

$$\begin{aligned} T_{GC_IN}(i) &= t_1(f(t_{EXT}(i)) + dt_1) \\ T_{GC_OUT} &= t_2(\varphi(t_{EXT}(i)) + dt_2) \end{aligned} \quad (20)$$

и вычисляем энтропии $s(T_{GC_IN}, p_{IN})$, $s(T_{GC_OUT}, p_{OUT})$ в этих точках по формулам (1-3) уравнениям состояния хладагента, используемым для вычисления температуры хладагента в зависимости от его плотности при заданном давлении. Затем задавшись давлением хладагента после компрессора поисковым методом находят искомую точку при заданном давлении на входе компрессора.

При работе ТНУ в составе системы теплоснабжения с количественным (и качественно-количественным) законом регулирования теплового режима отапливаемых зданий, расход хладагента пропорционален расходу прямой сетевой воды через газоохладитель (ГО). Стабилизация температурного режима ГО осуществляется также, как и при качественном температурном графике, с помощью теплообменника HEX2 (рис.1).

Компенсация возмущений по температуре обратной сетевой воды системы теплоснабжения на работу переохладителя хладагента HEX3 (рис.1) осуществляется посредством регулирования длины теплообменника HEX3.

Работа испарителя при количественном законе регулирования отпуска теплоты характеризуется переменным расходом хладагента через испаритель.

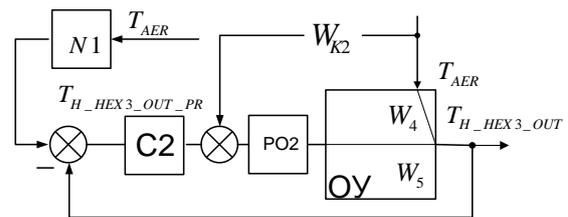
РАБОТА РЕГУЛЯТОРА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОТАПЛИВАЕМОГО ЗДАНИЯ

Работа ТН с системой теплоснабжения с количественным законом регулирования отпуска теплоты состоит в том, что выбор координат точки давления всасывания компрессора осуществляется на этапе проектирования и определяется требуемой температурой газа на входе газоохладителя и давлением после внутреннего теплообменника (практически, давлением испарителя). Отклонения температуры хладагента на входе испарителя компенсируются изменением расхода обратной сетевой воды по уравнению статики для первичного контура теплообменника HEX3:

$$\begin{aligned} G_W(t_{AOUT_HEX3} - t_{AIN_HEX3}) &= \dots \\ \dots G_{HEX3}(h_{OUT_HEX3} - h_{IN_HEX3}) \end{aligned} \quad (21)$$

Выходной величиной для САР теплообменника HEX3 является температура (энтальпия) хладагента на выходе теплообменника. Заданное значение энтальпии на выходе теплообменника определяется из условия работы регулирующего вентиля на однофазной среде.

Для случая качественного и количественного законов регулирования теплового режима здания задача усложняется, так как температура рабочего тела на выходе компрессора должна существенно зависеть от температуры наружного воздуха (реализация отопительного температурного графика).



C2- регулятор, PO2- регулирующий орган, W_4, W_5, W_{K2} – передаточные функции, OU-объект управления.

Рис.2. Структурная схема САУ переохладителем газа после газоохладителя.

C2- Controller, PO2- control valve, W_4, W_5, W_{K2} – transfer functions, OU-controlled object.

Fig.2. Block diagram of the ACS of the gas subcooler after the gas cooler.

Регулирование значения температуры хладагента после переохладителя газа (ПГ)

обеспечивается за счет: регулирования расхода воздуха через него (рис.1).

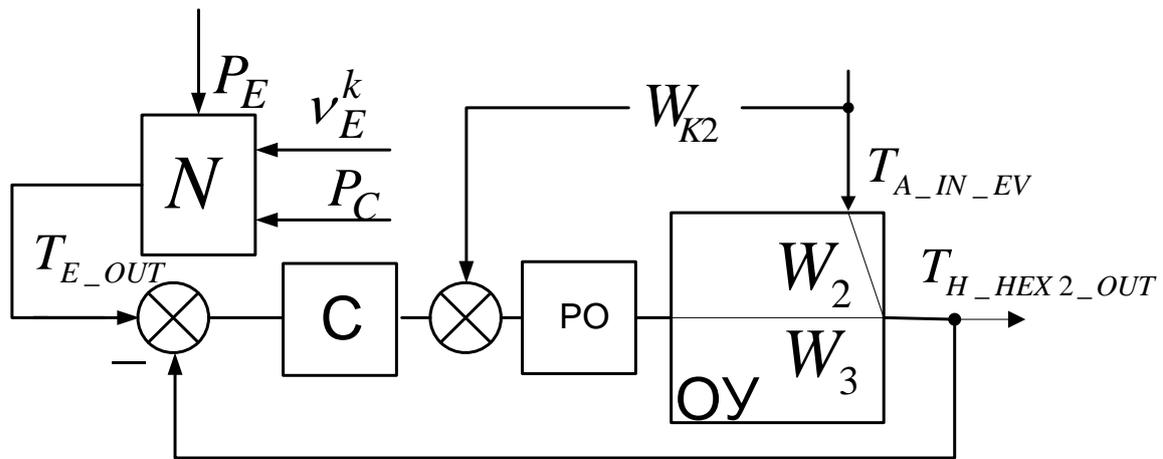
$$h_{H_HEX3_OUT} = G_{AF} \frac{T_{aer_out4} - T_{AER}}{G_{CO2}} + h_{H_HEX2_IN} \quad (22)$$

G_{AF} – расход воздуха через теплообменник HEX3. Уравнение (22) описывает статику управления значением величины энтальпии на выходе HEX3.

Для этого случая в регулятор включается блок решения уравнений Шпана-Вагнера (Span-Wagner) состояния диоксида углерода

(N1). Последовательность вычислений требуемого значения температуры рабочего тела (РТ) после ПГ следующая:

- 1) вычисляется значение энтальпии РТ с использованием уравнений Шпана-Вагнера для точки с координатами P_E, T_E ;
- 2) определение энтальпии газа при давлении P_C из условия изоэнтальпийного процесса работы регулирующего клапана;
- 3) вычисление температуры РТ рабочего тела на выходе ПГ с использованием уравнений Шпана – Вагнера.



1. ОУ-объект управления, 2- PO-регулирующий орган, 3- C-контроллер.

Рис.3. Структурная схема САУ режима работы подогревателя газа, установленного после испарителя.

2. ОУ-controlled object, 2- PO-control valve, 3- C-controller.

Fig.3. Block diagram of the ACS of the gas preheater operation mode installed after the evaporator.

Управление режимом работы газоохладителя GC (рис.1) осуществляется в соответствии с тем правилом, что количество теплоты, отдаваемое газоохладителем должно соответствовать количеству теплоты, потребляемой системой отопления здания согласно температурному графику с учетом потерь. Так как, при качественном режиме работы расход ОСВ и, следовательно, хладагента, – постоянные величины, то тепловой режим газоохладителя необходимо регулировать путем изменения площади теплоотдачи ГО. Температурный режим работы теплообменника HEX3 регулируется путем байпасирования (обводная линия зеленого цвета вокруг теплообменника).

Критерием качества работы теплового четырехполюсника является обеспечение передачи расчетной, по условию реализации температурного графика, тепловой мощности в нагрузку.

Для системы управления режимом работы газоохладителя возмущениями являются: отклонения значений величин температуры обратной сетевой воды от значений наружной температуры воздуха, температуры газа после компрессора. Рекуператор должен быть спроектирован из условия пропуска через себя тепловой мощности, равной максимально мощности испарителя при расчетной температуре наружного воздуха.

Поскольку T_{AER} для рассматриваемой задачи является задающей величиной, определяющей все параметры цикла, то необходимо

корректировать коэффициент усиления регулятора С2 с учетом уравнения статики (2).

В качестве динамической модели, связывающей расход воздуха и температуру хладагента на выходе теплообменника, поз.4, применим описанную в [22]

$$W_{T4-G} = \frac{k_1}{a_1 p^2 + a_2 p + a_3} \quad (7)$$

Для стабилизации режима работы испарителя при данной температуре наружного воздуха необходимо обеспечить при заданном расходе воздуха через него соответствующую температуру воздуха путем регулирования расхода сетевой воды через теплообменник поз.11.

Структурная схема САУ режимом работы испарителя может иметь вид каскадной системы автоматического регулирования, в которой внутренний контур обеспечивает стабилизацию заданной величины температуры воздуха, а наружный контур представляет собой регулятор тепловой мощности воздуха. Во внутреннем контуре температура воздуха стабилизируется за счет изменения расхода через теплообменник 11, например, путем байпасирования расхода сетевой воды вокруг него. Для регулирования тепловой мощности, подаваемой на испаритель необходимо регулировать расход воздуха через него.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В системе управления комбинированным тепловым насосом, использующим теплоту обратной сетевой воды и окружающего воздуха необходимо применять регулируемый теплообменник, установленный после испарителя и управляемый в первичном контуре расходом обратной сетевой воды.

2. Для надежного регулирования режима работы такого теплового насоса необходимо включение в его структуру теплообменника «воздух – хладагент» для охлаждения хладагента выходящего из газоохладителя до температуры, при которой регулирующий клапан теплового насоса будет работать на однофазной среде.

3. Испаритель комбинированного теплового насоса должен иметь регулируемую площадь теплообмена в зависимости от расхода прямой сетевой воды.

4. В регуляторе режима работы теплообменника, установленного после газоохладителя, необходимо предусмотреть вычислительный блок для расчета зависимости заданной температуры хладагента в зависимости от температуры наружного воздуха.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Результаты были получены в рамках проекта Госпрограммы с номером 20.80009.7007.18: «Эко-инновационные технические решения по снижению энергопотребления зданий и разработка опций по развитию интеллектуальных сетей с высокой интеграцией ВИЭ в Молдове».

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Lund H, Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., et al. 4th Generation District Heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 68(2014) 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.2.089>.
- [2] Rama M., Wahlroos M. Introduction of new decentralised renewable heat supply in an existing district heating system. *Energy* 154 (2018) 68-79, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>
- [3] <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>
- [4] Wenyi Wang, Jiatong Jiang, Bin Hu, R.Z. Wang, Mingwen Luo, Guangpeng Zhang, Bo Xiang Performance improvement of air-source heat pump heating system with variable water temperature difference. *Applied Thermal Engineering*, 210(2022), pp.2-9, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118366>
- [5] Tao Cheng, Xiang-Dong He, H. Harry Asada “Nonlinear Observer Design for Two-Phase Flow Heat Exchangers of Air Conditioning Systems”, *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts, Denver, Colorado June 30, - July 2, 2004, p. 1534–1539.
- [6] Xiang-Dong He, H. Harry Asada «A New Feedback Linearization Approach to Advanced Control of Multi-Unit HVAC Systems», *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, Colorado June 4-6, 2003, p. 2311–2316.
- [7] Ommen, T., Markussen, W.B., Elmegaard B. Heat pumps in combined heat and power systems. *Energy* 2014; 76:989–1000. doi:10.1016/j.energy.2014.09.016.
- [8] Elmegaard B., Ommen T., Markussen M.,
- [9] https://www.engineersedge.com/thermodynamics/isentropic_process.htm (accessed 28.04.2022).
- [10] Teplosnabjenie. Uchebnoe posobie dlia studentov vuzov. [Heat supply. Textbook for students]. Moscow, 1980. 408 pp. (in Russian).
- [11] Vinnemeier Ph., Virsum M., Malpiece D., Bove R. Integration of heat pumps into thermal plants

- for creation of large-scale electricity storage capacities. *Applied Energy*, 184(2016), p.506-522.
- [12] Redko A.A., Taradai A.M., Chernokriluk V.V., Esin T.S. Kombinirovannie sistemi teplosnabjenia s vozobnovliaemimi istochnikami tepla. [Parameters of a Heat Supply System at a Lower Temperature Chart], *Energrosberejenie, energetika, energoaudit [Energy saving, energetics, energy audit]*. 199(29)2014, p.42-46. <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/33556/30109>, accessed 19.08.2021.
- [13] Ogurechnikov L.A. Resursoberegaiuschaia kombinirovannaia sistema teplosnabjenia. [Resources saving combined heat supply system]. https://vodapol.ru/Arts/Resursoberegay-usahaya_sistema.php, accessed 19.08.2021.
- [14] Diener R., Schmidt J. Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two-Phase Flow. Part 2: Control Valves, Orifices, and Nozzles. *Process Safety Progress* (Vol.24, No.1), March 2005, pp.29-37. DOI 10.1002/prs.10035 (accessed 4 may 2022).
- [15] <https://instrumentationtools.com/control-valves-basic-theory/Emerson-Fisher>, 2019, (accessed 04.05.2022).
- [16] Pipeline Rules of Thumb Handbook A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems Book • Eighth Edition • 2014, 7- Control valves, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387693-5.00007-3> (accessed 4 mai 2022).
- [17] Chen Yu, Halm N.P., Groll E.C., Braun J.E. Mathematical modeling of scroll compressors—part I: compression process modeling. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 731–750.
- [18] Salts N., Ziviani D., Groll E.C. Application of a generalized compressor modeling framework for simulating an oil-injected twin-screw compressor. *International Conference on Compressors and their Systems 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 604 (2019) 01. 2009, IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/604/1/012009 (accessed 4 mai 2022).
- [19] Dutra T., Deschamps C.J. "Development of a Lumped-Parameter Model for Hermetic Reciprocating Compressor with Thermal-Electrical Coupling" (2014). *International Compressor Engineering Conference*. Paper 2322. <http://docs.lib.purdue.edu/icec/2322> (accessed 4 mai 2022).
- [20] Derevich E.G., Smirnova E.G. Calculating the Parameters of Heat Transfer between Countercurrent Flows with Variable Thermophysical Properties. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 36, No. 4, 2002, pp. 341–345.
- [21] Dudnikov E.G. Avtomaticheskoe upravlenie v himicheskoi promishlennosti. [Automatic control in chemical industry]. *Mashinostroenie*, 1987. 368 p.

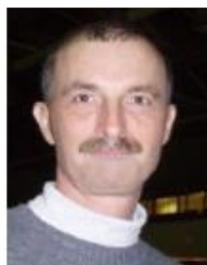
Сведения об авторах.



Шит Михаил Львович – к.т.н., доцент-исследователь, в.н.с. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами.
E-mail: mihail_sit@mail.ru



Журавлев Анатолий Александрович – к.т.н., в.н.с. Область научных интересов: микропроцессорные системы управления, промышленная автоматика. E-mail: AZhur5249@mail.ru



Тимченко Дмитрий Викторович – ведущий инженер – программист. Область научных интересов: программирование микропроцессоров.
E-mail: dimmy@bk.ru

The Sufficient Condition for Ensuring the Reliability of Perception of the Steganographic Message in the Walsh-Hadamard Transform Domain

Kobozeva A.A., Sokolov A.V.

Odessa Polytechnic National University,
Odessa, Ukraine

Abstract. In view of the high compatibility of the Walsh-Hadamard transform to the architecture of modern computing facilities, it is sensible to use it in methods of steganography and steganalysis. Now, there are some efficient steganographic methods that use the Walsh-Hadamard transform domain for information embedding presented in the literature. It is known that to ensure the reliability of the steganographic message perception, information should be embedded in its high-frequency components; nevertheless, the issues of the correspondence of the Walsh-Hadamard transformants to the frequency components of the original matrix of the cover image are poorly researched. The purpose of this paper is to develop a formal sufficient condition for ensuring the reliability of perception of steganographic messages in the Walsh-Hadamard transform domain. This purpose was achieved by establishing the relationship between the Walsh-Hadamard transformants and the discrete cosine transform transformants, which was theoretically substantiated in two ways, and also experimentally confirmed. Based on the established relationship between the Walsh-Hadamard transform and the discrete cosine transform, as well as the components of the singular value decomposition of the corresponding matrices, a sufficient condition has been developed to ensure the reliability of the perception of steganographic messages in the Walsh-Hadamard transform domain. The sufficient condition consists in the fact that after embedding of additional information using any steganographic method, those Walsh-Hadamard transformants that correspond to the singular triples of the matrix corresponding to small (smallest) in value singular numbers, should change.

Keywords: steganographic communication channel, steganographic message perception reliability, digital image, Walsh-Hadamard transform, sequence, discrete cosine transform, singular value decomposition of a matrix.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.08>

UDC: 004.056

Condiție suficientă pentru asigurarea unei percepții fiabile a mesajului stegano în domeniul transformării Walsh-Adamar

Kobozeva A.A., Sokolov A.V.

Universitatea Națională "Odesika Politehnika"
Odessa, Ucraina

Rezumat. Având în vedere corespunderea înaltă a transformării Walsh-Adamar cu arhitectura instalațiilor de calcul moderne, un interes practic prezintă utilizarea acesteia în metodele moderne de steganografie și steganoanaliză. Actualmente, literatura de specialitate prezintă metode steganografice eficiente care utilizează domeniul transformării Walsh-Adamar pentru încorporarea informațiilor. Este cunoscut faptul că, pentru o percepție fiabilă a unui mesaj de tip stegano, încorporarea informațiilor ar trebui să aibă loc în componentele de înaltă frecvență ale acestuia, dar problemele legate de potrivirea transformărilor Walsh-Adamar cu componentele de frecvență ale matricei originale sunt slab investigate. Scopul acestei lucrări este de a formula o condiție formală suficientă pentru fiabilitatea percepției mesajelor de tip stegano în domeniul transformării Walsh-Adamar. Acest obiectiv a fost atins prin stabilirea relației dintre transformările Walsh-Adamar și transformările discrete ale cosinusului, care a fost argumentată teoretic în două moduri și, de asemenea, verificată experimental. Pe baza relației stabilite între transformata Walsh-Adamar și transformata discretă a cosinusului, precum și a componentelor descompunerii singulare a matricelor corespunzătoare, a fost formulată o condiție suficientă pentru fiabilitatea percepției mesajelor steganografice în regiunea transformării Walsh-Adamar, care constă în faptul că, după introducerea de informații suplimentare prin orice metodă steganografică, acele transformări Walsh-Adamar, care corespund triplurilor singulare ale matricei corespunzătoare matricelor mici.

Cuvinte-cheie: canal de comunicare steganografică, fiabilitatea percepției mesajului steganografic, imagine digitală, transformată Walsh-Adamar, frecvență, transformată cosinus discretă, descompunerea matricei singulare.

**Достаточное условие обеспечения надежности восприятия стеганообщения в области преобразования Уолша-Адамара
Кобозева А.А., Соколов А.В.**

Национальный университет «Одесская политехника»
Одесса, Украина

Аннотация. В виду высокого соответствия преобразования Уолша-Адамара архитектуре современных вычислительных средств практический интерес представляет его использование в современных методах стеганографии и стеганоанализа. В настоящий момент в литературе представлены эффективные стеганографические методы, использующие область преобразований Уолша-Адамара для внедрения информации. Известно, что для обеспечения надежности восприятия стеганообщения, внедрение информации должно происходить в его высокочастотные составляющие, тем не менее вопросы соответствия трансформант Уолша-Адамара частотным составляющим исходной матрицы являются малоисследованными. Целью настоящей статьи является формирование формального достаточного условия обеспечения надежности восприятия стеганообщений в области преобразования Уолша-Адамара. Поставленная цель была достигнута за счет установления взаимосвязи между трансформантами Уолша-Адамара и трансформантами дискретного косинусного преобразования, которая была теоретически обоснована двумя способами, а также подтверждена экспериментально. На основе установленной взаимосвязи преобразования Уолша-Адамара и дискретного косинусного преобразования, а также составляющих сингулярного разложения соответствующих матриц сформировано достаточное условие обеспечения надежности восприятия стеганообщений в области преобразования Уолша-Адамара, которое состоит в том, что после внедрения дополнительной информации с помощью любого стеганографического метода, изменению должны подвергнуться те трансформанты Уолша-Адамара, которые соответствуют сингулярным тройкам матрицы, отвечающим малым (наименьшим) по значению сингулярным числам. Полученные в работе результаты могут служить основой разработки новых стеганоалгоритмов, а также методов стеганоанализа, основанных на применении свойств области преобразования Уолша-Адамара, при этом стеганопреобразование возможно проводить в любой области контейнера (пространственной, преобразования).

