Научная статья
УДК 621.311
DOI: 10.14529/power230104

# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ И ИНТЕРГАРМОНИКАМИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

***Д.С. Осипов**, ossipovdmitriy@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-0830-408X*
***А.Г. Лютаревич**, l.alexander@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-7503-1512*
***В.А. Ткаченко**, sevaatmail@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7321-1162*
***Я.Ю. Логунова**, jana_logunova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4084-5338*
*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

***Аннотация.*** В статье приводится модернизация алгоритма расчета дополнительных потерь мощности в электрических сетях в несинусоидальных нестационарных режимах. Основой метода является математический аппарат вейвлет-преобразования. Отличием от ранее существующих методов является предварительный выбор оптимальной вейвлет-функции по условию энергии спектра гармонической группы. В работе предложено совместить гармонические и интергармонические группы, определенные в действующей нормативно-технической документации с полосой пропускания вейвлет-функции. Вторым определяющим фактором при выборе оптимальной вейвлет-функции является минимальное среднеквадратичное отклонение исходного и восстановленного сигнала. Предложенный алгоритм позволяет для нестационарных режимов определять действующие значения высших гармоник и интергармоник, а также длительность (время) присутствия высокочастотных компонент в сигнале тока. Полученные величины необходимы для расчета дополнительных потерь мощности и энергии в токоведущих частях. Повышение точности расчета потерь при несинусоидальных нестационарных режимах позволит корректировать технико-экономические обоснования внедрения устройств для фильтрации высших гармоник и интергармоник.

***Ключевые слова:*** вейвлет-преобразование в электроэнергетике, высшие гармоники, потери мощности, интергармоники, качество электрической энергии

***Благодарности.*** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20052, https://rscf.ru/project/22-29-20052/.

***Для цитирования:*** Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования / Д.С. Осипов, А.Г. Лютаревич, В.А. Ткаченко, Я.Ю. Логунова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 38–47. DOI: 10.14529/power230104

Original article
DOI: 10.14529/power230104

# AN ALGORITHM FOR CALCULATING POWER LOSSES DUE TO HIGHER HARMONICS AND INTERHARMONICS BASED ON THE WAVELET TRANSFORM

***D.S. Osipov**, ossipovdmitriy@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-0830-408X*
***A.G. Lyutarevich**, l.alexander@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-7503-1512*
***V.A. Tkachenko**, sevaatmail@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7321-1162*
***Ya.Yu. Logunova**, jana_logunova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4084-5338*
*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

***Abstract.*** This paper presents the modernization of the algorithm for calculating additional power losses in electrical networks in non-sinusoidal non-stationary modes. The mathematical method is the wavelet transform. The difference from the existing methods is the preliminary choice of the optimal wavelet function according to the energy condition of the spectrum of the harmonic group. The paper proposes combining the harmonic and interharmonic groups defined in the regulatory and technical documentation with the bandwidth of the wavelet function. The second determining factor in choosing the optimal wavelet function is the minimum standard deviation of the original and reconstructed signal. The proposed algorithm allows for non-stationary modes to determine the effective values of higher harmonics and interharmonics, as well as the duration of the high-frequency components in the signal. These values are

© Осипов Д.С., Лютаревич А.Г., Ткаченко В.А., Логунова Я.Ю., 2023

necessary for calculating additional power and energy losses in current-carrying parts. Increasing the accuracy of calculating losses in non-sinusoidal non-stationary modes makes it possible to correct the feasibility studies for introducing devices for filtering higher harmonics and interharmonics.

***Keywords:*** wavelet transformation in the electric power industry, higher harmonics in electric networks, calculation of power losses in the presence of interharmonics, quality of electric energy

***Acknowledgments.*** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-20052, https://rscf.ru/project/22-29-20052/.

***For citation:*** Osipov D.S., Lyutarevich A.G., Tkachenko V.A., Logunova Ya.Yu. An algorithm for calculating power losses due to higher harmonics and interharmonics based on the wavelet transform. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):38–47. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230104

**Введение**

Неизбежный рост доли электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, приводит к искажению синусоидальности формы кривой тока и напряжения в электрических сетях и системах электроснабжения. Как правило, эти режимы являются не экономичными, вызывают дополнительные потери в токоведущих частях, могут приводить к преждевременному выходу из строя электрооборудования. Потери, обусловленные несинусоидальностью, являются причиной дополнительного нагрева токоведущих частей. Действующий ГОСТ 32144–2013 в части несинусоидальности определяет допустимые значения гармонических составляющих напряжения в зависимости от класса напряжения и порядка высшей гармоники. Кроме высших гармоник в электрических сетях возможно возникновение интергармоник, однако их уровень в ГОСТ 32144–2013 «находится на рассмотрении» (п. 4.2.4.2). В странах Европейского Союза уровень интергармоник определяется стандартом IEC 61000-4-7:2, где предельно допустимый уровень интергармоник определен как 0,2 % для каждого номинального напряжения. В США уровень интергармоник регламентируется специальной номограммой стандарта IEEE Std 519 для каждого класса напряжения.

Одной из причин появления в сетях интергармоник являются несинхронные переключения устройств силовой электроники [1]. Источниками интергармоник в системах электроснабжения могут быть преобразователи частоты, дуговые печи, частотно-регулируемый электропривод и др. [1].

Вопросы анализа, моделирования и учета интергармоник вызывают существенный интерес в научном сообществе. В статье [2] приводится имитационное моделирование асинхронного электродвигателя, работающего на переменную периодическую нагрузку. При этом авторы определяют возникающие в обмотках статора высшие гармоники и интергармоники. В результате исследования авторы приходят к выводу о целесообразности применения активных фильтров [2, с. 43]

Зависимость уровня интергармоник в питающей сети системы освещения и кратковременной дозы фликера приведена в работе [3]. В ходе исследований было установлено, что интергармонические искажения влияют на колебания напряжения в сети, что негативно отражается на системах освещения.

Основные расчетные выражения для определения частот интергармоник при работе различных типов преобразователей, включая циклоконверторы, приведены в исследовании [4].

Как отмечают авторы [5], под определение интергармоник «попадают процессы, имеющие совершенно разный генезис», при этом подобные явления пока мало изучены.

Анализ российских и зарубежных нормативных документов, регламентирующих как показатели качества электроэнергии в целом, так и несинусоидальность в частности, приводится в статье [6]. Авторы считают целесообразным разработку отечественных нормативных значений допустимых пределов гармонических и интергармонических составляющих тока [6, с. 31]

Таким образом, возникает задача оценки негативного влияния интергармоник с целью внесения рекомендаций об их нормировании в электрических сетях России.

**1. Основные положения исследования**

Математический аппарат вейвлет-преобразования получает все более широкое применение для анализа динамики сложных нестационарных несинусоидальных процессов. Теория вейвлетов применяется для модуляции напряжения на выходе автономных инверторов напряжения [7]. Вейвлет-анализ токов асинхронных двигателей и уровней вибрации позволил авторам [8] произвести оценку остаточного ресурса машины с достаточно высокой (до 96 %) достоверностью. Вейвлет-анализ находит применение для анализа несинусоидальных режимов, в том числе расчета гармоник и интергармоник [9, 10].

В настоящей работе для реализации алгоритма расчета потерь мощности в токоведущих частях от высших гармоник и интергармоник будет использован метод вейвлет-анализа.

В статье [11] авторы применяют частотно-временной контур быстрого преобразования Фурье для анализа интергармоник. Применение вейвлет-преобразования позволит упростить решение, предложенное в [11]. В статье [12] представлены

разработки метода идентификации интергармоник в сети промышленного предприятия при наличии частотно-регулируемого привода.