Ключевые слова: стеганографический канал связи, надежность восприятия стеганообщения, цифровое изображение, преобразование Уолша-Адамара, частота, дискретное косинусное преобразование, сингулярное разложение матрицы.

I. INTRODUCTION AND STATEMENT OF THE PROBLEM

In modern complex information security systems, steganographic methods are increasingly used, which can not only protect information from possible reading by intruders, but also hide the very fact of its transfer from unauthenticated users. At present, the theory and practice of steganography are rapidly developing [1], as well as many steganographic methods for protecting information are being developed and improved. These methods are based on a wide variety of mathematical constructions, starting from the classical LSB (Least Significant Bit) method, which ensures the effective embedding of additional information into a container, most often in the spatial / temporal domain [2], ending with methods using the container transform domains [3-7] (discrete cosine transform (DCT), discrete wavelet transform, Fourier transform, domains of various matrix decompositions (singular value, spectral, etc.)), as well as the Walsh-Hadamard transform [8-9]) for the embedding of additional information.

The development of steganography is accompanied by the development of steganalysis methods, the main task of which is to reveal the presence of embedded information in information content [10], which makes it very difficult in modern conditions to meet the requirement of reliable concealment of the fact of organizing a covert communication channel. Because of this, for modern steganographic methods, the relevance of the requirement for the reliability of perception of the steganographic message (ensuring the absence of visual differences between the container and the steganographic message) increases when organizing a covert communication channel [11]. Today, we are talking not only about the appearance of obvious artifacts in the steganographic message but also about the appearance of any differences that may not be perceived as changes in the original image without container availability: a change in brightness, color shades, slight smoothing of contours, etc., however, become definable by direct comparison with the container. It should be noted that exactly the guaranteed reliability of

the steganographic message perception makes the LSB method so "tenacious" and widely used, despite its well-known shortcomings, in particular, its vulnerability to attacks against an embedded message.

Quantitative estimation of the reliability of steganographic message perception today is carried out using standard differential distortion indicators [12]: MSE (*Mean Square Error*), SNR (*Signal to Noise Ratio*), PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*), although they are often biased since they cannot fully consider the features of human vision. This possible bias is especially pronounced in cases when changes in digital content occur in its local (small in size) areas. Here, a formal quantitative assessment of

distortion can be acceptable in the conditions of artifacts presence (Fig. 1, b)), while the values of the differential indicators in the absence of obvious visual distortions can be low (Fig. 1, c)). As a container in this paper, we consider a digital image (DI) or a digital video frame, which, under the conditions of the considered problem, do not fundamentally differ in anything in the sense that the formal representation of each is one (image in grayscale) or several (color image) two-dimensional matrices, and any changes to the original content, including the steganographic transformation, can be considered as a perturbation of the corresponding matrix or matrices.

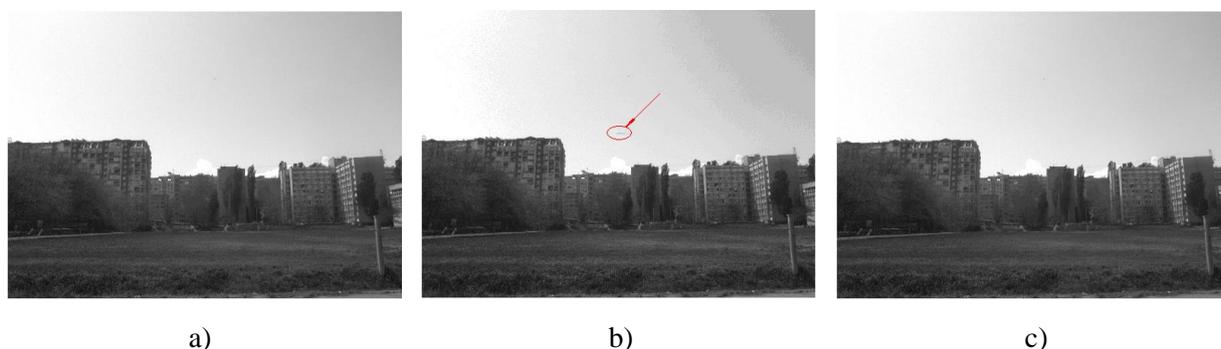


Fig. 1 Illustration of the imperfection of the differential indicators for assessing the visual distortions of the DI: a) initial DI; b) distorted DI (PSNR = 52 dB); c) distorted using Gaussian noise DI (PSNR = 28 dB)

In the existing steganographic methods, the restrictions on the area of their applicability often occur precisely because for some DI containers the reliability of perception of the generated steganographic message can be violated. This most often occurs due to the fact that when developing a steganographic algorithm, sufficient formal conditions for the reliability of perception are not considered (or such formal conditions have not been found in the used domain of the container), and the assessment of the reliability of perception is done "a posteriori". This situation does not fully allow the use of a random container and that is a drawback of the corresponding methods. It should be noted that the formal mathematical apparatus for ensuring the reliability of perception of steganographic messages have been developed in relation to steganography not so long ago [13], before that everything was limited to considering the peculiarities of human vision: changes are more strongly perceived in areas of digital insight with small differences in brightness values, or background, which

corresponds to low-frequency components. In [13], using the mathematical apparatus of the perturbation theory and matrix analysis, sufficient conditions were obtained to ensure the reliability of perception of the generated steganographic message, the use of which made it possible to "a priori" ensure/check the fulfillment of this property in the domain of the singular value (or spectral) decomposition of the corresponding matrix. Considering the possible provision of the uniqueness of such decompositions, the obtained sufficient conditions can be applied regardless of the chosen steganographic transformation domain (spatial, frequency, various decompositions); however, in practice, it is still advisable to obtain such sufficient conditions in each of the domains of the DI, where it is possible to carry out the steganographic transformation which will make it possible to avoid the transformation to the domain of the singular value (spectral) decomposition of the matrix, in order to analyze the degree of ensuring the reliability of perception of the steganographic message if the

steganographic transformation is performed in another domain of the container.

In view of the high computational efficiency, as well as compliance with the architectural features of modern processors, steganographic methods based on the use of the Walsh-Hadamard transform domain are promising for modern information security systems. In particular, in [8], it was proposed to embed information into a container by modifying the matrices of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform of the original image. In this method, it is proposed to modify all the elements of the resulting matrices of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform of the original image, except for the elements of their first column, which in the general case does not guarantee the reliability of perception of the steganographic message, which will be shown below in this paper. Today in the literature there is no rigorous substantiation of the influence of modification of one or another two-dimensional Walsh-Hadamard transformant on the distortions that arise in the container image. This circumstance significantly complicates the development of promising steganographic methods based on the use of the properties of the Walsh-Hadamard transform.

The *purpose* of this paper is to obtain a formal sufficient condition for ensuring the reliability of perception of steganographic messages in the Walsh-Hadamard transform domain.

To achieve this purpose, it is necessary to solve the following tasks:

1. Finding the relationship between the Walsh-Hadamard transform domain and the frequency domain of a DI.
2. Finding the relationship between the Walsh-Hadamard transform and the components of the singular value decomposition of the corresponding matrix.
3. Experimental confirmation of the obtained theoretical results.

II. RELATIONSHIP BETWEEN THE WALSH-HADAMARD TRANSFORM AND THE DISCRETE COSINE TRANSFORM

The basic transform used in many modern graphic compression algorithms, as well as steganographic algorithms, is the discrete cosine transform (DCT), which can be written in matrix form

$$S = C_N X C_N^T, \quad (1)$$

where X is a fragment of the original image of size $N \times N$, C is the $N \times N$ matrix of discrete cosine transform, the elements $C(i, j)$, $i, j = 0, 1, \dots, N-1$ of which are calculated in accordance with the formula

$$C(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & \text{if } i = 0; \\ \sqrt{\frac{2}{N}} \cos(2j+1) \cdot i \cdot \pi, & \text{if } i > 0. \end{cases} \quad (2)$$

The resulting DCT matrix S (1) has the following distribution of frequency components, schematically shown in Fig. 2 [14].

It is well known [10] that the modification of the high-frequency components (located in the lower right corner of the DCT transformants matrix) leads to the least visual distortions of the original image, while the modification of the middle frequencies corresponds to larger distortions. The greatest distortions of the original image occur when modifying the low-frequency components (upper left corner) of the DCT transformants matrix.

Another type of transform which is often used in cryptography [15] and signal theory [16] is the discrete Walsh-Hadamard transform, which in matrix form can be written as the following matrix product

$$V = Y H_N, \quad (3)$$

where H_N is the Walsh-Hadamard matrix of order $N = 2^k$, which can be constructed in accordance with Sylvester's construction

$$H_{2^k} = \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

where $H_1 = 1$, and Y is a row vector of length N .

Expression (3) is the one-dimensional Walsh-Hadamard transform, while in graphic information processing applications, in particular, for steganography applications, the two-dimensional discrete Walsh-Hadamard transform is used, which is defined as

$$W = H'_N X H_N{}^T, \quad (5)$$

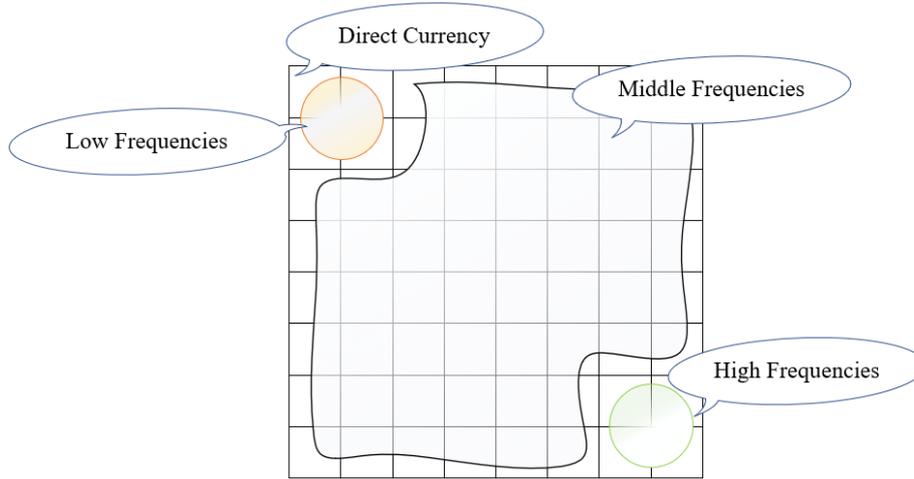


Fig. 2. Distribution of frequency components in DCT transformants

where $H'_N = \frac{1}{2^{\frac{\log_2 N}{2}}} H_N = \frac{1}{\sqrt{N}} H_N$, and X is the matrix of size $N \times N$.

Let us find the relationship between the elements of the of the Walsh-Hadamard transformants matrix and the frequency components of the matrix X . In particular, considering the purpose of the paper, the localization of the high-frequency components of the matrix X of the DI in the Walsh-Hadamard transformants matrix is of greatest interest. Each of the Walsh functions, while not being harmonic, is characterized by a sequency [17], which is analogous to the frequency for harmonic functions, and in the case of the harmonic functions, these two characteristics coincide. In accordance with [17], if the number of sign changes in the time interval of the function f is equal to η , then the sequency $\bar{\eta}$ of the function f is determined as $\eta/2$ for even η , or $(\eta+1)/2$ for odd η , respectively. Moreover, each of the Walsh functions has a natural correspondence with the harmonic in the time interval $t \in [0,1]$ [17], at which the higher sequency of the Walsh function corresponds to the higher frequency of the corresponding harmonic.

Let us denote by $H_N(i,:)$ the i -th row of the matrix H_N . In the accepted notation, considering (4), the correspondence between the initial rows

of H_N and harmonic functions will have the form

$$\begin{aligned} H_N(1,:) &\rightarrow \sin(\pi t), \\ H_N(2,:) &\rightarrow \sin(N\pi t), \\ H_N(3,:) &\rightarrow \sin\left(\frac{N}{2}\pi t\right), \\ H_N(4,:) &\rightarrow \cos\left(\frac{N}{2}\pi t\right), \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \tag{6}$$

etc.

The highest sequency among the rows of matrix (4), which are discrete Walsh functions, ordered according to Hadamard, will always have $H_N(2,:)$, for which $\bar{\eta} = N/2 = 2^{k-1}$; the highest frequency of all the corresponding harmonics (6) has the corresponding to $H_N(2,:)$ harmonic $\sin(N\pi t)$.

For a clearer understanding of the relationship between the frequency components and the components of the Walsh-Hadamard transformants matrix, we assume that $X = E$, where E is the identity matrix of the corresponding size. In this case, the result of relation (5) will not depend in any way on the image matrix, but will be determined only by the coefficients of the Walsh-Hadamard matrix

$$W = H'_N X H_N{}^T = H'_N H'_N. \tag{7}$$

Relation (7) can be rewritten as

$$\begin{aligned}
 H'_N H'_N &= \frac{1}{N} \begin{pmatrix} H_N(1,:) \\ H_N(2,:) \\ \dots \\ H_N(N,:) \end{pmatrix} \cdot \left((H_N(1,:))^T, (H_N(2,:))^T, \dots, (H_N(N,:))^T \right) = \\
 &= \frac{1}{N} \begin{pmatrix} H_N(1,)(H_N(1,:))^T, & H_N(1,)(H_N(2,:))^T, & \dots, & H_N(1,)(H_N(N,:))^T \\ H_N(2,)(H_N(1,:))^T, & H_N(2,)(H_N(2,:))^T, & \dots, & H_N(2,)(H_N(N,:))^T \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_N(N,)(H_N(1,:))^T, & H_N(N,)(H_N(2,:))^T, & \dots, & H_N(N,)(H_N(N,:))^T \end{pmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Considering (8), as well as the relationship (6) between the Walsh functions and the corresponding harmonics, as well as the well-known formulas for transforming the product of trigonometric functions into a sum, we formulate the following hypothesis.

Condition A. In the Walsh-Hadamard transformants matrix (5), element (2,2) will correspond to the highest-frequency component of X , some of the high-frequency components will be localized within the second row and the second column of matrix (5), regardless of its size. There are no low-frequency components within the second row and second column. In general, in matrices that are the result of the Walsh-Hadamard transform, the high-frequency components will correspond to the elements at the intersection of rows and columns corresponding to discrete Walsh functions with the highest sequencies. Thus, to localize the elements corresponding to the high-frequency components of the DI block (matrix), it is

sufficient to determine the functions with the highest sequencies among the Walsh functions. So, considering the sequency of discrete Walsh functions, ordered according to Hadamard, used to transform matrices of size $l \times l$, where $l \in \{4, 8, 16\}$, indicated in Table 1, it can be argued that the high-frequency components of the signal in the matrix of size 4×4 will correspond to the elements in the matrix (5) at the positions (written in decreasing order of sequency): (2,2), (2,4), and (4,2); in the matrix of size 8×8 : (2,2), (2,6), and (6,2), (2,8), and (6,8), and (6,6); in the matrix of size 16×16 : (2,2), (2,10), and (10,2), (2,14), and (14,2), (2,6), and (6,2), etc. In Table 1 we can write out all the elements of the matrix in the order of frequency decreasing. Note that if the sequencies of the functions are the same, then when identifying compliance with high-frequency components, preference should be given to the one with the greater value of η .

Table 1

Correspondence between values η and $\bar{\eta}$ for Walsh functions ordered according to Hadamard for different sizes of Walsh-Hadamard matrices

l=4	Row number	1		2		3		4									
	$\eta / \bar{\eta}$	0/0		3/2		1/1		2/1									
l=8	Row number	1	2	3	4	5	6	7	8								
	$\eta / \bar{\eta}$	0/0	7/4	3/2	4/2	1/1	6/3	2/1	5/3								
l=16	Row number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	$\eta / \bar{\eta}$	0/0	15/8	7/4	8/4	3/2	12/6	4/2	11/6	1/1	14/7	6/3	9/5	2/1	13/7	5/3	10/5

For practical confirmation of the proposed hypothesis with help of the MatLAB environment, a computational experiment was performed, in which 1000 DI were used from traditional image databases in both lossy (JPEG)

format (NRCS base [18]) and lossless (TIFF) (img_Nikon_D70s [19], 4cam_auth [20]). The considered image size was 400×400 pixels. During the experiment, each DI was divided in a standard way into $l \times l$ -blocks, where $l \in \{4, 8, 16\}$

(the sizes of the blocks were chosen as the most frequently used in block steganographic methods). For each block B , the Walsh-Hadamard transform (5) (the result is a block B_{WH}) and the discrete cosine transform (the result is a block B_{DCT}) were calculated.

Then a certain element (i, j) in the B_{DCT} (the same element (i, j) for all the DI blocks) was perturbed (the result is a block \bar{B}_{DCT}), after which the perturbed block \bar{B} was restored by inverse cosine transform. For the block \bar{B} the Walsh-Hadamard transform was performed (the result is a block \bar{B}_{WH}), after which, by comparison of \bar{B}_{WH} and B_{WH} , the most disturbed element of the block B_{WH} was found. For all the DI blocks, such an element of the block B_{WH} was determined that more often than others had the maximum perturbation as a result of perturbation of the (i, j) element of the block B_{DCT} , as well as a quantitative characteristic of this frequency, for which a $l \times l$ -matrix R of maximum disturbance was built for each DI, the element $R_{ij}, i, j = 0, 1, \dots, l-1$ of which was equal to the number of DI blocks, for which the maximum in absolute value $\bar{B}_{WH} - B_{WH}$ matrix element is located at position (i, j) .

The experimental results, which fully correspond to the theoretical positions substantiated above, are presented in Table 2 and Fig. 3 (the localization of high-frequency components is highlighted by filling the corresponding elements), while the values of the R matrix elements did not depend on the magnitude of the disturbing effect on the B_{DCT} matrix elements (during the experiment, the disturbances were $\pm 1\%; \pm 10\%; \pm 100\%$, but depended only on their localization in B_{DCT} , which confirms the accuracy of the established correspondence between the elements of the frequency domain and the Walsh-Hadamard transform domain.

Note that since the low-frequency components correspond not only to the elements of the first column of the matrix of the Walsh-Hadamard transformants (Fig. 3), it is obvious that the method proposed in [8], as already noted above,

cannot guarantee the reliability of perception of the generated steganographic message.

Note that for some blocks of the DI, the same maximum disturbance in blocks of the form (5) was achieved simultaneously in several elements, which was considered during the experiment. The behavior of DI in different storage formats (lossy and lossless) was slightly different. So, for the majority of DI in the lossy format, the number of blocks where the maximum disturbance in the matrix (5) occurred in one single element that meets the theoretical assumptions, often coincided with the total number of blocks or differed slightly (less than 1.5%), while in other elements the disturbance maximum in blocks was not achieved at all. For DI in a lossless format, the desired element in the Walsh-Hadamard transform domain, corresponding to a specific frequency coefficient, was determined by the absolute maximum of the blocks where it underwent maximum disturbance; the same maximum was reached in other elements of the transformed block. This situation is obviously a consequence of the fact that for DI in a lossy format, the high-frequency coefficients as a result of quantization and rounding in the process of saving and subsequent image restoration become comparable to zero in value. Because of this, even with a small absolute perturbation, their relative perturbation will be significant. The consequence of this fact is that the sufficient condition obtained below will work better for DI in a lossy format. An illustration is shown in Fig. 4. The DI matrix of the size 400×400 , originally saved in the TIFF format, and then re-saved in the JPEG format, was divided into 8×8 blocks, the element (8,8) in each block B_{DCT} was perturbed.

Thus, for the matrix, which is the result of the Walsh-Hadamard transform of the matrix X of an arbitrary size, it is possible to accurately set the elements corresponding to the high-frequency components of the matrix X . The steganographic transformation, which results in a perturbation of these elements in the Walsh-Hadamard transform domain, will ensure the reliability of perception of the received steganographic message.