Как известно, любая вейвлет-функция представляет собой цифровой фильтр с определенной амплитудно-частотной характеристикой, которая в общем случае определяется типом вейвлета и глубиной разложения при реализации алгоритма вейвлет-преобразования. Таким образом, каждая вейвлет-функция может быть представлена характеристиками цифрового фильтра. Как и любой реальный фильтр, вейвлеты вносят некоторые искажения в полосе пропускания и не полностью подавляют частоты в полосе заграждения. На рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики вейвлет-функций Ингрид Добеши 10 (обозначено пунктирной линией) и 44 порядков (обозначено сплошной линией).

В настоящий момент для решения задач спектрального анализа токов и напряжений при несинусоидальных режимах электрических сетей широко применяется метод преобразования Фурье. В случае анализа нестационарных режимов возникает эффект «растекания спектра», который может быть минимизирован с помощью оконного преобразования Фурье. В соответствии с действующей нормативной документацией [13] для устранения эффекта «растекания спектра» используется принцип группирования гармоник и интергармоник в соответствии с формулой

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)-N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{N/2-1} Y_{C,(Nh)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)+N/2}^2, \quad (1)$$

где $Y_{C,(Nh)-N/2}$ – среднеквадратичное значение частотной компоненты;

$(Nh)+k$ – номер частотной компоненты;

$Y_{g,h}$ – результирующее среднеквадратичное значение гармонической группы.

Принцип формирования групп и подгрупп гармоник и интергармоник представлен на рис. 2 и 3.

Для выбора оптимальной вейвлет-функции предлагается совместить гармонические и интергармонические группы, определенные в [13] с полосой пропускания вейвлет-функции таким образом, чтобы узлу $a_{j,k}$ дерева вейвлет-разложения соответствовала полоса пропускания нижних частот, а следующему узлу $a_{j,k+4}$ дерева полоса пропускания верхних частот вейвлет-функции (рис. 4).

Если в качестве одного из условий выбора оптимальной вейвлет-функции для анализа несинусоидальных режимов электрических сетей принять минимальное среднеквадратичное отклонение исходного сигнала $i_k$ тока (напряжения) от функции тока, восстановленного в результате обратного вейвлет-преобразования $i_k$, то это позволит говорить о минимальной потере информации о сигнале.

Характерным признаком совпадения полос пропускания и заграждения вейвлет-функций при совмещении гармонических и интергармонических групп в соответствии с рис. 4 может быть энергия спектра, определяемая для каждого узла дерева вейвлет-разложения. Энергия спектра гармонической группы $E_n$ должна быть максимальной именно в границах узла вейвлет-разложения $a_{j,k}$. В таком случае критерий для выбора оптимальной вейвлет-функции может быть записан в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\left(i_k - \hat{i}_k\right)^2}{\sum_{k=1}^{n} i_k^2}} \to \min; \\ \Delta E_n = \dfrac{E_n}{E_\Sigma} \dfrac{\sum_{k=n}\left|i_{j,k}^A\right|^2 + \sum_{k=n}\left|i_{j,k}^D\right|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|i_{j,k}^A\right|^2 + \sum_{j=J}^{\infty}\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|i_{j,k}^D\right|^2} \to \max. \end{cases} \quad (2)$$

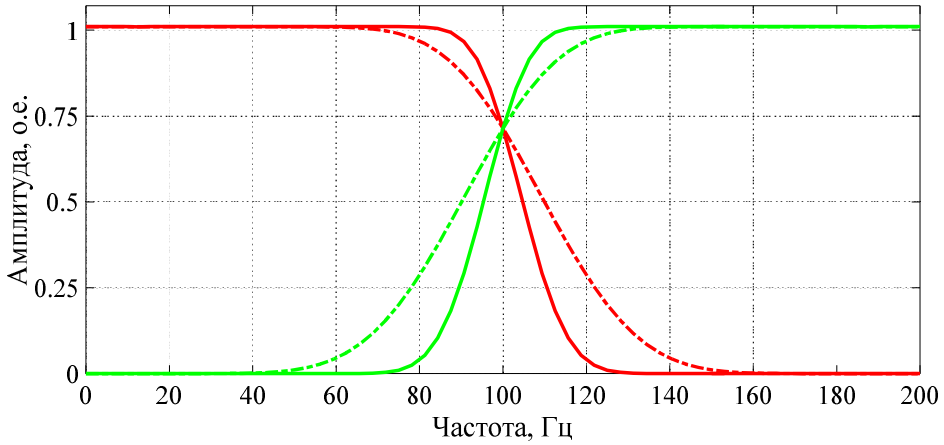


**Рис. 1. АЧХ вейвлетов Добеши db10, db44**
**Fig. 1. Frequency response of Daubechies wavelets db10, db44**

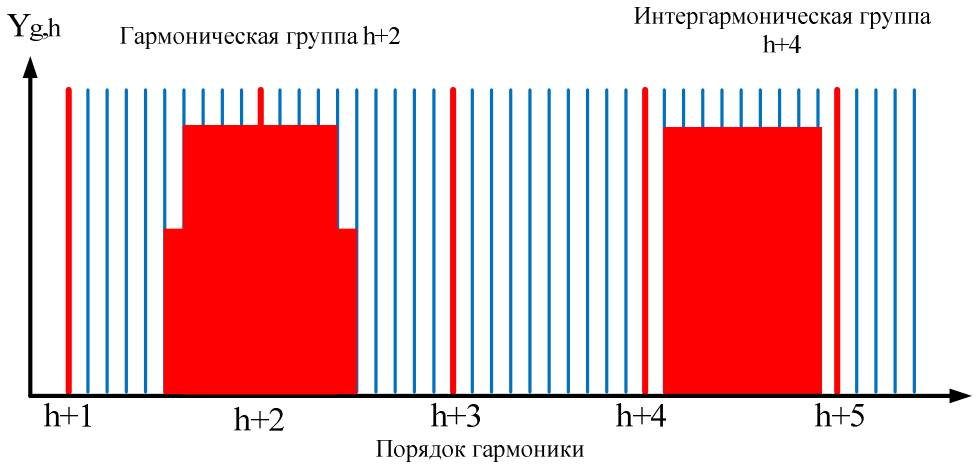


**Рис. 2. Принцип образования гармонических и интергармонических групп [13, с. 15]**
**Fig. 2. The formation of harmonic and interharmonic groups [13, p. 15]**

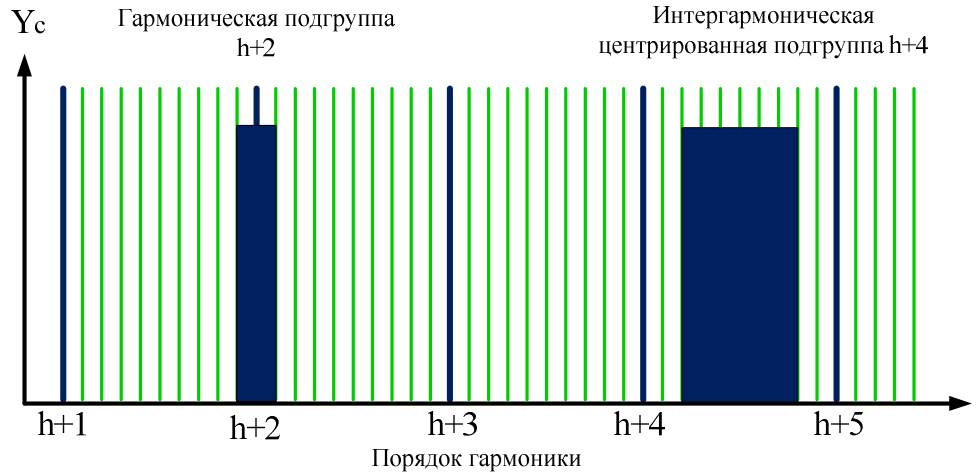


**Рис. 3. Принцип образования интергармонических подгрупп [13, с. 17]**
**Fig. 3. The formation of interharmonic subgroups [13, p. 17]**