Table 2

Correspondence between the high-frequency components of the DI block and the elements of the result of the Walsh-Hadamard transform of the block

Block size l	Element (i, j) subjected to disturbance in B_{DCT} / element (m, n) , subjected to
----------------	--

	maximum disturbance in the B_{WH} in maximum number of DI blocks under perturbation of the (i, j) element in B_{DCT} (the number of DI blocks (%), in which the B_{WH} element (m, n) has subjected to the maximum disturbance)		
4	(4,4)/(2,2) (97.3%)	(4,3)/(2,4) (95.6%)	(3,4)/(4,2) (96.1%)
8	(8,8)/(2,2) (99.4%)	(8,7)/(2,6) (99.4%)	(7,8)/(6,2) (99.4%)
16	(16,16)/(2,2) (99.8%)	(16,15)/(2,10) (99.9%)	(15,16)/(10,2) (99.9%)

(1,1)	(1,4)	(1,2)	(1,3)
(4,1)	(4,4)	(4,2)	(4,3)
(2,1)	(2,4)	(2,2)	(2,3)
(3,1)	(3,4)	(3,2)	(3,3)

a)

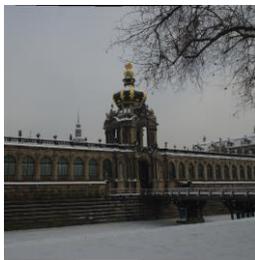
(1,1)	(1,8)	(1,4)	(1,5)	(1,2)	(1,7)	(1,3)	(1,6)
(8,1)	(8,8)	(8,4)	(8,5)	(8,2)	(8,7)	(8,3)	(8,6)
(4,1)	(4,8)	(4,4)	(4,5)	(4,2)	(4,7)	(4,3)	(4,6)
(5,1)	(5,8)	(5,4)	(5,5)	(5,2)	(5,7)	(5,3)	(5,6)
(2,1)	(2,8)	(2,4)	(2,5)	(2,2)	(2,7)	(2,3)	(2,6)
(7,1)	(7,8)	(7,4)	(7,5)	(7,2)	(7,7)	(7,3)	(7,6)
(3,1)	(3,8)	(3,4)	(3,5)	(3,2)	(3,7)	(3,3)	(3,6)
(6,1)	(6,8)	(6,4)	(6,5)	(6,2)	(6,7)	(6,3)	(6,6)

b)

(1,1)	(1,16)	(1,8)	(1,9)	(1,4)	(1,13)	(1,5)	(1,12)	(1,2)	(1,15)	(1,7)	(1,10)	(1,3)	(1,14)	(1,6)	(1,11)
(16,1)	(16,16)	(16,8)	(16,9)	(16,4)	(16,13)	(16,5)	(16,12)	(16,2)	(16,15)	(16,7)	(16,10)	(16,3)	(16,14)	(16,6)	(16,11)
(8,1)	(8,16)	(8,8)	(8,9)	(8,4)	(8,13)	(8,5)	(8,12)	(8,2)	(8,15)	(8,7)	(8,10)	(8,3)	(8,14)	(8,6)	(8,11)
(9,1)	(9,16)	(9,8)	(9,9)	(9,4)	(9,13)	(9,5)	(9,12)	(9,2)	(9,15)	(9,7)	(9,10)	(9,3)	(9,14)	(9,6)	(9,11)
(4,1)	(4,16)	(4,8)	(4,9)	(4,4)	(4,13)	(4,5)	(4,12)	(4,2)	(4,15)	(4,7)	(4,10)	(4,3)	(4,14)	(4,6)	(4,11)
(13,1)	(13,16)	(13,8)	(13,9)	(13,4)	(13,13)	(13,5)	(13,12)	(13,2)	(13,15)	(13,7)	(13,10)	(13,3)	(13,14)	(13,6)	(13,11)
(5,1)	(5,16)	(5,8)	(5,9)	(5,4)	(5,13)	(5,5)	(5,12)	(5,2)	(5,15)	(5,7)	(5,10)	(5,3)	(5,14)	(5,6)	(5,11)
(12,1)	(12,16)	(12,8)	(12,9)	(12,4)	(12,13)	(12,5)	(12,12)	(12,2)	(12,15)	(12,7)	(12,10)	(12,3)	(12,14)	(12,6)	(12,11)
(2,1)	(2,16)	(2,8)	(2,9)	(2,4)	(2,13)	(2,5)	(2,12)	(2,2)	(2,15)	(2,7)	(2,10)	(2,3)	(2,14)	(2,6)	(2,11)
(15,1)	(15,16)	(15,8)	(15,9)	(15,4)	(15,13)	(15,5)	(15,12)	(15,2)	(15,15)	(15,7)	(15,10)	(15,3)	(15,14)	(15,6)	(15,11)
(7,1)	(7,16)	(7,8)	(7,9)	(7,4)	(7,13)	(7,5)	(7,12)	(7,2)	(7,15)	(7,7)	(7,10)	(7,3)	(7,14)	(7,6)	(7,11)
(10,1)	(10,16)	(10,8)	(10,9)	(10,4)	(10,13)	(10,5)	(10,12)	(10,2)	(10,15)	(10,7)	(10,10)	(10,3)	(10,14)	(10,6)	(10,11)
(3,1)	(3,16)	(3,8)	(3,9)	(3,4)	(3,13)	(3,5)	(3,12)	(3,2)	(3,15)	(3,7)	(3,10)	(3,3)	(3,14)	(3,6)	(3,11)
(14,1)	(14,16)	(14,8)	(14,9)	(14,4)	(14,13)	(14,5)	(14,12)	(14,2)	(14,15)	(14,7)	(14,10)	(14,3)	(14,14)	(14,6)	(14,11)
(6,1)	(6,16)	(6,8)	(6,9)	(6,4)	(6,13)	(6,5)	(6,12)	(6,2)	(6,15)	(6,7)	(6,10)	(6,3)	(6,14)	(6,6)	(6,11)
(11,1)	(11,16)	(11,8)	(11,9)	(11,4)	(11,13)	(11,5)	(11,12)	(11,2)	(11,15)	(11,7)	(11,10)	(11,3)	(11,14)	(11,6)	(11,11)

c)

Fig. 3. Correspondence of B_{WH} elements through B_{DCT} elements for blocks of different sizes l : a) $l = 4$; b) $l = 8$; c) $l = 16$



a)

8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	2500	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	5	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	5	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	8	5

b)

10	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2490	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

c)

Fig. 4. a) original DI in lossless format; b) R matrix for DI in TIFF format; c) R matrix for the original DI, resaved to the JPEG format

A slightly different view on determining a relationship between the domains of the Walsh-Hadamard transform and DCT, leading to the same results, is proposed below.

To research the physical essence of the transformants of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform (5) and their relationship with the DCT transformants (1), it is convenient

to consider their representation using row vectors.

Consider row vectors V and Y of length N^2 that are the result of sequential concatenation of rows of matrices W and X (5) of size $N \times N$, respectively. In this case, the following statement takes place.

Statement 1. Transformants of two-dimensional Walsh-Hadamard transform (5) and DCT (1) when represented as a row vector can be found using the following relation

$$V = YA_1, \quad (9)$$

where A_1 is the matrix of order N^2 , the elements of which are the coefficients near $x_{i,j}$ elements of the matrix X after the expansion of the product (1) or (5).

The proof of **Statement 1** is obvious.

Moreover, in the case of using the two-dimensional Walsh-Hadamard transform (5), the following is true.

Statement 2. In the case of the two-dimensional Walsh-Hadamard transform, the matrix A_1 coincides with the Walsh-Hadamard matrix H_{N^2} of order N^2 , constructed in accordance with Sylvester's construction (4) up to a coefficient $\frac{1}{\sqrt{N}}$.

To prove the **Statement 2**, we use the definitions of the one-dimensional and two-dimensional Walsh-Hadamard transform in terms of the complete binary code $b_i(k)$ of length n , where $i = 0, 1, \dots, n-1$, $n = \log_2 N$, $k = 0, 1, \dots, N-1$.

In this case, the one-dimensional Walsh-Hadamard transform of the vector Y is specified using the following relation

$$V_\omega = \sum_{x=0}^{N-1} Y_x (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(x)b_i(\omega)}, \quad (10)$$

where the sum $\sum_{i=0}^{n-1} b_i(x)b_i(\omega)$ is the dot product of the codewords of the complete code with numbers x and ω .

The relation defining the two-dimensional Walsh-Hadamard transform of the matrix X has the form

$$W_{u,v} = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} X_{x,y} \left[(-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(x)b_i(u)+b_i(y)b_i(v)} \right]. \quad (11)$$

Let us rewrite expression (11) with respect to row vectors V and Y , obtained as a result of row-by-row concatenation of matrices W and X

$$V_w = \frac{1}{N} \sum_{z=0}^{N^2-1} Y_z \cdot (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(z//N)b_i(w//N)+b_i(z \bmod N)b_i(w \bmod N)}, \quad (12)$$

where $z = 0, 1, \dots, N^2 - 1$, and the symbol $//$ denotes an integer division operation.

In expression (12), the part of the expression under the sum $b_i(z//N)b_i(w//N)$ defines the duplication of the dot product of the codewords of the complete code with numbers z and w N times (equivalent to the low-frequency part of the complete code of length $n' = \log_2 N^2 = 2 \log_2 N$), while the part of the expression under the sum $b_i(z \bmod N)b_i(w \bmod N)$ leads to the formation of the dot product of the codewords of the complete code with numbers z and w each time the value of z changes (equivalent to the high-frequency part of the full code of length $n' = \log_2 N^2 = 2 \log_2 N$).

Thus, in expression (12), the sum $\sum_{i=0}^{n-1} b_i(z//N)b_i(w//N)+b_i(z \bmod N)b_i(w \bmod N)$ is equivalent to the sum $\sum_{i=0}^{n'-1} b_i(x)b_i(\omega)$ in expression (10) of the one-dimensional Walsh-Hadamard transform using the complete code $b_i(k)$, $k = 0, 1, \dots, N^2 - 1$ with the codeword length $n' = 2 \log_2 N$, while the two-dimensional Walsh-Hadamard transform of the matrix X corresponds, up to a coefficient $\frac{1}{N}$, to the one-dimensional Walsh-Hadamard transform of the vector Y , which is formed by a sequential concatenation of matrix X rows, which proves the **Statement 2**.

Let us also consider a specific example of the operation of **Statement 2** using the direct expansion of the product (5), which, for example, we perform for matrices W, X, H_4 of order $N = 4$

$$W = H_N X H_N^T = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{N} \begin{bmatrix} x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + & x_{11} - x_{12} + x_{13} - x_{14} + x_{21} - x_{22} + x_{23} - x_{24} + \\ +x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} & +x_{31} - x_{32} + x_{33} - x_{34} + x_{41} - x_{42} + x_{43} - x_{44} \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} - x_{21} - x_{22} - x_{23} - x_{24} + & x_{11} - x_{12} + x_{13} - x_{14} - x_{21} + x_{22} - x_{23} + x_{24} + \\ +x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} - x_{41} - x_{42} - x_{43} - x_{44} & +x_{31} - x_{32} + x_{33} - x_{34} - x_{41} + x_{42} - x_{43} + x_{44} \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} - & x_{11} - x_{12} + x_{13} - x_{14} + x_{21} - x_{22} + x_{23} - x_{24} - \\ -x_{31} - x_{32} - x_{33} - x_{34} - x_{41} - x_{42} - x_{43} - x_{44} & -x_{31} + x_{32} - x_{33} + x_{34} - x_{41} + x_{42} - x_{43} + x_{44} \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} - x_{21} - x_{22} - x_{23} - x_{24} & x_{11} - x_{12} + x_{13} - x_{14} - x_{21} + x_{22} - x_{23} + x_{24} - \\ -x_{31} - x_{32} - x_{33} - x_{34} + x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} & -x_{31} + x_{32} - x_{33} + x_{34} + x_{41} - x_{42} + x_{43} - x_{44} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} x_{11} + x_{12} - x_{13} - x_{14} + x_{21} + x_{22} - x_{23} - x_{24} + & x_{11} - x_{12} - x_{13} + x_{14} + x_{21} - x_{22} - x_{23} + x_{24} + \\ +x_{31} + x_{32} - x_{33} - x_{34} + x_{41} + x_{42} - x_{43} - x_{44} & +x_{31} - x_{32} - x_{33} + x_{34} + x_{41} - x_{42} - x_{43} + x_{44} \\ x_{11} + x_{12} - x_{13} - x_{14} - x_{21} - x_{22} + x_{23} + x_{24} + & x_{11} - x_{12} - x_{13} + x_{14} - x_{21} + x_{22} + x_{23} - x_{24} + \\ +x_{31} + x_{32} - x_{33} - x_{34} - x_{41} - x_{42} + x_{43} + x_{44} & +x_{31} - x_{32} - x_{33} + x_{34} - x_{41} + x_{42} + x_{43} - x_{44} \\ x_{11} + x_{12} - x_{13} - x_{14} + x_{21} + x_{22} - x_{23} - x_{24} - & x_{11} - x_{12} - x_{13} + x_{14} + x_{21} - x_{22} - x_{23} + x_{24} - \\ -x_{31} - x_{32} + x_{33} + x_{34} - x_{41} - x_{42} + x_{43} + x_{44} & -x_{31} + x_{32} + x_{33} - x_{34} - x_{41} + x_{42} + x_{43} - x_{44} \\ x_{11} + x_{12} - x_{13} - x_{14} - x_{21} - x_{22} + x_{23} + x_{24} - & x_{11} - x_{12} - x_{13} + x_{14} - x_{21} + x_{22} + x_{23} - x_{24} - \\ -x_{31} - x_{32} + x_{33} - x_{34} + x_{41} + x_{42} - x_{43} - x_{44} & -x_{31} + x_{32} + x_{33} - x_{34} + x_{41} - x_{42} - x_{43} + x_{44} \end{bmatrix}$$

Performing sequential concatenation of the rows of matrices W and X , as well as writing down the coefficients near the elements x_{ij} in the

resulting matrix of expression (13), it is not difficult to rewrite expression (5) with respect to vectors V and Y of length N^2

$$V = \begin{bmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ w_{13} \\ w_{14} \\ w_{21} \\ w_{22} \\ w_{23} \\ w_{24} \\ w_{31} \\ w_{32} \\ w_{33} \\ w_{34} \\ w_{41} \\ w_{42} \\ w_{43} \\ w_{44} \end{bmatrix} = Y A_1 = \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{41} \\ x_{42} \\ x_{43} \\ x_{44} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & - & - & + & + & - & - & + & + & - & - & + & + & - & - \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & + & - & - & - & + & + & + & - & - & - & + & + & - & - \\ + & + & - & - & + & + & - & - & + & - & - & + & - & - & + & - \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & + & + & + & + & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + \\ + & + & + & - & - & - & + & + & + & - & - & - & + & + & + & - \\ + & + & - & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & + & - & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \\ + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - & + & - \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Analyzing expressions (13) and (14), we can conclude that each coefficient w_{ij} of the matrix of Walsh-Hadamard transformants shows the degree of "presence" in the X matrix of one or another frequency component, which represent all possible superpositions of rows of the original Walsh-Hadamard matrix H_4 . In this case, in view of the structural features of the Walsh-Hadamard matrices, these superpositions coincide with the rows of the Walsh-Hadamard matrix of order N^2 , i.e. in our case H_{16} .

This is not true for DCT matrices, i.e. for a given matrix C_N , the matrix A_1 does not correspond to the DCT matrix of order N^2 , in other words $A_1 \neq C_{N^2}$. However, performing calculations

similar to those performed in (13), it is not difficult to find a matrix A_1 for DCT as well.

Thus, as in the case of the Walsh-Hadamard transform, expression (1) can be rewritten with respect to row vectors P and Y of length N^2 obtained by sequential concatenation of the rows of matrices S and X , respectively.

Next, consider a specific example based on the DCT matrix of order $N = 4$ constructed in accordance with (2)

$$C_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.65 & 0.27 & -0.27 & -0.65 \\ 0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 \\ 0.27 & -0.65 & 0.65 & -0.27 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

for which we find a matrix A_1 , after which we rewrite expression (1) with respect to row vectors P and Y

$$P = \begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{12} \\ s_{13} \\ s_{14} \\ s_{21} \\ s_{22} \\ s_{23} \\ s_{24} \\ s_{31} \\ s_{32} \\ s_{33} \\ s_{34} \\ s_{41} \\ s_{42} \\ s_{43} \\ s_{44} \end{bmatrix} = YA_1 = \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{41} \\ x_{42} \\ x_{43} \\ x_{44} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0.25 & 0.33 & 0.25 & 0.14 & 0.33 & 0.43 & 0.33 & 0.18 \\ 0.25 & 0.14 & -0.25 & -0.33 & 0.33 & 0.18 & -0.33 & -0.43 \\ 0.25 & -0.14 & -0.25 & 0.33 & 0.33 & -0.18 & -0.33 & 0.43 \\ 0.25 & -0.33 & 0.25 & -0.14 & 0.33 & -0.43 & 0.33 & -0.18 \\ 0.25 & 0.33 & 0.25 & 0.14 & 0.14 & 0.18 & 0.14 & 0.07 \\ 0.25 & 0.14 & -0.25 & -0.33 & 0.14 & 0.07 & -0.14 & -0.18 \\ 0.25 & -0.14 & -0.25 & 0.33 & 0.14 & -0.07 & -0.14 & 0.18 \\ 0.25 & -0.33 & 0.25 & -0.14 & 0.14 & -0.18 & 0.14 & -0.07 \\ 0.25 & 0.33 & 0.25 & 0.14 & -0.14 & -0.18 & -0.14 & -0.07 \\ 0.25 & 0.14 & -0.25 & -0.33 & -0.14 & -0.07 & 0.14 & 0.18 \\ 0.25 & -0.14 & -0.25 & 0.33 & -0.14 & 0.07 & 0.14 & -0.18 \\ 0.25 & -0.33 & 0.25 & -0.14 & -0.14 & 0.18 & -0.14 & 0.07 \\ 0.25 & 0.33 & 0.25 & 0.14 & -0.33 & -0.43 & -0.33 & -0.18 \\ 0.25 & 0.14 & -0.25 & -0.33 & -0.33 & -0.18 & 0.33 & 0.43 \\ 0.25 & -0.14 & -0.25 & 0.33 & -0.33 & 0.18 & 0.33 & -0.43 \\ 0.25 & -0.33 & 0.25 & -0.14 & -0.33 & 0.43 & -0.33 & 0.18 \\ 0.25 & 0.14 & 0.25 & -0.33 & 0.33 & 0.43 & 0.33 & 0.18 \\ 0.25 & -0.14 & 0.25 & -0.33 & 0.33 & 0.18 & -0.33 & -0.43 \\ 0.25 & 0.14 & -0.25 & -0.33 & 0.33 & -0.18 & -0.33 & 0.43 \\ 0.25 & -0.14 & -0.25 & 0.33 & -0.14 & 0.07 & 0.14 & -0.18 \\ 0.25 & -0.33 & 0.25 & -0.14 & -0.14 & 0.18 & -0.14 & 0.07 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Using the obtained one-dimensional representation of the DCT, as well as the two-dimensional Walsh-Hadamard transform, we can establish a relationship between the transformants of both transforms. Note, however, that in view of the difference in the nature of the basis functions of the DCT and the Walsh-Hadamard transform, the effect of a change in one or another coefficient in the Walsh-Hadamard transform domain will affect a number of coefficients in the DCT domain, and vice versa.

Nevertheless, research shows that it is possible to establish the coefficients of DCT and the two-dimensional Walsh-Hadamard transform, which have the greatest influence on each other.

In accordance with the definition of the sequency [17], we find the values of the number of sign changes η for each row of the matrix A_1 (16), which we calculated for the transformants of the DCT of the matrix of order $N = 4$.

Data on the number of sign changes η for rows of matrix A_1 (16) are presented in Table 3.

Table 3

Values of η for the DCT matrix

No. of row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A_1 (16)	0	7	8	15	1	6	9	14	2	5	10	13	3	4	11	12

Analyzing the data presented in the Table 3, and comparing it with the data presented in Table 1, we can establish a correspondence between the sequencies (frequencies) of the basis functions of the DCT and the Walsh-Hadamard transform, thus making a conclusion about which of the

transformants of the Walsh-Hadamard transform leads to the greatest change in certain transformants of the DCT. For convenience, this correspondence will be written as the following expression

$$\begin{matrix}
 s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \\
 \updownarrow & \updownarrow \\
 w_{11} & w_{13} & w_{14} & w_{12} & w_{31} & w_{33} & w_{34} & w_{32} & w_{41} & w_{43} & w_{44} & w_{42} & w_{21} & w_{23} & w_{24} & w_{22}
 \end{matrix} \quad (17)$$

The obtained correspondence (17) completely coincides with the results presented in Fig. 2. Expression (17) allows us to establish a correspondence between the Walsh-Hadamard and DCT transformants, and also shows disturbance of which of the Walsh-Hadamard transformants affect the quality of the original image most of all.