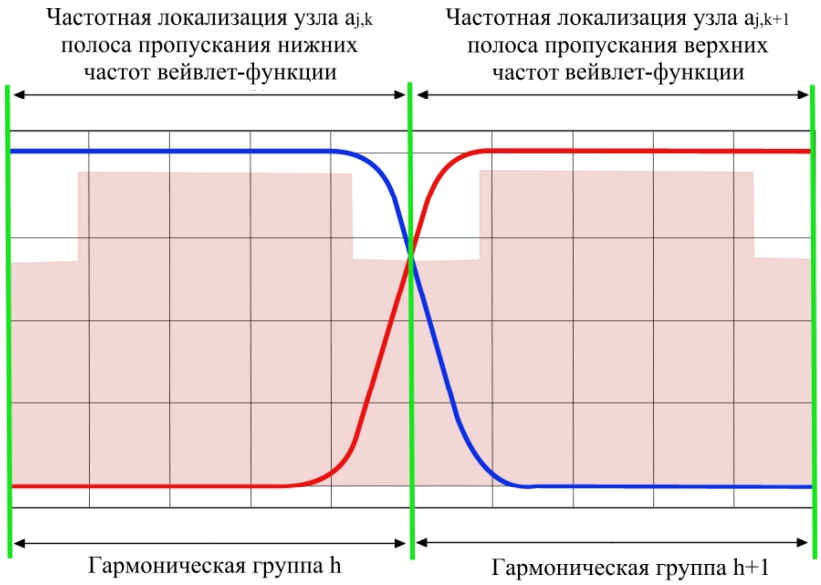


**Рис. 4. Совмещение полос пропускания и заграждения вейвлет-функций с гармоническими группами по ГОСТ 30804.4.30–2013 [14]**
**Fig. 4. The combination of the passbands and the blocking of wavelet functions with harmonic groups according to GOST 30804.4.30–2013 [14]**

Предложенный критерий (выражение (2)) позволит на предварительном этапе выбрать оптимальную вейвлет-функцию для расчета действующих значений токов высших гармоник и интергармоник.

**2 Полученные результаты**

Как было отмечено выше, несинусоидальные режимы могут приводить к росту потерь мощности и электроэнергии, а также к повышению температуры токоведущих частей. Необходимость учета интергармоник в расчете потерь мощности определяется в статье [15].

В статье [16] представлен метод, в основе которого лежат преобразования Гильберта, который позволяет проводить спектральный анализ гармоник и интергармоник, при этом производится сдвиг оконной функции и интерполяция.

В зависимости от выходной частоты преобразователя частоты $f_0$ спектральный состав тока (напряжения) может быть различным. В общем случае спектр частот может быть представлен в виде основной гармоники и двух боковых частот:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(2\pi f t) + I_m \cdot m \cdot \sin((2\pi f \mp \Omega)t), \qquad (3)$$

где $I_m$ – амплитуда основной частоты, А;

$I_m \cdot m$ – амплитуда боковых частот, А;

$f$ – частота питающей сети, Гц;

$\Omega$ – угловая частота огибающей, рад/с.

Наличие боковых частот вызывает эффект колебания напряжения.

В качестве исходного сигнала в предлагаемом алгоритме используются мгновенные значения токов, которые формирует измерительный прибор. Следует отметить, что частота дискретизации измерительного прибора должна соответствовать теореме Котельникова, в противном случае возможны искажения в процессе цифровой обработки сигналов [17].

В настоящей работе производится модернизация метода, представленного в работе [18] с учетом дополнительных условий выбора оптимального типа вейвлет-функции по выражению (2).

На первом этапе производится вейвлет-преобразование сигнала тока и на основании детализирующих вейвлет-коэффициентов высоких порядков определяются интервалы присутствия той или иной гармонической (интергармонической) составляющей. Участок времени, на котором происходит существенное изменение сигнала, характеризуется значительным увеличением детализирующих коэффициентов (рис. 5).

Аналогичный подход использования детализирующих вейвлет-коэффициентов высоких порядков для определения границ изменения режима при анализе отклонения напряжения был использован в статье [19, с. 133] и в работе [20, с. 276–277].