III. CONNECTION BETWEEN THE WALSH-HADAMARD TRANSFORM AND THE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF A MATRIX

As already noted, formal sufficient conditions for ensuring the reliability of perception of a steganographic message have already been proposed earlier in the domain of singular value (spectral) decomposition (of blocks) of the container matrix [13], according to which the reliability of perception of a steganographic message will be ensured if singular vectors of matrix (blocks of matrix) of the container (eigenvectors of a symmetric matrix), perturbed as a result of the steganographic transformation, correspond to small singular values (small in absolute value eigenvalues of a symmetric matrix (symmetric matrix blocks)) or singular values that have small gaps (eigenvalues of a symmetric matrix (symmetric matrix blocks) that have small absolute gaps). In this case, the smaller the perturbations of the singular values (eigenvalues of the symmetric matrix), gaps (absolute gaps), and the singular values (absolute values of the eigenvalues of the symmetric matrix) that correspond to the perturbed singular vectors (eigenvectors of the symmetric matrix), the greater the probability of observance of the reliability of perception of steganographic messages. Moreover, in the case of applying a sufficient condition to the blocks of the matrix, the blocks are obtained by its standard partitioning [22].

In order of definiteness let us consider a complete set of parameters, which completely determines the DI and consists of a singular values and singular vectors set of non-intersecting $DI \ l \times l$ -blocks [13], an arbitrary one of which is B . The sufficient condition mentioned above, considering the fact that in the DI (digital video frame) matrix, the singular values are not simply related by the ratio: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$, but this ratio can be clarified

$$\sigma_1 \gg \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0, \quad (18)$$

in this case, the gap is calculated by the formula [21]: $svdgap(i, B) = \min_{j \neq i} |\sigma_i - \sigma_j|$, in accordance

with $svdgap(1, B) = \sigma_1 - \sigma_2 \gg svdgap(i, B), i > 1$, in this case, the gap of the smallest singular value can be significantly less than one (up to comparability with 0), which leads to the fact that the singular values mentioned in the sufficient condition is the lowest singular value. Consider the singular value decomposition of the matrix B in the form of outer products [21]

$$B = \sum_{i=1}^l \sigma_i u_i v_i^T, \quad (19)$$

giving a representation of B in the form of a sum of matrices of rank equal to one, each of which corresponds to its own singular triple (σ_i, u_i, v_i) . Taking this into account, as well as (18), the above sufficient condition can be formulated in a slightly different form: the reliability of perception of the steganographic message will be ensured in the case when, in the formal representation of the steganographic transformation in the domain of singular value decomposition of matrix blocks, this is expressed in a perturbation in matrices of rank equal to one corresponding to the smallest singular value in (19).

It should be noted that under a sufficient condition formulated in the domain of the singular value decomposition of a matrix, we do not have such a clear separation by frequency components as in the domain of DCT or Fourier transform, since each singular triple (and the corresponding matrix of rank one) carries information about all frequencies, but in varying degrees. So, the singular triples, corresponding to the minimum / maximum / average singular values, correspond mainly to the high-frequency / low-frequency / mid-frequency components. The separation of frequencies between singular triples is "softer" than directly in the frequency domain, which gives advantages in steganography [13].

It can be assumed that the absence of a clear division into frequencies will lead to a "softer" correspondence between the singular triples of the matrix and the elements of the Walsh-Hadamard transformants, and will give an opportunity for "greater maneuver" in the process of steganographic transformation, without impairing the reliability of perception of the steganographic message, expanding the possible transformation area.

For confirmation, a computational experiment was performed, in which many of the DI indicat-

ed above were involved. During the experiment, perturbations were introduced into the matrix $\sigma_4 u_4 v_4^T$ (for blocks of size 4×4), into matrices $\sigma_7 u_7 v_7^T$ and $\sigma_8 u_8 v_8^T$ (for blocks of size 8×8), and into matrices $\sigma_i u_i v_i^T$, $i \in \{13, 14, 15, 16\}$ (for blocks of size 16×16). As a result, the area of possible disturbance of the DI blocks in the Walsh-Hadamard transform domain was expanded, which makes it possible to preserve the

reliability of perception of the steganographic message (Fig. 5).

The resulting situation is absolutely natural. An additional expansion of the area of possible disturbance without violating the reliability of perception occurs, in fact, due to the use of elements that can already be attributed to those that correspond to the mid-frequency component, which, as it is known, with a significant probability does not violate the reliability of perception.

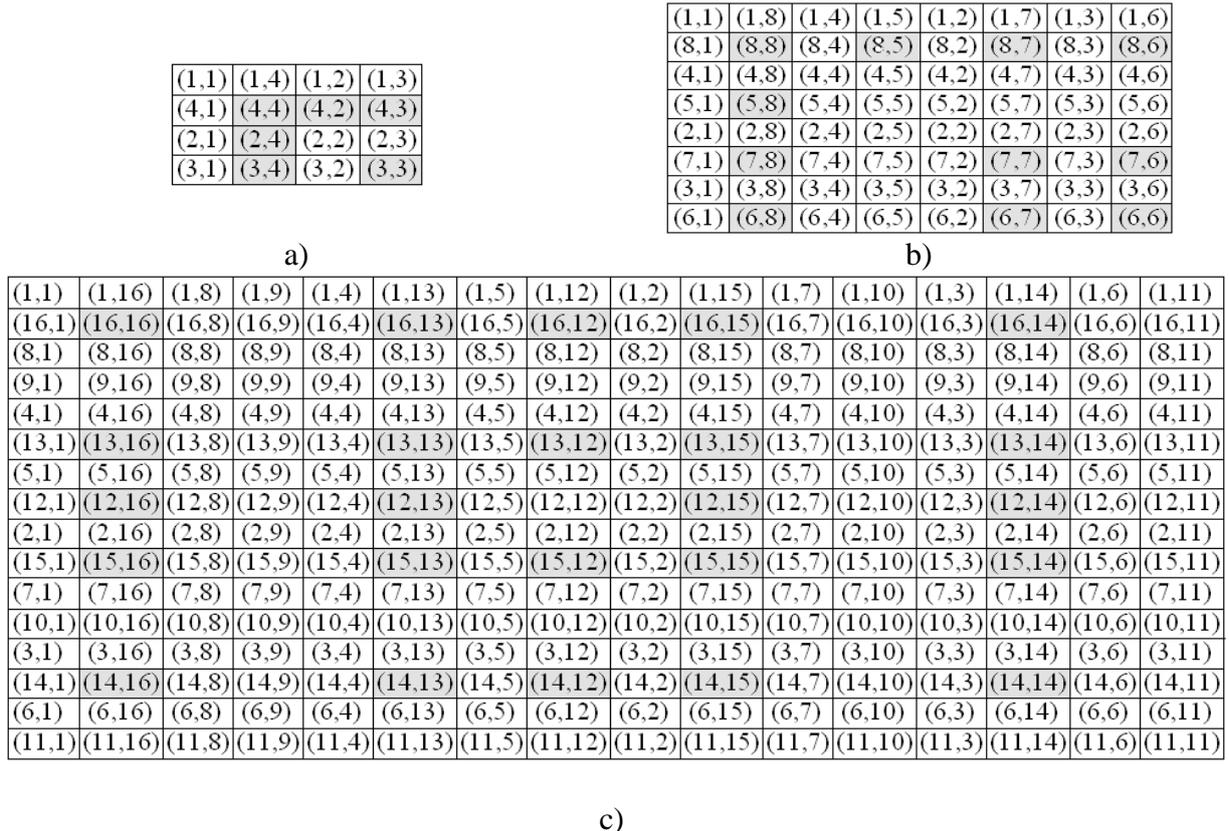


Fig. 5. Localization of the area of possible disturbance as a result of the steganographic transformation in the Walsh-Hadamard transform domain for $l \times l$ -blocks of the DI:
 a) $l = 4$; b) $l = 8$; c) $l = 16$

IV. A SUFFICIENT CONDITION FOR ENSURING THE RELIABILITY OF PERCEPTION OF A STEGANOGRAPHIC MESSAGE

Based on the results obtained in this paper, we can formulate *a sufficient condition for ensuring the reliability of perception of the steganographic message*. To ensure the reliability of perception of the steganographic message, it is sufficient to embed additional information in such a way that in the Walsh-Hadamard transform domain, its result would be a disturbance of

the elements, the localization of which is shown in Fig. 5 for $l \times l$ -blocks of size $l \in \{4, 8, 16\}$, while the embedding process itself can be implemented not only directly in the Walsh-Hadamard transform domain, but also in any other domain of the container (spatial, transformation). If it is necessary to use blocks of a different size, it is recommended to perform embedding to the DI in such a way that the result would be a perturbation of the elements in the Walsh-Hadamard transform domain within the boundaries of the second column and the second

row of the transformant matrix. For a more accurate localization of possible disturbances, it is necessary to perform additional research considering **Condition A**.

For practical verification of the obtained sufficient condition, a computational experiment was performed, in which DI from the previously listed bases were involved. Perturbations were introduced into the block matrix in the Walsh-

Hadamard transform domain. The perturbations of each element were taken from the set $\{+1, -1\}$, considering the fact that during organizing a covert communication channel, additional information, as a rule, is a binary sequence. The experiment was performed for blocks of size 8×8 . The results are presented in Table 4.

Table 4

The results of the embedding of the information in the Walsh-Hadamard transform domain

Perturbed block elements in the Walsh-Hadamard transform domain	(2,2)	(2,6)&(6,2)	(2,8)/(8,2)	(2,4)&(4,2)	(2,2)&(2,8)&(8,2)&(2,6)&&(6,2)&(2,4)&(4,2)	(6,6)	(8,8)	(6,6)&(6,8)&(8,6)&(8,8)	(2,2)&(2,8)&(8,2)&(2,6)&&(6,2)&(2,4)&(4,2)&&(6,6)&(6,8)&(8,6)&&(8,8)
PSNR (dB)	48.1	45.2	45.1	45.1	39.7	48.0	48.0	42.1	37.7

The results obtained are in full agreement with the theoretical conclusions, practically confirm the effectiveness of the obtained sufficient condition for ensuring the reliability of the perception of the steganographic message.

A visual illustration is shown in Fig. 6, where the magnitude of the perturbation of the elements in the matrices, which are the result of the Walsh-Hadamard transform of the DI 8×8 -blocks, was ± 1 . Artifacts or differences of the original from the perturbed DI (Fig. 6, b)) are not detected by subjective ranking.

V. A SUFFICIENT CONDITION FOR ENSURING THE RELIABILITY OF PERCEPTION OF A STEGANOGRAPHIC MESSAGE

Note that the obtained sufficient condition, because of the mathematical approach used, makes it possible to prevent local violations of the reliability of perception associated not only with the steganographic transformation, which was already mentioned in the introduction (Fig. 1), and where the difference indicators are often insufficient. An illustration of this is shown in Fig. 7, where the brightness value of only one pixel is changed on the original DI.

With significant DI sizes, such a change is not visually detected in the image at all, but it can be detected with a more thorough visual analysis, including the use of existing software tools.

Analyzing the 8×8 -block B containing the changed pixel, it was found that all the elements in the Walsh-Hadamard transform domain underwent changes, the disturbances of which were ≈ 3.1 (matrix (5) for block B , the absolute values of the elements (except for (1,1)) are less than 1, as it is shown in (20)), which does not satisfy the obtained sufficient condition and, as expected, leads to the possibility of establishing a violation of the reliability of perception. Note that such a local violation of the reliability of perception could not be detected even if the difference indicator was applied separately for each block, which is proposed, for example, in [23]. Indeed, the authors of the method for quantitatively assessing of the reliability of the perception of a digital image, taking into account the specificity of the difference indicators, recommend to first divide the DI into non-overlapping blocks, the sizes of which are comparable with size 128×128 pixels (otherwise the technique may be ineffective), and take the minimum PSNR value for all used blocks as a quantitative estimate.



Fig. 6. Effectiveness illustration of the obtained sufficient condition for ensuring the reliability of perception of the steganographic message: a) the original DI; b) DI obtained as a result of perturbation of all elements of the second column and second row in each block, which is the Walsh-Hadamard transformants of DI 8×8-blocks



Fig. 7. Local changes of the DI: a) the original image with the selected original 8×8-area; b) image, the integrity of which is violated within the selected 8×8-area

$$W = \begin{bmatrix} 251.0781 & 0.1094 & 0.1719 & 0.3281 & -0.2656 & 0.0156 & -0.0469 & -0.0156 \\ -0.0156 & 0.0156 & -0.0469 & -0.0156 & -0.1094 & 0.0469 & -0.0156 & 0.0156 \\ 0.0781 & -0.0156 & -0.0781 & -0.0469 & -0.3281 & 0.0781 & 0.1406 & 0.0469 \\ -0.1406 & 0.0156 & 0.0781 & -0.0156 & -0.0469 & -0.0156 & 0.0469 & -0.0469 \\ -0.1719 & 0.1094 & 0.2969 & -0.0469 & -0.3906 & 0.1406 & 0.3281 & 0.1094 \\ 0.0469 & 0.0781 & 0.0156 & 0.0469 & 0.0781 & -0.0156 & 0.0469 & 0.0781 \\ 0.0156 & 0.0469 & 0.1094 & 0.0156 & -0.0156 & 0.0156 & 0.0781 & 0.1094 \\ 0.1094 & -0.1094 & -0.0469 & -0.0156 & 0.0781 & -0.0156 & -0.0781 & -0.0469 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

But in the case of very small local changes in the DI, as, for example, shown in Fig. 7, the block size makes it impossible to quantitatively indicate a local violation of the reliability of perception: here the PSNR for a block containing a disturbed pixel was 46.5 dB.

Thus, the obtained sufficient condition can be used not only to ensure the reliability of perception of the steganographic message, but also as a tool that will make it possible, even in the absence of a visual picture, to draw conclusions about the possible appearance of artifacts in the image or digital video frame with a high proba-

bility, including, in a small local area (up to one pixel change).

VI. CONCLUSIONS

Let's note the main results of the performed research:

1. The relationship between the Walsh-Hadamard transform and the Discrete Cosine Transform is established, which is theoretically substantiated in two ways: by considering the correspondence between the Walsh-Hadamard functions and harmonics, and also by establish-

ing a correspondence between the two-dimensional and one-dimensional Walsh-Hadamard transforms. Both methods gave the same results, which are confirmed by the conducted empirical research. At the same time, the specific localization of transformants, which correspond to high-frequency components for Walsh-Hadamard matrices is derived for practically valuable sizes $N = 4, 8, 16$.

2. A connection between the transformants of the Walsh-Hadamard transform and singular triples (blocks) of the DI matrix was established, which made it possible, using the existing sufficient condition to ensure the reliability of the perception of a steganographic message in the domain of singular value decomposition of the matrix, to expand the area of possible disturbances as a result of the steganographic transformation in the Walsh-Hadamard transform domain, compared to that which was determined only by high-frequency components.

3. On the basis of the performed research, a sufficient condition was obtained to ensure the reliability of perception of the steganographic message in the Walsh-Hadamard transform domain, which can be used regardless of the domain of the container (spatial, transformation) where additional information is embedded.

4. The obtained sufficient condition allows us to draw conclusions about the possible (with a high probability) appearance of artifacts in the image, frame of digital video, including in a small local area (up to a change in one pixel), even in the case when visually these changes are not easily visualized on the DI.

The results obtained in this paper, together with the advantages of the Walsh-Hadamard transform, such as the fact that the elements of its basis vectors belong to the binary alphabet, as well as the simplicity of constructing transform matrices, determine the prospects for the development and practical application of the Walsh-Hadamard transform for estimating the effectiveness of existing steganographic methods, as well as development of new promising methods for steganography and steganalysis.

References

- [1] Tao J. et al. Towards robust image steganography, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(2), pp. 594-600. doi: 10.1109/tcsvt.2018.2881118
- [2] Veena S.T., Arivazhagan S. Universal secret payload location identification in spatial LSB stego images, *Annals of Telecommunications*, 2019, 74, pp. 273-286. doi: 10.1007/s12243-018-0676-x
- [3] Cheddad A., Condell J., Curran K., Mc.Kevitt P. Digital image steganography: Survey and analysis of current methods, *Signal processing*, 2010, Vol. 90, No. 3, pp. 727-752. doi: 10.1016/j.sigpro.2009.08.010
- [4] Reddy H.S.M., Raja K.B. High capacity and security steganography using discrete wavelet transform, *International Journal of Computer Science and Security (IJCSS)*, 2009, Vol. 3, No. 6, pp. 462-472.
- [5] Patel H., Dave P. Steganography technique based on DCT coefficients, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, Vol. 2, No. 1, pp. 713-717.
- [6] Soni A., Jain J., Roshan R. Image steganography using discrete fractional Fourier transform, 2013 *International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*, IEEE, 2013, pp. 97-100. doi: 10.1109/issp.2013.6526882
- [7] Subhedar M.S., Mankar V.H. High capacity image steganography based on discrete wavelet transform and singular value decomposition, *Proceedings of the 2014 International Conference on Information and Communication Technology for Competitive Strategies*, 2014, pp. 1-7. doi: 10.1145/2677855.2677918
- [8] Sheidaei H., Zolfaghari B., Zobeiri M. An Efficient and Secure Approach to Multi-User Image Steganography Using CRC-Based CDMA, *International Conference on Signal Acquisition and Processing*. Singapore, 2011. Vol. 2. pp. 1-5.
- [9] Bhattacharyya S., Mondal S., Sanyal G. A Robust Image Steganography using Hadamard Transform, *International Conference on Information Technology in Signal and Image Processing*, Mumbai, 2013, pp. 416-426.
- [10] Karampidis K., Kavallieratou E., Papadourakis G. A review of image steganalysis techniques for digital forensics, *Journal of Information Security and Applications*, 2018, 40, pp. 217-235. doi: 10.1016/j.jisa.2018.04.005
- [11] Saleh M.E., Aly A.A., Omara F.A. Data security using cryptography and steganography techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, 7(6), pp. 390-397.
- [12] Konakhovich G.F., Puzyrenko A.Yu. *Computer steganography. Theory and Practice*, Kiev: MK-Press, 2006, 288 p.
- [13] Kobozeva A.A., Khoroshko V.A. *Information security analysis*. Kiev: Ed. of the State University of Telecommunications, 2009, 251 p.
- [14] Lu Leng, Jiashu Zhang, Jing Xu et al. Dynamic weighted discrimination power analysis: A novel approach for face and palmprint recognition in DCT domain, *International Journal of Physical*

- Sciences, 2010, No. 5(17), pp. 467-471. doi: 10.1109/ictc.2010.5674791
- [15] Logachev O.A., Salnikov A.A., Iashchenko V.V. Boolean functions in coding theory and cryptography, American Mathematical Soc., 2012, 241 p.
- [16] Mazurkov M.I. Broadband radio communication systems, Odessa: Science and Technology, 2010, 340 p.
- [17] Bazhenov A.V. Digital methods for the implementation of space-time signal processing in aviation radio-electronic complexes, Stavropol: SVVAIU, 2006, 219 p.
- [18] NRCS Photo Gallery // United States Department of Agriculture. URL: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/newsroom/multimedia/>
- [19] 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. doi: 10.1145/1774088.1774427
- [20] Hsu Y., Chang S. Detecting image splicing using geometry invariants and camera characteristics consistency, 2006 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Toronto, 2006, pp. 549-552. doi: 10.1109/icme.2006.262447
- [21] Demmel J.W. Applied Numerical Linear Algebra, Siam, 1997, 416 p. doi: 10.1137/1.9781611971446
- [22] Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing, Pearson; 4th edition, 2017, 1192 p.
- [23] Narimanova O.V. et al. Technique of quantitative assessment of digital image perception reliability, Informatics and mathematical methods in simulation, 2014, Vol. 4, No. 4, pp. 332-336.

Information about authors.



Kobozeva Alla Anatolyevna. Odessa Polytechnic National University. Department of Cybersecurity and Software, Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Research interests include information security, in particular, steganography, information content integrity expertise.
E-mail: alla_kobozeva@ukr.net



Sokolov Artem Viktorovich. Odessa Polytechnic National University. Department of Cybersecurity and Software, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Research interests include information security methods based on perfect algebraic constructions.
E-mail: radiosquid@gmail.com

Anaerobic Digestion Combined with Electrolysis of Poultry Manure and Activated Sludge Inoculum

Chernysh Y.Yu.^{1,2,3}, Shtepa V.N.², Plyatsuk L.D.^{1,2}, Chubur V.S.^{1,3}, Danylov D.V.¹

¹Sumy State University
Sumy, Ukraine

²International Innovation and Applied Center "Aquatic Arteria",
Sumy, Ukraine

³Czech University of Life Sciences Prague,
Prague, Czech Republic

Abstract. The aim of the work was to study the effect of electrolysis on the process of anaerobic digestion in the example of poultry manure with an inoculum of activated sludge from a municipal wastewater treatment plant. The set aim was achieved by solving the following tasks: microscopy of anaerobic activated sludge during the digestion of poultry manure under the influence of electrolysis treatment; studying the dynamics of biogas yield and its component composition under electrolysis treatment; studying the change in pH values and redox potential (ORP) in experiments with a combination of a bioreactor with electrolysis treatment and without treatment. Evaluation of the effect of stimulating the metabolic activity of microorganisms during treatment in the bioreactor-electrolyser was the most significant result. In addition, improved biodegradability of complex organic components of poultry manure was substantiated. Thus, methane yield on the 28th day was 640.5 ml from the total volume of 1525 ml of biogas, and under conventional conditions, methane yield was 33.4 ml from 50 ml of total volume. The decrease of H₂S content in biogas under the influence of electrolysis was determined. A low ORP value of - 495 mV was achieved in the control experiment (without electrolysis treatment). ORP gradually increased in the bioreactor-electrolyser at all stages of digestion and reached -53 mV on day 28. pH stabilized at a neutral level. The positive effect of combining anaerobic digestion with electrolysis on the intensification of biogas production with a large volume of methane has been experimentally confirmed.

Keywords: biogas, electrolysis, anaerobic digestion, activated sludge, manure, intensification.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.09>

UDC: 628.385

Fermentația anaerobă a gunoiului de pasăre cu inocul de nămol activat în combinație cu tratarea prin electroliză

Cernâș Y.Yu.^{1,2,3}, Ștepa V.N.², Pliățuk L.D.^{1,2}, Ciubur V.S.^{1,3}, Danilov D.V.¹

¹ Universitatea de Stat Sumy, Sumy, Ucraina,

²Centrul internațional de inovare și aplicații "Vodnaya Arteria",
Sumy, Ucraina

³Universitatea Cehă de Științe ale Vieții din Praga,
Praga, Republica Cehă

Rezumat. Scopul lucrării este de a studia efectele electrolizei în procesul de fermentație anaerobă, pe exemplul gunoiului de pasăre cu inocul de nămol activat provenit de la stațiile municipale de epurare a apelor uzate. Scopul stabilit este atins prin rezolvarea următoarelor sarcini: microcopierea nămolului activat anaerob în timpul fermentației gunoiului de pasăre sub influența tratării prin electroliză; studiul dinamicii randamentului biogazului și al compoziției componentelor acestuia în timpul tratării prin electroliză; studiul modificărilor pH-ului și a potențialului Redox (ORP) în experimentele cu combinația de bioreactor cu tratare prin electroliză și fără tratare. Cel mai semnificativ rezultat a fost acela, că în timpul tratării în electrolizatorul bioreactorului, biodegradabilitatea componentelor organice ale substratului s-a îmbunătățit, ceea ce a dus la obținerea unei cantități sporite biogaz, astfel încât producția de biogaz a fost de 1525 ml în ziua 28 din 640,5 ml de metan, iar în condiții standard, deja în ziua 28, producția de biogaz a scăzut semnificativ la 50 ml, din care 33,4 ml de metan. În același timp, în experimentul de control (fără tratare prin electroliză) s-a atins o valoare scăzută a ORP de până la -495 mV, în timp ce în electrolizatorul bioreactorului ORP a crescut treptat în timpul tuturor etapelor de fermentație, iar în a 28-a zi a ajuns la -53 mV, valoarea pH-ului s-a stabilizat la un nivel neutru. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul, că a fost confirmat experimental efectul pozitiv al furnizării suplimentare

de hidrogen exogen în timpul tratării prin electroliză asupra intensificării producției de biogaz, precum și faptul că această tratare a contribuit la eliminarea agenților patogeni, obținându-se nămoluri solide sigure, care pot fi utilizate ulterior ca biofertilizator pentru agricultură.

Cuvinte-cheie: biogaz, electroliză, fermentație anaerobă, nămol activat, gunoi de pasăre, intensificare

Анаэробное сбраживание птичьего помета с инокулятом активного ила в комбинации с электролизной обработкой

Черныш Е.Ю.^{1,2,3}, Штепа В.Н.², Пляцук Л.Д.^{1,2}, Чубур В.С.^{1,3}, Данилов Д.В.¹

¹Сумской государственной университет, Сумы, Украина

²Международный инновационно-прикладной центр «Водная Артерия», Сумы, Украина

³Чешский университет естественных наук в Праге,

Прага, Чешская Республика

Аннотация. Целью работы является изучение эффектов электролизного воздействия в процессе анаэробного сбраживания, на примере птичьего помета с инокулятом активного ила с городских очистных сооружений. Поставленная цель достигается за счет решения следующих задач: микропирование анаэробного активного ила в процессе сбраживания птичьего помета при воздействии на него электролизной обработки; изучение динамики выхода биогаза и его компонентного состава при электролизной обработке; изучение изменения значений рН и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в экспериментах с комбинацией биореактора с электролизной обработкой и без обработки. Наиболее существенным результатом является определение в процессе обработки в биореакторе-электролизере эффекта стимулирования метаболической активности эколого-трофических групп микроорганизмов с получением большего количества биогаза при поступлении экзогенного водорода и улучшении биodeградируемости сложных органических компонентов птичьего помета, так его объем выхода составил на 28 сутки 640,5 мл метана из 1525 мл, а в стандартных условиях уже на 28 сутки выход биогаза было 33,4 мл метана из 50 мл общего объема. Также выявлено значительное уменьшения H₂S в биогазе при воздействии электролиза, а именно более чем в 10 раз в сравнении со стандартными условиями анаэробного сбраживания. При этом в контрольном эксперименте (без электролизной обработки) достигалось низкое значение ОВП до - 495 мВ, в биореакторе-электролизере ОВП постепенно возрастало в течении всех этапов сбраживания и на 28 сутки приобрело значение -53 мВ, рН стабилизировалось на нейтральном уровне. Значимость полученных результатов состоит в том, что экспериментально подтвердили положительный эффект комбинации анаэробного сбраживания с электролизной обработки на интенсификацию производство биогаза с большим объемом метана, а именно электрический разряд, воздействуя на рост метанообразующих микроорганизмов, позволяет получить энергию за счет восстановления CO₂ до метана, при этом как акцептор электронов выступает экзогенный H₂.

Ключевые слова: биогaz, электролиз, анаэробное брожение, активный ил, помет, интенсификация.

ВВЕДЕНИЕ

Растущее количество птицефабрик оказывает значительное экологическое влияние на окружающую среду. Основным загрязнителем окружающей среды является птичий помет, нерациональное обращение с которым отрицательно сказывается на состоянии гидросферы, атмосферы и почвы. Одним из способов его рационального использования является анаэробное сбраживание, обеспечивающее получение биоэнергии и высококачественного биологического удобрения [1].

Одним из приоритетных направлений развития возобновляющих источников энергии являются процессы анаэробного сбраживания отходов, которые направлены на повышение выхода биогаза и доли содержания в нем метана. Сегодня

биоэнергетика является одной из ведущих областей возобновляемых источников энергии в мире. Одним из направлений ее развития являются биогазовые технологии, основанные на процессе анаэробного сбраживания различных органических отходов и энергетических культур. При этом технические разработки в этой сфере направлены на повышения выхода биогаза и его качества [2-5].

Процессы электроокислительной обработки все чаще становятся предметом исследований в области обращения с органическими отходами, осадками сточных вод, активным илом в комбинации с биопроцессами [6, 7, 8]. Стоит отметить, что в исследовании [9] использовали электрод из алмаза, легированного бором, для повышения скорости гидролиза за счет разрушения

клеточных стенок активного ила. Материал электродов дорогостоящий, поэтому удешевление процесса и решения ряда других технических задач остается открытым. Следует отметить, что имеется ограниченное количество работ посвященных использованию использования электролизной обработки для улучшения производства биогаза, о чем также свидетельствуют статистические данные полученных в БД Scopus и Web of Science (рис.1).

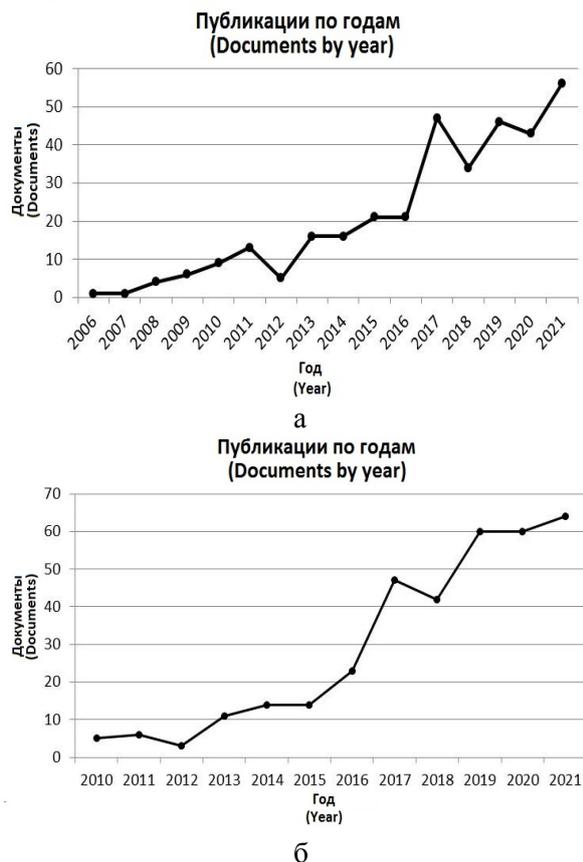


Рис. 1. Активность публикаций, ключевые слова "биогаз" и "электролиз": (а) база данных Scopus; (б) база данных Web of Science.
Fig. 1. Publication frequency, keywords "biogas" and "electrolysis": (a) Scopus database; (b) Web of Science database.¹

Однако стоит отметить, что возрастает интерес к данной области исследований и появляется в текущее время все больше работ, связанных с изучением влияний электролизных процессов на анаэробное сбраживание, специфику преобразования активного ила при таком воздействии и выход биогаза [10-13]. В исследовании Heng et al (2021) [14] продемонстрировано, что электрохимическая предварительная обработка способна улучшить дезинтеграцию и обезвоживание

активного ила путем увеличения растворимой органической фракции или ХПК, и в то же время уменьшить концентрацию твердых частиц и время капиллярного всасывания. Кроме того, также продемонстрировано, что интеграция оптимально работающей системы электрохимического анаэробного сбраживания в качестве стратегии предварительной обработки активного ила способна повысить скорость производства и мощность биогаза на 44-67% по сравнению с традиционным процессом, использующим только анаэробное сбраживание [14]. При этом стоит отметить, что авторы изучали процесс преобработки электролизной, что имеет ограниченное воздействие только на первую стадию анаэробного сбраживания. Поэтому выявления закономерностей и периодичности электролиза в процессе биоконверсии органических веществ остается актуальным и наше исследование именно на это и направлено.

Аспект эффективного регулирования потока электронов рассматривался в работе Gao et al (2021) [15] возможности ускорения биodeградации и метаногенеза благодаря микробному электролизу по сравнению с обычным анаэробным сбраживанием. Однако его реальное применение и расширение масштабов требует полного понимания и дальнейшего изучения размеров и распределения электродов. Достаточное время контакта, хорошее поле потока и соответствующая площадь поверхности электродов - три эффективных метода повышения эффективности удаления органики и увеличения производства метана, а также цели проектирования реакторов. Учитывая удаление органических веществ, извлечение метана, генерацию электронов и расход материала, рекомендуемое соотношение площади катода составило 1,33 см²/см³. Это подтверждено также в [16-17]. Но требует дальнейшего изучения оптимизация конфигураций катодной и анодной зон, а также упрощения конструктивных решений для их внедрения в промышленные масштабы, что является частью нерешенной задачи на сегодня.

Результаты исследования Li et al (2021) [18] показывают, что значительное увеличение производства летучих жирных кислот может быть достигнуто при ацидогенной ферментации с электрической поддержкой, и при вторичной ацидогенной

¹ Appendix 1

ферментации посредством подачи напряжения. Рассмотрено, что подача напряжения осуществляет ресолюбилизацию и гидролиз органики осадка путем разрыхления структуры осадка (изменения значений фрактальной размерности и соответствующих функциональных групп) и стимулирования активности соответствующих ферментов (т.е. протеаз и α -глюкозидаз) [18]. Однако данные этого исследования направлены на изучения эффекта стимулирования выделения жирных кислот при воздействии электрического тока в процессе анаэробного сбраживания и не оказывают эффект на производительность по биогазу.

Для повышения производительности метана из активного ила отходов была предложена Bao et al (2021) [19] комбинированная система микробной электролизной ячейки и анаэробного сбраживания (AD). При этом в качестве методов предварительной обработки в комбинированной системе микробной электролизной ячейки и анаэробного сбраживания применялись щелочь, ультразвук и щелочь, высокотемпературная микроаэрация для дезинтеграции флокул осадков сточных вод и разрушения бактериальных клеток. Полученные результаты показали, что органические вещества окислялись микроорганизмами на аноде, а водород синтезировался на катоде. После этого водород использовался в качестве субстрата для гидрогенотрофных метаногенов для стимулирования производства метана. Соответственно, по сравнению с простым реактором AD, система MEC-AD имеет больше преимуществ в преобразовании энергии отработанного активного ила, а добавление биоэлектрохимической системы может способствовать производству метана [19]. Однако такая техническая система является более сложной при реализации и дорогостоящей.

Как указано в исследовании Jafari и Botte (2021) [20], где изучался электрохимический метод в щелочной среде для разрушения структуры осадка при комнатной температуре, было достигнуто снижение общего количества твердых веществ на 24,85% и летучих твердых веществ на 46,42%, что примерно на 25% снижает стоимость утилизации осадка по сравнению с традиционными методами обработки. В работе Chandrasekhar Kupram et al (2017) [21] было обосновано возможность использования

темновой ферментации вместе с комбинацией микробной электролизной ячейкой с интенсификацией выхода водорода [21], однако важным направлением является усиление метаногенеза. В наших предыдущих исследованиях (Shtepa et al., 2021) [22] было обосновано факторы взаимосвязи влияния передовых технологий окисления на эффективность работы ассоциации микроорганизмов активного ила. Следует отметить, что система электрохимического анаэробного сбраживания обеспечивает более качественный эффлюент и увеличивает производство биогаза. Развитие этой темы в этом исследовании имеет большой потенциал, учитывая, что оптимизация важных переменных процесса может повысить деструкцию органических отходов и производство биогаза для более целесообразного применения в промышленном процессе, что требует дальнейшего изучения. Кроме того, в нашем исследовании акцент ставится на поиск наиболее простого решения комбинации биореактора и электролизера с выявлением эффектов электролизной обработки при анаэробном сбраживании в заданном режиме во время обработки птичьего помета с активным илом, что в предыдущих исследованиях не приводилось.

Таким образом, целью данной работы является изучение эффектов электролизного воздействия в процессе анаэробного сбраживания, на примере птичьего помета с инокулятом активного ила с городских очистных сооружений. Поставленная цель достигается за счет решения следующих задач:

- микрокопирование анаэробного активного ила в процессе сбраживания птичьего помета при воздействии на него электролизной обработки;
- изучение динамики выхода биогаза и его компонентного состава при электролизной обработке;
- изучение изменения значений рН и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в экспериментах с комбинацией биореактора с электролизной обработкой и без нее.

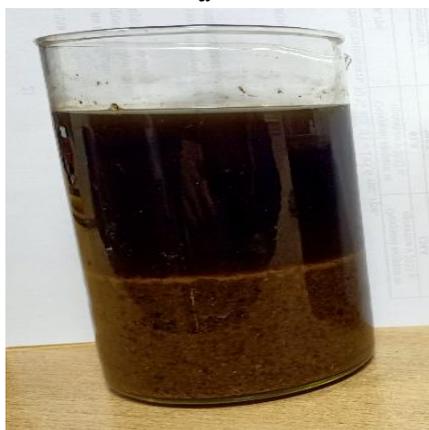
I. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика субстрата – птичьего помёта.

В качестве субстрата использовался перепелиный помет из фермерского хозяйства (рис. 2).



а



б

а – в первичном виде; б – после разведения до влажности 85%.

Рис. 2. Образцы перепелиного помета.

а – raw; б – after dilution to a moisture content of 85%

Fig. 2. Samples of quail manure.²

Перепелиный помет содержит в себе большое количество соединений N и имеет характерный аммиачный запах. Влажность сырого помета составляет 71,21%, для использования в биореакторе влажность была дополнительно повышена до 85%. Помет является слаборастворимым в воде веществом. Расслоение с осаждением твердой фазы происходит за 10-15 минут.

Для предварительной обработки субстрата перепелиного помета использовали разведение 400 грамм сырого помета в 2600 мл трубопроводной воды и температурную инкубацию при 35°C в течение 48 часов в анаэробных условиях без света. Внешний вид помета темно-коричневый, рассыпчатая масса, со специфическим запахом, имеет вкрапления песка, перьев и растительных остатков (рис. 1). Массовая доля воды 55%.

Основные макроэлементы: азот – 0,7%, фосфор – 0,8% и калий – 0,85%. Исходные параметры: водородный показатель (pH) 9,03; окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) -425 мВ; общее содержание растворенных твердых веществ (общая минерализация) (TDS) 604 ppm.

Характеристика инокулята – активного ила

Использовался избыточный активный ил из систем очистки городских сточных вод из иловой камеры.

Предварительная обработка избыточного активного ила требовала температурной инкубации при 35°C в течение 48 часов в анаэробных условиях без света. Параметры, полученные для инокулята: pH 6,90; ОВП -390 мВ; TDS 112ppm.

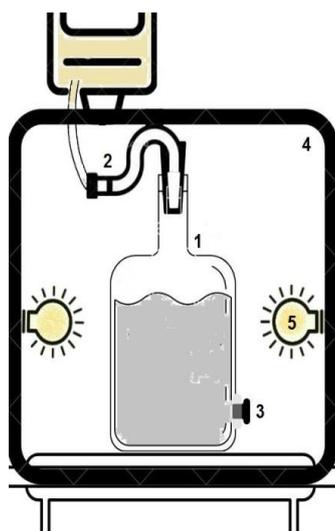
Лабораторные экспериментальные установки

Биореактор классического типа

Биореактор классического типа, который изображен на рис 3 создает условия, обеспечивающие жизнедеятельность нужных эколого-трофических групп микроорганизмов, состоит из герметично закрытой затемненной емкости (1), с газоотводящей трубкой (2). Материал емкости должен быть инертным по составу, а также светонепроницаемым. Газ из такого реактора собирается в пакеты через газоотводящий вывод сверху емкости, а также в придонной части реактора есть место для отбора проб сырья (3) в процессе сбраживания. Биореактор помещен в термокамеру (4) для поддержания постоянной температуры внутри реактора 35°C, что осуществляется за счет 2 ламп накаливания (5). Перемешивание реактора осуществляется механическим путем.

До помещения в ферментер исходный субстрат с инокулятом подготавливают различными методами предобработки. После предварительной подготовки в биореактор загружают предварительно рассчитанное количество субстрата и инокулята так, чтобы процент заполнения объема биореактора был 75%. Под факторами анаэробных условий, отсутствия света и мезофильного режима температуры набирают активность процессы анаэробного сбраживания загруженного в реактор сырья.