Далее каждый элемент матрицы тока возводится в квадрат, в результате чего можно записать следующее выражение

$$\begin{aligned} i^2(t) &= I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \sin^2((\omega \mp \Omega)t) = \\ &= I_m^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + m^2\right) + 2I_m^2 \cdot m \cdot \cos\Omega \cdot t + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \cos 2\Omega t + \\ &+ I_m^2 \cdot \left(m^2 - \frac{1}{2}\right) \cdot \cos 2\omega t - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega - \Omega) - \\ &- I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega + \Omega) - \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega - \Omega) - \\ &- \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega + \Omega). \end{aligned} \qquad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при возведении исследуемой функции в квадрат в сигнале появляется постоянная составляющая тока и частоты $\Omega$, $2\Omega$, $2\omega$ и др. Практический интерес представляет частота огибающей – $\Omega$, что позволит определить частоту интергармоники.

В результате частотной декомпозиции сигнала тока (выражение (4)) и оценки спектральной плотности (метод Уэлча, Барлетта и др.) получаем частоту огибающей $\Omega$, из которой определяется частота интергармоники (рис. 6).

Модернизированный алгоритм расчета потерь мощности от высших гармоник и интергармоник представлен на рис. 7.

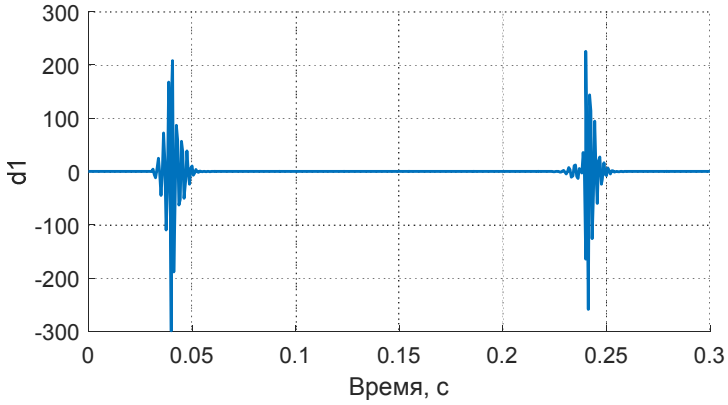


**Рис. 5. График детализирующего вейвлет-коэффициента d1**
**Fig. 5. Detail of the wavelet coefficient d1**

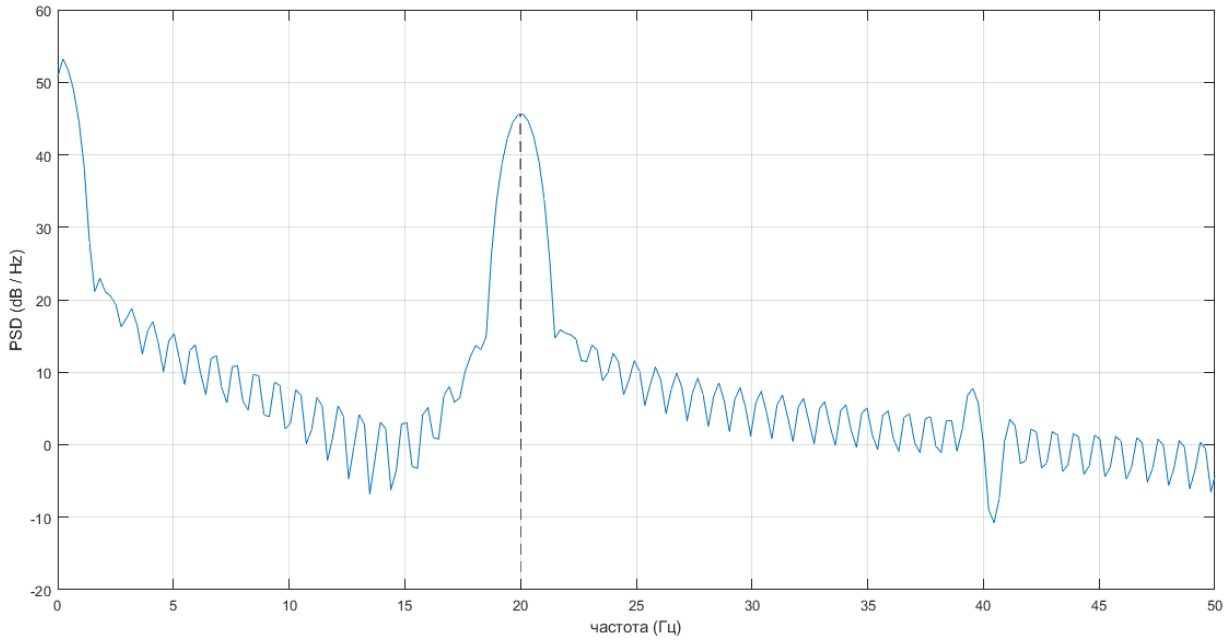