² Appendix 1



1 – емкость для анаэробного сбраживания; 2 – газоотводящая труба; 3 – отверстие для отбора проб; 4 – термокамера; 5 – лампы накаливания.

Рис. 3. Схематический вид лабораторного стенда биореактора классического типа.

1 – tank for anaerobic digestion; 2 – gassing tube; 3 – sampling opening; 4 – thermal chamber; 5 – incandescent lamps.

Fig. 3. Diagram of the laboratory bench-scale design of the classical bioreactor.³

Биореактор, скомбинированный с электролизной ячейкой (биореактор-электролизер)

Биореактор, скомбинированный с электролизной ячейкой (рис. 4) является емкостью (1) для анаэробного сбраживания с дополнительно встроенными в крышку с газоотводящим выходом (2) катодом (3) и анодом (4).

задача данного реактора не только обеспечивать условия для анаэробного сбраживания, а так же выполнять электролизную обработку субстратов в период осуществления процессов. Графитовые стержни выступают в качестве катода и анода, они разделены между собой мембраной (5) в соотношении 2/3 объема катодная часть и 1/3 объема реактора анодная часть. Также каждая часть биореактора имеет отдельный вывод для отбора проб в процессе сбраживания (6).

Электролизная обработка проводится путем подключения к электродам источника питания, который подает на них постоянный электрический ток силой 20 А в течении 5 минут один раз в день.

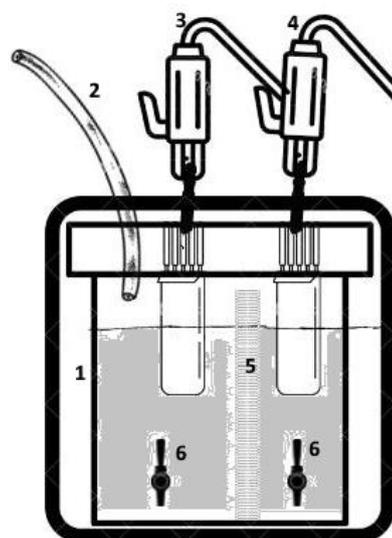
Данная частота обработки и режим была обусловлена уровнем производительности системы по водороду, так она позволяла

достичь стабильного выхода водорода на уровне не меньше 18,9-21,5% в составе биогаза и в дальнейшем преобразуется в метан, при этом во время

активного ила не было выявлено негативного воздействия на его биоценоз.

Этот режим обработки не был исследован ранее, соответственно является важным обосновать его эффективность работы.

На блок-схеме (рис. 5) обозначено этапы подготовки субстрата и инокулята с параметрами контроля процесса анаэробного сбраживания.



1 – емкость для анаэробного сбраживания; 2 – газоотводящая труба; 3 – катод; 4 – анод; 5 – мембрана; 6 – отверстия для отбора проб.

Рис. 4. Схематический вид лабораторного биореактора-электролизера.

1 – tank for anaerobic digestion; 2 – gassing tube; 3 – cathode; 4 – anode; 5 – membrane; 6 – sampling ports.

Fig. 4. Schematic diagram of laboratory bioreactor-electrolyzer.⁴

На всех этапах работы проводился отбор проб и измерения физико-химических параметров, таких как pH, ОБП, TDS, а также химическое потребление кислорода.

С начала периода газообразования состав биогаза анализировали газоанализатором Geotech BIOGAS 5000.

Также проводили микропирование образцов активного ила в процессе анаэробного сбраживания.

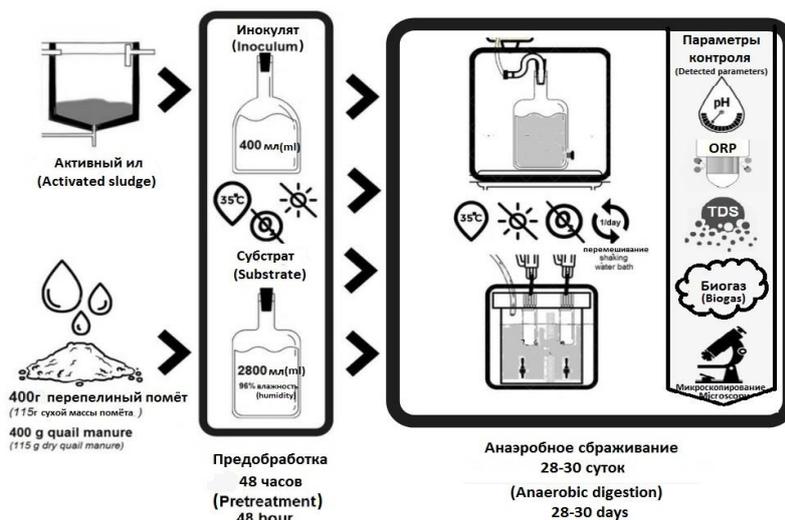


Рис. 5. Параметры контроля процесса анаэробного сбраживания в комбинации с электролизной обработкой.

Fig. 5. Anaerobic digestion process control parameters in combination with electrolysis.⁵

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хлопья активного ила (рис. 5) образуются в результате биофлокуляции бактерий. В перемешиваемой среде хлопья ила являются динамическими структурами: крупные хлопья разрушаются в турбулентном жидкостном потоке, мелкие хлопья при соударении слипаются в более крупные.

Как видно из рис. 6, структура анаэробного ила изменяется, под воздействием электрического тока токсичные или неразлагаемые вещества окисляются до

биоразлагаемых или полностью окисляются до CO_2 и H_2O . Об этом свидетельствует повышение выхода углекислого газа по сравнению с контрольным экспериментом (рис. 7). Следует отметить явные изменения в структуре жидкофазной среды развития эколого-трофических групп микроорганизмов и формированием новых структур кристаллической природы, что четко видно при увеличении 40x как в катодной, так и анодной зонах биореактора-электролизера (рис. 6).

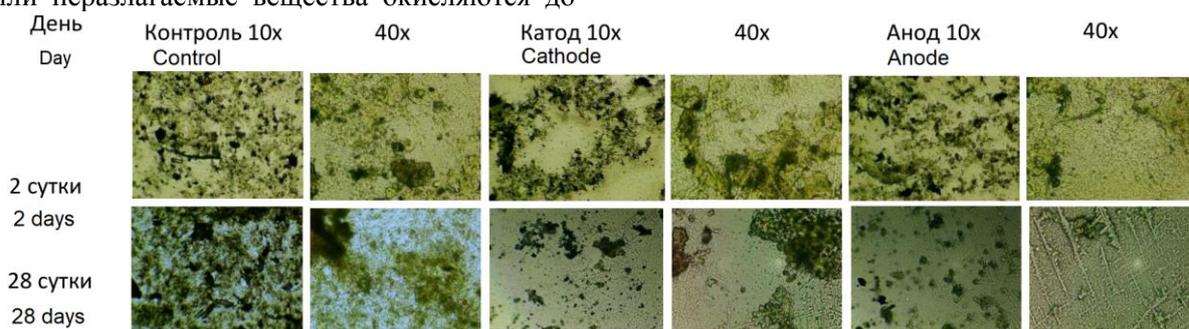


Рис. 6. Анаэробный активный ил в процессе сбраживания птичьего помета, световая микроскопия.

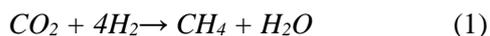
Fig. 6. Anaerobic activated sludge in poultry manure digestion process, light microscopy.⁶

Одним из наиболее значимых результатов, выявленным во время микропирования анаэробного активного ила после воздействия электролизной обработки является изменения в самом процессе агрегирования с

формирования ячеек скоплений колоний микроорганизмов с ответвлениями четкой очерченной формы. Это напрямую связано с реализацией цели данной работы, а именно с изучением эффектов электролизного

воздействия в процессе анаэробного сбраживания, на примере птичьего помета с инокулятом активного ила с городских очистных сооружений. Соответственно, определение изменения в структуре активного ила подтверждает качественные изменения в инокуляте как одного из эффектов в процессе обработки.

Наиболее существенным результатом при сравнении динамики выхода биогаза в процессе анаэробного сбраживания с электролизной обработкой и без нее является подтверждение положительного эффекта обработки на количественные показатели биогенного газообразования, что связано с интродукцией экзогенного водорода. Следовательно, электрический разряд, воздействуя на рост метанообразующих микроорганизмов позволяет получить энергию за счет восстановления CO₂ до метана, при этом как акцептор электронов выступает экзогенный H₂ по реакции:



В частности, на гидролитической стадии на 6 сутки 8,3% в биореакторе-электролизере была доля метана в биогазе, а на 8 сутки она возросла до 15,3%, при этом при стандартных условиях на 8 сутки % метана в биогазе не превышал 0,6%. Следует отметить, что на метаногенной стадии при стандартных условиях увеличился выход метана в биогазе до 68,7%, а при электролизной обработке он не превышал 53% (рис. 7).

Однако объем биогаза, который выходил из биореактора-электролизера, составил на 28 сутки 1525 мл из 640,5 мл метана, а в стандартных условиях уже на 28 сутки выход биогаза значительно упал до 50 мл, из которых 33,4 мл был метан.

Таким образом, на 28 сутки продуцирование биогаза в контрольном эксперименте практически приостановилось в связи исчерпанием ресурсов легкодоступных органических веществ для сбраживания. Существенным результатом экспериментов также является выявление значительного уменьшения H₂S в биогазе при воздействии электролиза, чем при стандартных (контрольных) условиях анаэробного сбраживания.

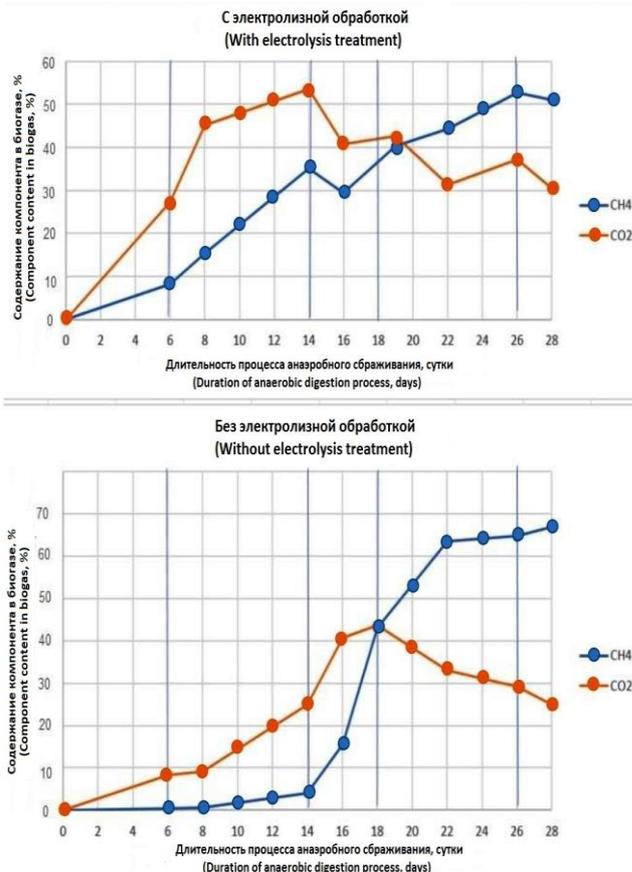


Рис. 7. Содержание метана и углекислого газа в составе биогаза.

Fig. 7. Methane and carbon dioxide content of biogas.⁷

Так, в биореакторе-электролизере первоначально концентрация сероводорода составляла более 5000 ppm, как и в контрольных условиях. Но в процессе ежедневной электролизной обработки концентрация H₂S снизилась на 14-й день до 487 ppm с дальнейшим понижением до 97 ppm на 26 сутки. В то же время, в контрольных условиях (без электролизной обработки) сероводород во все периоды анаэробного сбраживания превышал 5000 ppm.

Во время электролизной обработки происходит лизис накопленной микробной биомассы и труднорастворимых органических соединений, что допускаем могла способствовать сохранению продуктивности системы за биогазом (табл. 1).

⁷ Appendix 1

Таблица 1.⁸

Объем выхода биогаза и метана⁹

Время, сут./ Time, days	Биогаз (с электролизной обработкой)/ Biogas (with electrolysis treatment)	Биогаз (без электролизной обработки)/ Biogas (without electrolysis treatment)	CH ₄ (с электролизной обработкой)/ CH ₄ (with electrolysis treatment)	CH ₄ (без электролизной обработки)/ CH ₄ (without electrolysis treatment)
0	0	0	0	0
6	800	12	66,4	0,054
8	825	15	126	0,09
14	625	900	219,4	36,9
16	900	200	264,6	31
18	1100	2000	442,2	862
22	750	900	331,5	571,5
26	1000	700	527	452,9
28	1525	50	640,5	33,4
Суммарные значения, мл/ Total values, ml	6725	4777	2551,2	1987,944

На рис. 8 представлено сравнительный анализ объема выхода метана в биогазе с обработкой и без обработки электролизом.

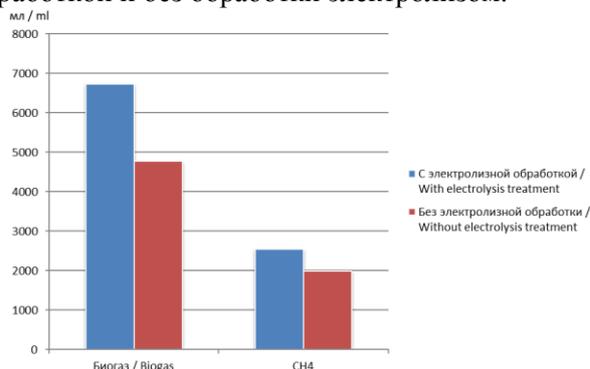


Рис.8. Сравнительная характеристика суммарного объема выхода биогаза и в нем метана за весь период сбраживания в экспериментах с комбинацией биореактора с электролизной обработкой (на катоде и аноде) и без обработки (контроль).

Fig.8. Comparative characteristics of the total yield of biogas and methane in it for the complete digestion period in the experiments with a combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control).¹⁰

На стадии гидролитической деструкции в факультативно анаэробных условиях увеличивается выход CO₂, было изначальное смещение в щелочную сторону pH и дальнейшая стабилизация на 4-6 сутки на нейтральном уровне, что было характерно,

как и в стандартных условиях, так и при проведении электролизной обработки во время анаэробной ферментации (рис. 9).

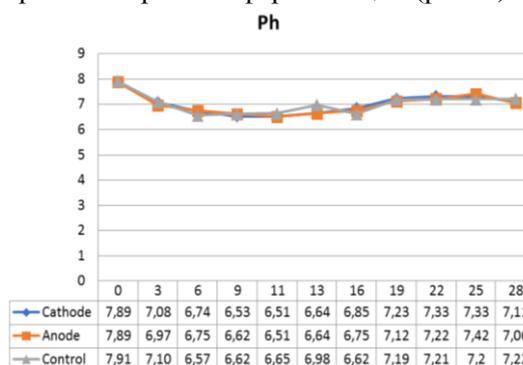


Рис.9. Сравнительная характеристика изменения значений pH в экспериментах с комбинацией биореактора с электролизной обработкой (на катоде и аноде) и без обработки (контроль).

Fig. 9. Comparative characterization of changes in pH values in experiments with a combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control).¹¹

ОВП измерялось раз в сутки до электролизной обработки с двух зон – анодной и катодной. Стоит отметить, что в контрольном эксперименте достигалось низкое значение ОВП до -495 мВ, в биореакторе-электролизире, ОВП постепенно возрастало в течении всех этапов

сбраживания и на 28 сутки приобрело значения -53 мВ (рис. 10).

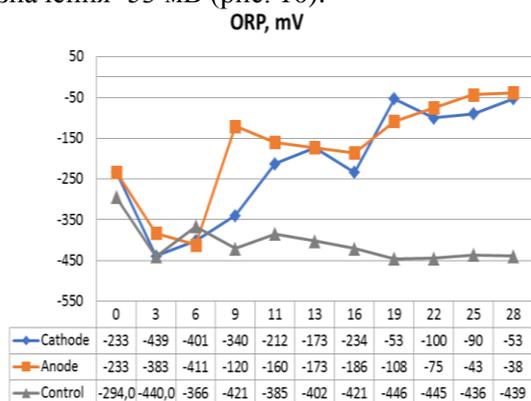


Рис. 10. Сравнительная характеристика изменения значений ОВП в экспериментах с комбинацией биореактора с электролизной обработкой (на катоде и аноде) и без обработки (контроль).

Fig. 10. Comparative characterization of changes in ORP values in experiments with a combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control). ¹²

Предположительно такому увеличению ОВП способствовала метаболическая активность микроорганизмов метаногенной ассоциации, что также является значительным показателем при реализации электролизной обработки.

Важным результатом, полученным в нашем исследовании, при характеристике образцов после обработки является то, что большое количество органического материала было высвобождено в жидкую фазу, что указывает на потенциал сокращения времени пребывания в анаэробных метантенках и получения большего выхода биогаза. Возможность удаления патогенов и получения биотвердого осадка для безопасного захоронения на полигонах или применения в сельском хозяйстве в качестве удобрений имеет важное значение для эффективной утилизации отходов, что изучалось в [20,23], где представлены были результаты электрохимической обработки осадка сточных вод и инактивация патогенов. Однако автора не рассматривали возможность анаэробного сбраживания с получением биогаза. Значимость полученных результатов нашего исследования заключается в выявлении влияния электролизной обработки во время начальной гидролитической фазы анаэробного сбраживания раствора птичьего помета совместно с активным илом очистных

сооружений в соотношении 2:1, что способствует уменьшению латентной фазы развития микроорганизмом.

В нашей работе для реализации поставленной цели исследования было изучено направление индуцирования экзогенного водорода по средствам электролизной обработки, при силе тока 20 А в течении 5 минут 1 раза в день, в биологические процессы для производства биогаза для увеличения в нем доли метана, в отличии от исследований по темновой ферментации, представленных в [21]. Стоит отметить, что коммерциализация биологического процесса зависит от усовершенствования конструкции биореакторов наряду с пониманием природы эколого-трофических связей в ассоциациях микроорганизмов, продуцирующих водород и метан, и оптимизации технологических параметров процесса производства биогаза.

Принимая во внимание сложность биодигрируемого субстрата, предварительная обработка сильным окислением представляется перспективной для улучшения производства биогаза и стимулирования роста микроорганизмов на териманльной стадии, т.е. усиления метаногенеза, что согласуется с результатами исследований в [24], проводимых на другом виде субстрата, а именно при анаэробном сбраживании жидких отходов винодельческой промышленности и с различным конструкционным и режимным решением электроокислительной обработки. Следует отметить, что все более актуально предотвращение негативного воздействия современных поллютантов на процесс анаэробного сбраживания, таких как фармацевтические препараты, в частности антибиотиков, и АОР технологии могут эффективно при этом использоваться, что было подтверждено предыдущим нашими исследованиями [22].

Таким образом, необходимы дальнейшие исследования, чтобы детально изучить условия эксплуатации комбинированной системы электролизной ячейки и анаэробного биореактора для обеспечения стабильного производства биогенного водорода и метана и оценки энергетических потребностей, связанных с конфигурацией и периодами электро-окисляющего воздействия силы и плотности тока на разных этапах анаэробного сбраживания (гидролитической, ацидогенной,

¹² Appendix 1

ацетатогенной и метаногенной стадиях), так и в течении всего процесса сбраживания. При этом возможно два направления внедрения процесса электролиза для получения биоводорода при темновой ферментации и биометана во время метаногенеза. Так как в наших исследованиях является важным проверить и оптимизировать режим работы при комбинации анаэробного биореактора с электролизной ячейкой, то мы придерживались одного варианта комбинации субстрата (птичьего помета) с инокулятом.

ВЫВОДЫ

Во время комбинированной обработки происходят электроокислительные и электровосстановительные реакции в процессе анаэробного сбраживания с генерацией водорода и его вовлечением в автотрофный метаногенез, а также лизисом клеток и гидролизом сложных органических соединений.

Увеличение выхода биогаза и стимулирования роста микроорганизмов на терминальной стадии определено проведенным экспериментом. Так, объем биогаза, который выходил из биореактора-электролизера составил на 28 сутки 1525 мл из 640,5 мл метана, а в стандартных условиях (без обработки) уже на 28 сутки выход биогаза значительно упал до 50 мл, из которых 33,4 мл был метан. А также замечен потенциал в сокращении времени пребывания в анаэробных биореакторах и выходе большего количества биогаза. Дальнейшие исследования будут направлены на изучения разных режимов обработки в биореакторе-электролизере для оптимизации процесса выхода биогаза.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данный исследовательский проект выполнялся в рамках плановых научно-исследовательских работ кафедры экологии и природозащитных технологий Сумского государственного университета по темам «Оценка техногенной нагрузки региона при изменении промышленной инфраструктуры» согласно научно-технической программе Министерства образования и науки Украины (№ государственной регистрации 0121U114478).

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Publication frequency, keywords "bigas" and "electrolysis": (a) Scopus database; (b) Web of Science database

²**Fig. 2.** Samples of quail manure: a - raw; b - after dilution to a moisture content of 85%

³**Fig. 3.** Diagram of the laboratory bench-scale design of the classical bioreactor.

⁴**Fig. 4.** Schematic diagram of laboratory bioreactor-electrolyser

⁵**Fig. 5.** Anaerobic digestion process control parameters in combination with electrolysis

⁶**Fig. 6.** Anaerobic activated sludge in poultry manure digestion process, light microscopy

⁷**Fig. 7.** Methane and carbon dioxide content of biogas

^{8,9}**Table 1.** Biogas and methane yields

¹⁰**Fig. 8.** Comparative characteristics of the total yield of biogas and methane in it for the complete digestion period in the experiments with a combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control).

¹¹**Fig. 8.** Comparative characterization of changes in pH values in experiments with a combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control).

¹²**Fig. 9.** Comparative characteristic of changes in ORP values in experiments with the combination of bioreactor with electrolysis treatment (at the cathode and anode) and without treatment (control).

Литература (References)

- [1] Nuhu S.K., James Gyang J.A., Kwarbak J.J. Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021, vol. 5, no. 100298. doi: 10.1016/j.clet.2021.100298.
- [2] Bouallagui H., Torrijos M., Godon J.J., Moletta R., Ben Cheikh R., Touhami Y., Delgenes J.P., Hamdi M. Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance. *Biochemical Engineering Journal*. 2004, vol. 21, no. 2, pp. 193–197. doi:10.1016/j.bej.2004.05.001
- [3] Leme R. M., Seabra J.E.A. Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. *Energy*. 2017, vol. 119(C), pp. 754-766. doi:10.1016/j.energy.2016.11.029
- [4] Piñas J. A. V., Venturini O.J., Lora E. E. S., Roalcaba O. D. C. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. *Renewable Energy*, 2017, vol. 117, pp. 447-458. doi:10.1016/j.renene.2017.10.085
- [5] Kuznetsova N. V., Drapalyuk N. A., Shchukina T. V. Anaerobic digestion technology improving by biogas production safety development. *IOP Conference Series: Materials Science and*

- Engineering*, vol. 687, no. 6. doi:10.1088/1757-899X/687/6/066076
- [6] Yang H. G., Chun H. Y., Pak D. Improvement of sludge anaerobic degradability by combined electro-flotation and electro-oxidation treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, vol. 90, pp. 44-48. doi:10.1016/j.bej.2014.05.010
- [7] Feki E., Khoufi S., Loukil S., Sayadi S. Improvement of anaerobic digestion of waste-activated sludge by using H₂O₂ oxidation, electrolysis, electro-oxidation and thermo-alkaline pretreatments. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 19, pp. 14717–14726. doi:10.1007/s11356-015-4677-2
- [8] Zeng, Q., Huang, H., Tan, Y., Chen, G., Hao, T. Emerging electrochemistry-based process for sludge treatment and resources recovery: A review. *Water Research*, 2022, vol. 209, no. 117939. doi:10.1016/j.watres.2021.117939
- [9] Barrios J.A., Cano A., Rivera F.F., Cisneros M. E., Durán U. Efficiency of integrated electrooxidation and anaerobic digestion of waste activated sludge. *Biotechnology for Biofuels*. 2021, vol. 14, no. 81. doi:10.1186/s13068-021-01929-7
- [10] Xu X. J., Wang W. Q., Chen C., Xie P., Liu W. Z., Zhou X., Wang X. T., Yuan Y., Wang A. J., Lee D. J., Yuan Y. X., Ren N. Q. Bioelectrochemical system for the enhancement of methane production by anaerobic digestion of alkaline pretreated sludge. *Bioresource technology*, 2020, vol. 304, no. 123000. doi:10.1016/j.biortech.2020.123000
- [11] Heng G.C., Isa M.H., Lock S.S.M., Ng C.A. Process optimization of waste activated sludge in anaerobic digestion and biogas production by electrochemical pre-treatment using ruthenium oxide coated titanium electrodes. *Sustainability*, 2021, vol. 13(9), no. 4874. doi:10.3390/su13094874
- [12] Hou H., Li Z., Liu B., Liang S., Xiao K., Zhu Q., Hu S., Yang J., Hu J., Biogas and phosphorus recovery from waste activated sludge with protocatechuic acid enhanced fenton pretreatment, anaerobic digestion and microbial electrolysis cell. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 704, no. 135274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135274>
- [13] Arenas, C. B., González, R., González, J., Cara, J., Papaharalabos, G., Gómez, X., & Martínez, E. J. Assessment of electrooxidation as pre- and post-treatments for improving anaerobic digestion and stabilisation of waste activated sludge. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 288, no. 112365. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112365
- [14] Heng G. C., Isa M. H., Lock S. S. M., Ng C. A. Process optimization of waste activated sludge in anaerobic digestion and biogas production by electrochemical pre-treatment using ruthenium oxide coated titanium electrodes. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 9, 4874. doi:10.3390/su13094874
- [15] Gao L, Liu W, Cui M, Y. Zhu, L. Wang, A. Wang, C. Huang. Enhanced methane production in an up-flow microbial electrolysis assisted reactors: Hydrodynamics characteristics and electron balance under different spatial distributions of bioelectrodes. *Water Research*, 2021, vol. 191, no. 116813. doi:10.1016/j.watres.2021.116813
- [16] Hassanein A., Witarso F., Lansing S., Qiu L., Liang Y. Bio-electrochemical enhancement of hydrogen and methane production in a combined anaerobic digester (AD) and microbial electrolysis cell (MEC) from dairy manure. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 20,:8491. doi:10.3390/su12208491
- [17] Cerrillo M., Viñas M., Bonmatí A. Anaerobic digestion and electromethanogenic microbial electrolysis cell integrated system: Increased stability and recovery of ammonia and methane. *Renewable Energy*, 2018, vol. 120, pp. 178–189. doi:10.1016/j.renene.2017.12.062
- [18] Li L., Cai C., Chen Y., Liu H., Liu R., Yang D., Dong B., Dai X. Secondary acidogenic fermentation of waste activated sludge via voltage supplementation: Insights from sludge structure and enzymes activity. *The Science of the total environment*, 2021, vol. 797, no. 149161. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149161
- [19] Bao H., Yang H., Zhang H., Yichen L., Su H., Shen M. Improving methane productivity of waste activated sludge by ultrasound and alkali pretreatment in microbial electrolysis cell and anaerobic digestion coupled system. *Environmental Research*, 2019, vol. 180, no. 108863. doi:10.1016/j.envres.2019.108863
- [20] Jafari M., Botte G.G. Electrochemical treatment of sewage sludge and pathogen inactivation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2021, vol. 51, pp. 119–130. doi:10.1007/s10800-020-01481-6
- [21] Kuppam C., Pandit S., Kadier A., Dasagrhandi C., Velpuri J. Biohydrogen production: Integrated approaches to improve the process efficiency. *Microbial Applications*, 2017, vol. 1, pp. 189-210. doi:10.1007/978-3-319-52666-9_9
- [22] Shtepa V., Balintova M., Chernysh Y., Chubur V., Demcak S., Gautier M. Rationale for the combined use of biological processes and AOPs in wastewater treatment tasks. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, 7551. doi:10.3390/app11167551
- [23] Zeng, Q., Zan, F., Hao, T., Biswal, B. K., Lin, S., van Loosdrecht, M. C. M., Chen, G. Electrochemical pretreatment for stabilization of waste activated sludge: Simultaneously enhancing dewaterability, inactivating pathogens

and mitigating hydrogen sulfide. *Water Research*, 2019, vol. 166, no. 115035. doi:10.1016/j.watres.2019.115035 19
 [24] Arenas Sevillano C.B.; Chiappero M.; Gomez X.; Fiore S.; Martínez E.J. Improving the anaerobic

digestion of wine-industry liquid wastes: Treatment by electro-oxidation and use of biochar as an additive. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 22, 5971. doi:10.3390/en13225971

Сведения об авторах.



Черныш Елизавета Юрьевна, доктор технических наук, Сумской государственной области научных интересов: биотехнологические процессы защиты окружающей среды, процессы.
 E-mail: e.chernish@ssu.edu.ua



Пляцук Леонид Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Сумской государственной области научных интересов: процессы и аппараты природозащитных технологий
 E-mail: l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua



Штепа Владимир Николаевич, доктор технических наук, Международный инновационно-прикладной центр «Водная Артерия»
 Область научных интересов: электротехнологическое оборудование и процессы защиты окружающей среды.
 E-mail: aquartery@ecolog.sumdu.edu.ua



Чубур Виктория Сергеевна, аспирантка, Сумской государственной области научных интересов: интенсификация процессов анаэробного сбраживания отходов, экологическая безопасность технологий
 E-mail: v.chubur@ecolog.sumdu.edu.ua



Данилов Дмитрий Владимирович, магистрант, Сумской государственной области научных интересов: возобновляемые источники энергии.
 E-mail: dmitr.lis2014@gmail.com

Fluidized Bed Seed Dewatering System

Tîrșu M.Ș., Popescu V.S., Balan M.M., Kurdov I.S., Balan T.V., Rotari V.V.
 State Agrarian University of Moldova
 Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The aim of this work is to improve the efficiency of the dehydration process of seeds of agricultural plants by applying the fluidized bed treatment method. In order to achieve the aim of the work, an experimental plant for the dehydration of seeds in fluidized layer was developed, based on which the research was carried out. Convection and SHF were used as sources of fluidized bed seed treatment. The efficiency of the dehydration process with the application of the developed experimental plant was estimated for 3 types of seeds of agricultural alleaginous plants: grape seeds, flax seeds and white buckthorn seeds. These types of seeds were selected for research because at present their dehydration is a problem and they have a great potential for the food industry, traditional medicine, cosmetic industry, pharmaceutical industry, etc. The main results obtained in the application of the developed plant to the treatment of seeds of agricultural plants in a fluidized layer are: increase of the dehydration process speed, reduction of the treatment time, reduction of electricity consumption, increase of the seed quality and reduction of the processing costs. Again, the plant is simple in terms of construction, easy to use, low in cost and during operation has demonstrated a high level of operational safety. The significance of the results obtained lies in the efficiency of the process of dehydration of oilseeds of agricultural plants, based on fluidized bed treatment, mainly with a reduction in the cost of technological processing and an increase in the quality of these seeds, for subsequent use in the food industry, traditional medicine, cosmetics industry, pharmaceutical industry, etc.

Keywords: seed dehydration, treatment method, experimental plant, fluidized bed.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.10>

UDC: 66.047.31.5:663.26

Istalație pentru deshidratarea semințelor în strat fluidizat

Tîrșu M.Ș., Popescu V.S., Balan M.M., Kurdov I.S., Balan T.V., Rotari V.V.
 Universitatea Agrară de Stat din Moldova
 Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul acestei lucrări constă în eficientizarea procesului de deshidratare a semințelor de plante agricole aleaginoase, prin aplicarea metodei de tratare în strat fluidizat. Pentru atingerea scopului lucrării, a fost elaborată o instalație experimentală pentru deshidratarea semințelor în strat fluidizat, în baza căreia au fost realizate cercetările. În calitate de surse de tratare a semințelor în strat fluidizat, au fost utilizate convecția și SHF. Eficiența procesului de deshidratare cu aplicarea instalației experimentale elaborate, a fost estimată pentru 3 tipuri de semințe de plante agricole aleaginoase: semințe de struguri, semințe de in și semințe de cătină albă. Au fost selectate pentru cercetare aceste tipuri de semințe, deoarece la momentul actual deshidratarea lor este o problemă, iar ele prezintă un potențial avaloros pentru industria alimentară, medicina tradițională, industria cosmetică, industria farmaceutică, etc. Rezultatele principale obținute privind aplicarea instalației elaborate la tratarea semințelor de plante agricole aleaginoase în strat fluidizat sunt: creșterea vitezei procesului de deshidratare, micșorarea timpului de tratare, reducerea consumului de energie electrică, creșterea calității semințelor și micșorarea cheltuielilor de prelucrare. Tot o dată, instalația este simplă din punct vedere constructiv, este ușor de utilizat, are cost redus și pe parcursul funcționării a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare. Semnificația rezultatelor obținute constă în eficientizarea procesului de deshidratare a semințelor de plante agricole oleaginoase, în baza tratarării în strat fluidizat, preponderent cu reducerea costurilor de prelucrare tehnologică și creșterea calității acestor semințe, pentru utilizarea ulterioară în industria alimentară, medicina tradițională, industria cosmetică, industria farmaceutică, etc.

Cuvinte-cheie: deshidratarea semințelor, metodă de tratare, instalație experimentală, strat fluidizat.

Установка для обезвоживания семян в псевдооживленном слое
Тыршу М.С., Попеску В.С., Балан М.М., Курдов И.С., Балан Т.В., Ротарь В.В.
 Государственный Аграрный Университет Молдовы
 Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Целью данной работы является повышение эффективности процесса обезвоживания семян сельскохозяйственных растений путем применения метода обработки в кипящем слое. Для достижения цели работы была разработана экспериментальная установка для обезвоживания семян в кипящем слое, на основе которой проводились исследования. В качестве источников обработки семян в псевдооживленном слое использовались конвекция и СВЧ. Эффективность процесса обезвоживания с применением разработанной экспериментальной установки оценивалась для 3 видов семян сельскохозяйственных алегинных растений: семян винограда, семян льна и семян облепихи белой. Эти виды семян были выбраны для исследования потому, что в настоящее время их обезвоживание является проблемой, и они имеют большой потенциал для пищевой промышленности, народной медицины, косметической промышленности, фармацевтической промышленности и т.д. Основными результатами, полученными при применении разработанной установки для обработки семян сельскохозяйственных растений в псевдооживленном слое, являются: увеличение скорости процесса обезвоживания, сокращение времени обработки, снижение расхода электроэнергии, повышение качества семян и снижение затрат на обработку. Опять же, установка проста по конструкции, удобна в использовании, имеет низкую стоимость и в процессе эксплуатации продемонстрировала высокий уровень эксплуатационной безопасности. Значимость полученных результатов заключается в эффективности процесса обезвоживания семян масличных сельскохозяйственных растений, основанного на обработке в кипящем слое, в основном при снижении технологических затрат на переработку и повышении качества этих семян, для дальнейшего использования в пищевой промышленности, народной медицине, косметической промышленности. применение разработанной установки существенно увеличивает скорость процесса обезвоживания и сокращает продолжительность тепловой обработки, способствуя обеспечению качества семян.

Ключевые слова: обезвоживание семян, метод обработки, экспериментальная установка, кипящий слой.

Introducere

Actualmente, creșterea prețurilor la resursele energetice impune eficientizarea tehnologiilor din toate sectoarele, inclusiv și cele de prelucrare primară a produselor agricole. Modernizarea complexului agro-industrial poate fi asigurată, atât prin perfecționarea tehnologiilor existente, cât și prin elaborarea și implementarea unor noi metode de procesare [1-6, 9-14, 20-26].

Astfel, efortul cercetătorilor din domeniu este direcționat îndeosebi spre reducerea consumului de energie electrică și a costurilor de prelucrare, creșterea productivității și a calității produselor [4-8, 15-19, 21-23].

O problemă actuală din domeniul prelucrării primare a produselor agricole este și lipsa unei tehnologii eficiente de deshidratare a semințelor [16-23]. Neajunsurile principale ale tehnologiilor de deshidratare existente sunt durata mare a procesului și consumul esențial de energie electrică [2-8, 11-18, 21-25].

Mai mult ca atât, problema dată se acutizează îndeosebi în cazul uscării semințelor oleaginoase, deoarece sunt bogate în grăsimi vegetale, care sunt instabile la procesele de tratare termică [1-6, 9-15, 20-23]. Astfel durata mare a procesului de deshidratare în baza

tehnologiilor existente, afectează semnificativ calitatea semințelor [1-5, 8-13, 17-22].

De aceea, pentru identificarea soluțiilor cu privire la problema respectivă, a fost elaborată o instalație experimentală pentru deshidratarea semințelor de plante agricole oleaginoase, prin metoda de tratare în strat fluidizat.

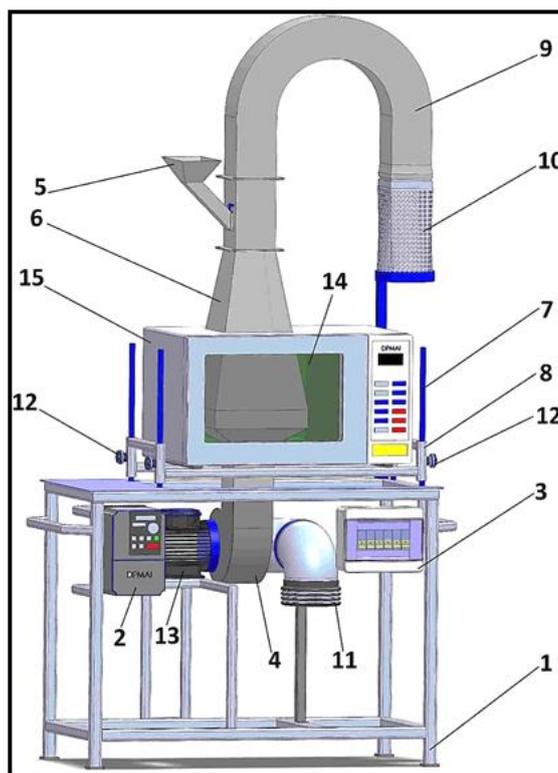
Cercetările efectuate cu privire la deshidratarea semințelor, au confirmat că, aplicarea instalației elaborate, crește esențial viteza procesului de deshidratare și reduce durata de tratare termică, contribuind la asigurarea calității semințelor, pentru utilizarea ulterioară în industria alimentară, medicină, cosmetologie, farmaceutică, etc. Mai mult ca atât, instalația elaborată este fiabilă și permite reducerea consumului de energie și a cheltuielilor de prelucrare în ansamblu.

MATERIALE ȘI METODE

Instalația experimentală, elaborată pentru realizarea cercetărilor, cu privire la deshidratarea semințelor în strat fluidizat, este prezentată în Figura 1. În baza acestei instalații a fost estimată eficiența procesului de deshidratare prin metoda de tratare în strat fluidizat a semințelor, iar rezultatele au fost comparate cu cele obținute

prin metoda de deshidratare clasică. Instalația elaborată, este compusă din următoarele elemente constructive: Pe carcasa 1 sunt montați: tubul aerodinamic 6, la care este racordat bucherul de alimentare 5; panoul de comandă 3; invertorul 2; ventilatorul 4, motorul ventilatorului 13; filtrul 11; generatorul de microunde 15; camera de tratare 14, care este montată pe suportul 8; manetele de fixare-reglare 12; ghidajele 7; țeava de evacuare a produsului

9; receptorul perforat 10. Instalația funcționează în felul următor: Produsul granular este încărcat în bucherul de alimentare 5 și în procesul de prelucrare nimereste în zona inferioară a tubului 6, unde este antrenat pe verticală în sus de către ventilatorul 4. Ventilatorul aspiră aerul prin intermediul filtrului 11, fiind acționat de motorul electric 13.