**Рис. 6. Поиск огибающей частоты методом Уэлча**
**Fig. 6. Finding the frequency envelope using the Welch method**

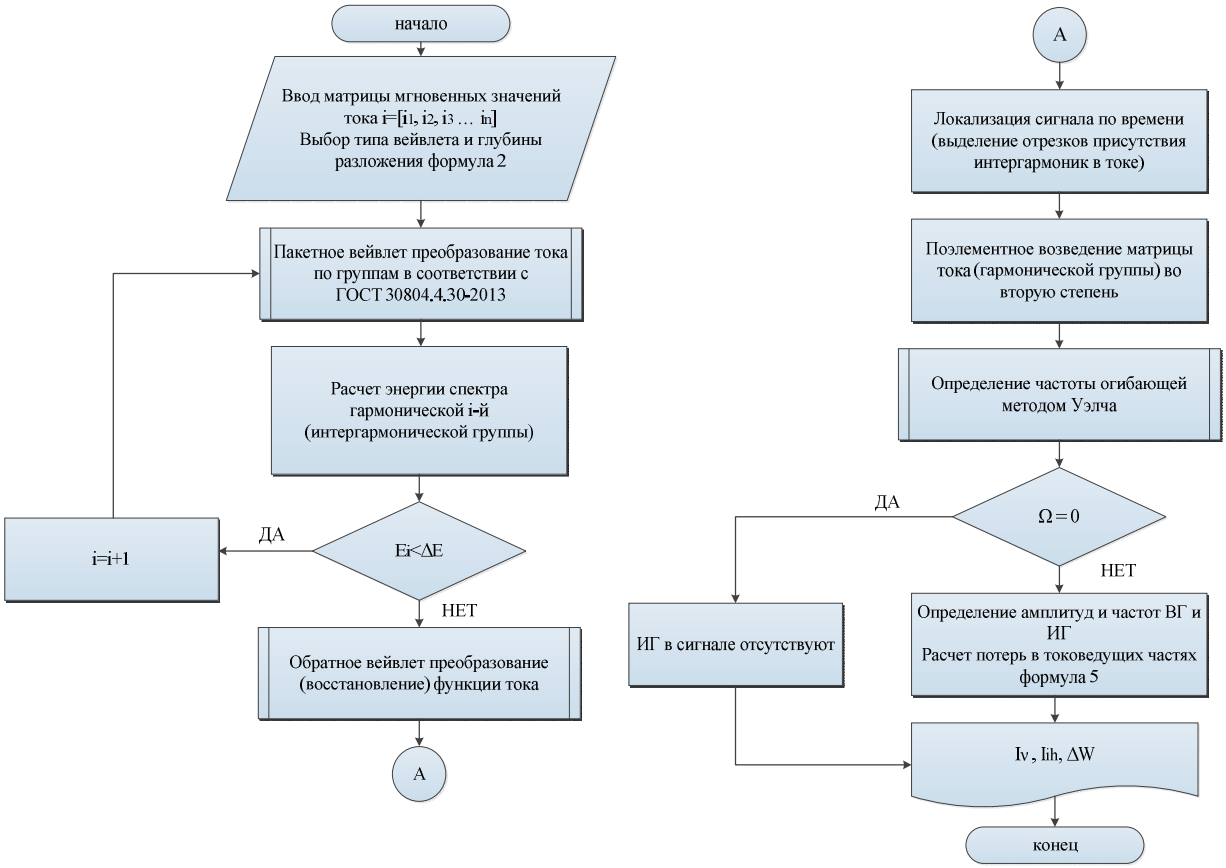


**Рис. 7. Предлагаемый алгоритм**
**Fig. 7. The proposed algorithm**

**Результаты численного эксперимента**
**Numerical experiment results**

| $f$, Гц | 50 | 130 | 150 | **230** | 250 | 350 | **370** | 450 | 470 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_m$, А | 85,685 | 14,985 | 18,23 | 8,89 | 17,94 | 11,927 | 8,87 | 7,47 | 4,48 |
| $\varepsilon$, % | 0,02 | 0,1 | 1,27 | **3,42** | 0,33 | 0,61 | **2,64** | 0,4 | 0,44 |
| $\Delta P$, кВт | 4,23 | 0,13 | 0,19 | 0,05 | 0,19 | 0,08 | 0,05 | 0,03 | 0,01 |

В результате работы алгоритма определяются действующие значения тока высшей гармоники $I_\nu$, и интергармоники $I_k$. Также с помощью детализирующих коэффициентов возможно определить интервалы времени, в течение которых присутствуют отдельные высокочастотные компоненты $t_i$, $t_j$. В этом случае потери в токоведущих частях возможно определить по известной формуле

$$\Delta W_\Sigma = \sum_{\nu=1}^{n} I_\nu^2 R t_i k_{\Pi\nu} + \sum_{ih=1}^{n} I_{ih}^2 R t_j k_{\Pi ih}, \qquad (5)$$

где $R$ – активное сопротивление жилы кабеля;

$k_{\Pi\nu}$, $k_{\Pi ih}$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект для соответствующей частоты гармоники и интергармоники.

Поверхностный эффект может быть учтен в соответствии с простейшей формулой [21, с. 64]

$$R_n = R_0\sqrt{\nu}. \qquad (6)$$