1- carcasă; 2-invertor; 3-panou de comandă; 4-ventilator; 5- bucher de alimentare; 6-tub aerodinamic; 7-ghidaje; 8-suport; 9-țeavă de evacuare a produsului; 10-receptor perforat; 11-filtru; 12-manete de fixare-reglare; 13-motorul ventilatorului; 14-camera de tratare; 15-generatorul de microunde.

Figura 1. Instalația elaborată pentru deshidratarea semințelor în strat fluidizat.

1- housing; 2-inverter; 3-control panel; 4-fan; 5- feeding bunker; 6-tube aerodynamic; 7-guides; 8-support; 9-product outlet pipe; 10-perforated receiver; 11-filter; 12-fixing-adjusting levers; 13-fan motor; 14-treatment room; 15-microwave generator.

Figure 1. The plant developed for dehydrating the seeds in a fluidized layer.

Din zona inferioară a tubului 6, produsul nimereste în zona de mijloc, a cărei secțiune transversală este mai mare ca cea a zonei inferioare și cea a zonei superioare. Zona de mijloc a tubului se află în interiorul camerei de tratare 14, a generatorului de microunde 15, care supun produsul procesului de deshidratare. În zona respectivă produsul este antrenat într-o mișcare continuă, datorită micșorării vitezei

liniare în secțiunea aceasta a tubului. Respectiv când masa produsului începe să scadă datorită procesului de deshidratare, la aceeași valoare a vitezei liniare în zona de mijloc a tubului, el este atras în zona superioară a tubului unde valoarea vitezei liniare este mai mare, datorită îngustării secțiunii transversale.

Astfel produsul deshidratat este evacuat din instalație prin intermediul țevii de evacuare

9, ulterior la ieșire fiind separat prin intermediul receptorului perforat 10. De asemenea procesul de deshidratare a produsului, poate fi reglat datorită manetelor de fixare-reglare 12, prin deplasarea pe verticală a camerei de uscare pe ghidajele 7, în raport cu zona de mijloc a tubului. Pentru măsurarea vitezei aerului, debitului de aer și temperaturii a fost utilizat anemometrul CPS-AM50 cu precizia $\pm 1,5\%$, termometru cu fir cald TESTO 400 cu precizia $\pm 1\%$.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

În rezultatul cercetării procesului de deshidratare cu aplicarea instalației experimentale elaborate, a fost estimată eficiența procesului de deshidratare în strat fluidizat, pentru 3 tipuri de semințe oleagionoase: semințe

de struguri, semințe de in și semințe de cătină albă. Au fost selectate pentru cercetare aceste tipuri de semințe, deoarece la momentul actual deshidratarea lor este o problemă, iar ele prezintă un potențial avaloros pentru industria alimentară, medicină, cosmetologie, farmaceutică, etc.

Analizând procesul de uscare a semințelor, a fost determinată cinetica deshidratării, iar rezultatele obținute prin metoda de tratare în strat suspendat, au fost comparate cu cele obținute prin metoda clasică de uscare. Astfel, s-a determinat pentru fiecare metodă de uscare: viteza de micșorare a umidității în semințe, durata procesului și consumul de energie electrică.

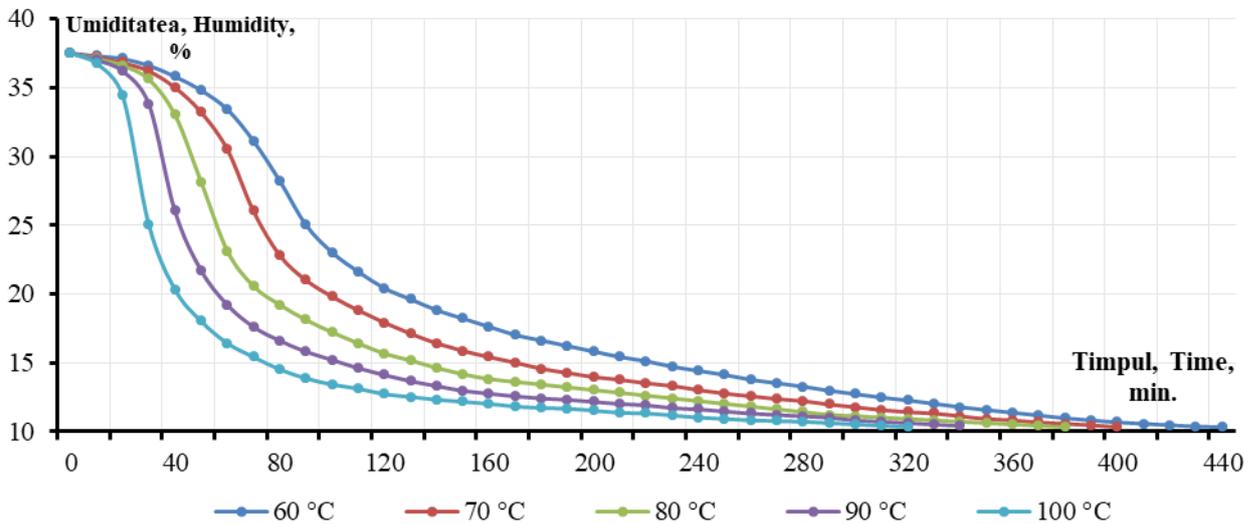


Fig. 2. Curbele reducerii umidității semințelor tratate în strat fluidizat cu aplicarea convecție.
Fig. 2. Moisture reduction curves of seeds treated in a fluidized layer with the application of convection.

Aplicând metoda de tratare în strat fluidizat cu ajutorul convecției, semințele au fost deshidratate până la umiditatea optimă de 10,3% și în rezultatul examinării a 5 regimuri de uscare: 60°C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C, a fost determinată durata procesului pentru fiecare regim de tratare, respectiv: 446,3 minute, 405,8 minute, 385,4 minute, 344,8 minute și 324,9 minute.

În Figura 2 se prezintă, ca exemplu, curbele reducerii umidității, în cazul deshidratării semințelor de struguri, tratate în strat fluidizat cu aplicarea convecției.

Utilizând metoda de tratare în strat fluidizat cu ajutorul SHF, semințele au fost deshidratate până la același nivel de umiditate de

10,3% și în rezultatul examinării a 5 regimuri de tratare: 200W, 300W, 450W, 600W, 750W, a fost determinată durata tratării pentru fiecare regim, respectiv: 103,2 minute, 76,8 minute, 53,5 minute, 43,4 minute, 33,2 minute.

În urma procesului de deshidratare a semințelor, a fost determinată cinetica procesului, iar rezultatele obținute în baza aplicării metodei de deshidratare în strat fluidizat, au fost comparate cu cele obținute prin metoda de deshidratare clasică.

În Tabelul 1 se prezintă, ca exemplu, compararea rezultatelor obținute privind deshidratarea prin metodele analizate, în cazul semințelor de struguri, pentru puterea sursei de tratare de 450 W.

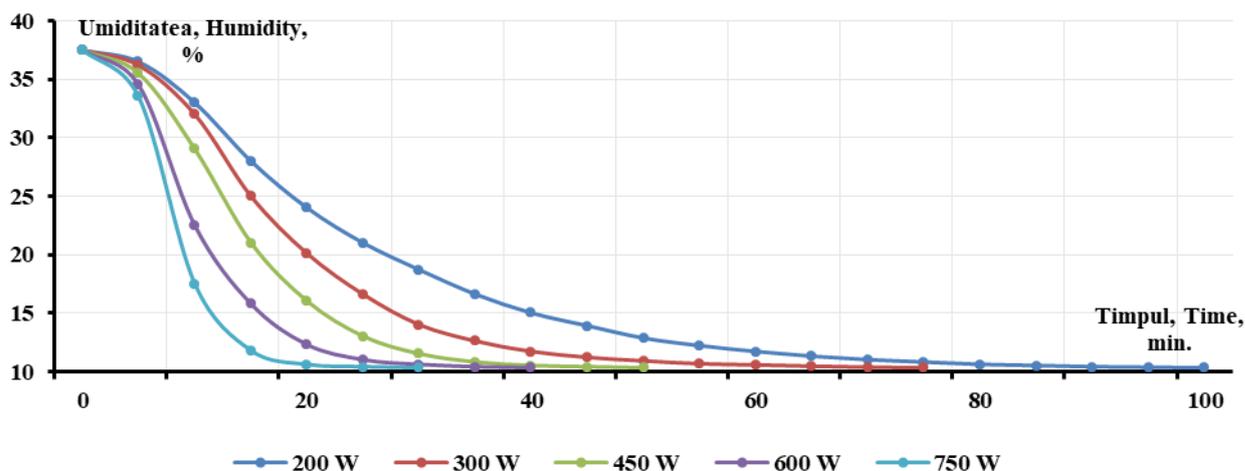


Fig. 3. Curbele reducerii umidității semințelor tratate în strat fluidizat cu aplicarea SHF.
 Fig. 3. Moisture reduction curves of fluidized bed treated seed with SHF application.

Tabelul 1. Rezultatele privind deshidratarea semințelor
 Table 1. Seed dehydration results

Sursa de tratare aplicată la deshidratare Treatment source applied to dehydration	Parametrii procesului de deshidratare Parameters of the dehydration process applied to dehydration	Metoda de deshidratare a semințelor Seed dehydration method	
		Metoda de deshidratare clasică Classical dehydration method	Metoda de deshidratare în strat fluidizat Fluidised bed dewatering method
SHF Super High frequency	Viteza de deshidratare, %/minut Dehydration rate, %/minute	1,41	1,76
	Durata deshidratării, minute Duration of dehydration, minutes	94,60	53,50
	Consumul de energie electrică, kWh Electricity consum	0,709	0,401
Convecția Convection	Viteza de deshidratare, %/minut Dehydration rate, %/min	0,71	0,97
	Durata deshidratării, minute Duration of	344,8	285,4

	dehydration, minutes		
	Consumul de energie electrică, kWh Electricity consumption, kWh	2,586	2,140

Analizând rezultatele obținute, observăm că la deshidratarea prin convecție în strat fluidizat, pe exemplul semințelor de struguri, durata de deshidratare este cu 59,4 minute mai redusă decât la deshidratarea prin convecție după metoda clasică. La fel și viteza de deshidratare în strat fluidizat prin convecție fiind cu 0,26 %/minut mai mare decât la metoda clasică.

Totodată analizând ambele metode cu aplicarea SHF, observăm că la deshidratarea în strat fluidizat, durata de deshidratare este cu 41,1 minute mai redusă decât la deshidratarea prin metoda clasică. La fel și viteza de deshidratare în strat fluidizat cu aplicarea SHF este cu 0,35 %/minut mai mare ca la aplicarea SHF prin metoda clasică.

La deshidratarea prin convecție în strat fluidizat, pentru exemplul semințelor de struguri, consumul de energie electrică este mai redus decât la deshidratarea prin convecție după metoda clasică, cu 0,446 kWh. La fel și la

deshidratarea în strat fluidizat cu aplicarea SHF, consumul de energie electrică este mai redus, decât la deshidratarea cu SHF prin metoda clasică, cu 0,308 kWh.

Dacă să comparăm ambele metode de deshidratare, reieșind din sursa de tratare aplicată, se recomandă de utilizat deshidratarea semințelor în strat fluidizat cu aplicarea SHF. Metoda respectivă este caracterizată de viteză sporită a procesului de deshidratare și durată redusă a procesului, pentru toate cele 3 tipuri de semințe examinate: semințe de struguri, semințe de in și semințe de cătină albă.

Totodată, pentru analiza calității, semințele deshidratate prin metoda clasică și cele deshidratate în strat fluidizat au fost analizate microscopic. În Figura 4 se reprezintă analiza microscopică a suprafeței semințelor, care au fost deshidratate prin metoda clasică.

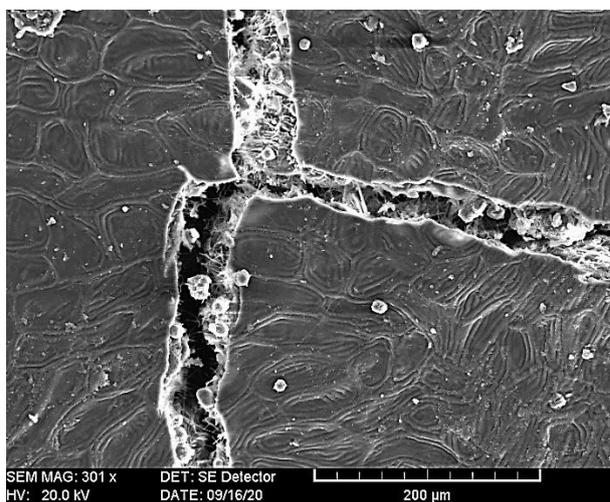


Fig. 4. Analiza microscopică a suprafeței semințelor deshidratate prin metoda clasică.
FIG. 4. Microscopic analysis of the surface of dehydrated seeds by the classical method.

Din această figură se observă că pe suprafața seminței deshidratate prin metoda clasică, în procesul de prelucrare s-au format microfisuri. Aceasta se întâmplă, deoarece prin

această metodă, în procesul deshidratării, semințele sunt supuse acțiunilor mecanice, care cauzează apariția fisurilor sau a altor defecte pe suprafața lor. Aceste microfisuri influențează

negativ stabilitatea semințelor la procesul de oxidare, fiindcă acestea sunt mai sensibile la contactul cu oxigenul din aer, care are loc prin intermediul fisurilor apărute în procesul deshidratării clasice.

În Figura 5 se reprezintă analiza microscopică a suprafeței semințelor, care au fost deshidratate în strat fluidizat.

Din figură se observă că pe suprafața seminței deshidratate în strat fluidizat, nu s-au format microfisuri. Aceasta se datorează faptului, că, prin această metodă, semințele nu sunt supuse acțiunilor mecanice negative, ca prin metoda clasică, iar acest fapt împiedică apariția fisurilor sau a altor defecte pe suprafața lor. Deci, metoda propusă de deshidratare în strat

fluidizat a semințelor, exclude apariția microfisurilor și împiedică oxidarea uleiului vegetal din conținutul lor.

Astfel, rezultatele cercetărilor efectuate au confirmat că, aplicarea instalației experimentale crește semnificativ viteza deshidratării și reduce durata de tratare termică, contribuind la creșterea productivității procesului.

Mai mult ca atât, consumul de energie electrică se reduce semnificativ la aplicarea deshidratării în strat fluidizat, față de metoda clasică, iar instalația elaborată este simplă din punct vedere constructiv, este ușor de utilizat, are cost redus și pe parcursul funcționării a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare.

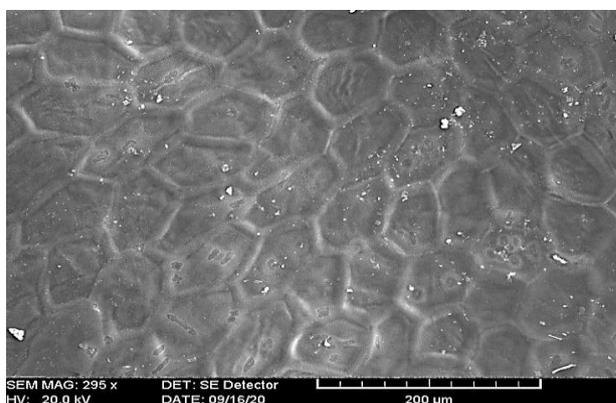


Fig. 5. Analiza microscopică a suprafeței semințelor deshidratate în strat fluidizat.
FIG. 5. Microscopic analysis of the surface of dehydrated seeds in a fluidized layer.

Totodată, cercetările au demonstrat, că, în timpul procesului de deshidratare în strat fluidizat, semințele nu sunt supuse acțiunilor mecanice, iar riscul de apariție a fisurilor pe suprafața semințelor sau a altor defecte este absolut exclus. Deci este exclus și riscul de oxidare a grăsimilor vegetale din conținutul semințelor oleaginoase, care poate avea loc la contactul cu oxigenul, prin intermediul acestor fisuri sau deformări. Acest fapt este destul de important pentru păstrarea calității semințelor bogate în uleiuri vegetale, pentru utilizarea ulterioară în industria alimentară, medicină, cosmetologie, farmaceutică, etc.

CONCLUZII

Rezultatele cercetărilor au demonstrat că instalația elaborată pentru deshidratarea semințelor de plante agricole în strat fluidizat permite creșterea eficienței procesului,

preponderent cu reducerea costurilor de prelucrare tehnologică și creșterea calității acestor semințe.

Astfel s-a demonstrat că tratarea în strat fluidizat permite creșterea vitezei de deshidratare, reducerea duratei procesului și a consumului de energie electrică pentru toate cele 3 tipuri de semințe examinate: semințe de struguri, semințe de in și semințe de cătină albă.

Cercetările au demonstrat, că, instalația elaborată nu permite apariția defectelor în procesul de deshidratare a semințelor și asigură păstrarea calității lor, pentru utilizarea ulterioară în industria alimentară, medicină, cosmetologie, farmaceutică, etc.

Totodată, instalația de deshidratare în strat fluidizat este simplă din punct vedere constructiv, este ușor de utilizat, are cost redus și pe parcursul funcționării a demonstrat un nivel înalt de siguranță în funcționare.

BIBLIOGRAFIE (REFERENCES)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Popescu V., Malai L., Rotari V. Nadeojnaia sistema dea pererabotki seliskohozeastvennoi produktii [Reliable system for processing agricultural products] *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works - Design, production and exploitation of agricultural machines*, 2019, Issue 49, pp. 200-204. (In Russian)
- [10] 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.
- [11] Popescu V. Malai L. Estimarea parametrilor sistemului fiabil pentru prelucrarea produselor agricole [Estimation of the parameters of the reliable system for processing agricultural products] *Știința agricolă-Agricultural science*, 2019, nr. 2, pp. 109-113. (In Romanian).
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ranjbaran M., și 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.
- [15] Askarishahi M., Maus M., Schröder D., Slade D., Martinetz M., Jajcevic D. Mechanistic modelling of fluid bed granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020, vol. 573, pp. 8837-8845, doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.118837.
- [16] Kaensup W., Wongwiset S., Chutima S. Drying of pepper seeds using a combined microwave/fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 1998, vol. 16, nr. 3–5, pp. 853–862, doi: 10.1080/07373939808917440.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

Date despre autori.



Tîrșu Mihai Ștefan
Institutul de energetică,
Doctor în tehnică.
Interesele sale de cercetare se referă la elaborarea scenarilor de interconectare a sistemului electroenergetic al Moldovei la ENTSO-E, a măsurilor de fortificare și dezvoltare a sistemului energetic, utilizarea și integrarea SER, elaborarea echipamentelor inovative de dirijare și control a fluxurilor de putere, eficiența energetică etc.
tirsu.mihai@gmail.com



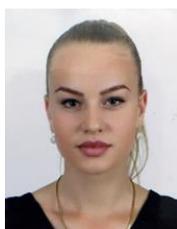
Balan Mihail Mihail. Șef Biroul Protecția proprietății intelectuale și transfer tehnologic, Universitatea Tehnică a Moldovei.
Doctorand, lector universitar. Domeniul de activitate științifică îl constituie perfecționarea tehnologiilor și utilajelor de prelucrare.
E-mail: balanmihail.utm@mail.ru



Popescu Victor Serghei.
Doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Departamentul 2 – Electrificarea agriculturii, mecanică și bazele proiectării, Facultatea de Inginerie agrară și transport auto, Universitatea Agrară de Stat din Moldova.
Domeniul de activitate științifică îl constituie identificarea căilor de asigurare a fiabilității sistemelor tehnice și perfecționarea tehnologiilor și utilajelor din sectorul agroindustrial.
E-mail: vspopescu@mail.ru



Kurdov Igor Seminon.
Doctorand, Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Domeniul de activitate științifică îl constituie asigurarea fiabilității sistemelor electrice din sectorul agrar și perfecționarea tehnologiilor și utilajelor de prelucrare și păstrare a produselor agroalimentare.
E-mail: kudovigor@mail.ru



Balan Tatiana Victor.
Doctorand, Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Domeniul de activitate științifică îl constituie eficientizarea economică a proceselor din industria agroalimentară.
balan.tatiana98@mail.ru



Rotari Viorel Vasile.
Doctorand, Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Domeniul de activitate științifică îl constituie perfecționarea sistemelor electrice din sectorul agroindustrial.
E-mail: rotvi@list.ru