Формула (6), как было показано в работе [22], «является достаточно грубым приближением и, начиная с 5-й гармоники, дает значительную погрешность» [22, с. 188].

Увеличение активного сопротивления при протекании токов ВГ в работе [23] оценивалось по формуле

$$R_n = R_0\left(0{,}187 + 0{,}532\sqrt{n}\right), \qquad (7)$$

где $R_0$ – сопротивление жилы на частоте 50 Гц;

$n$ – номер гармоники.

В соответствии с действующей нормативной базой [14] гармоники тока не нормируются, в то время как максимальной учитываемой частотой напряжения, в том числе и фиксируемой анализаторами качества электроэнергии, функционирующими по [14], является 40-я гармоника (2 кГц). В настоящем алгоритме примем этот уровень учитываемых гармоник. Однако в ряде отраслей, например в металлургии, исследователи [24, с. 103] указывают на целесообразность учета гармоник более высокого порядка.

Произведем расчет потерь в кабеле АВВГ 3×25 с погонными параметрами $r_0 = 1{,}28$ Ом/км, $x_0 = 0{,}0622$ Ом/км, длиной $l = 450$ м. Для высших гармоник и интергармоник с учетом огибающей частоты (см. рис. 6) был произведен расчет амплитудных значений тока с применением заявленной методики. Погрешность в определении величины тока по сравнению с методом объединения гармонических и интергармонических групп составила до 3,5 % (см. таблицу). Величина потерь энергии в кабеле будет зависеть от длительности присутствия высокочастотных составляющих в графике нагрузки.

Наличие погрешности обусловлено прежде всего эффектом растекания спектра, что свойственно преобразованию Фурье. Метод, заявленный в [13], по группировке гармонических и интергармонических групп также сохраняет погрешность. Представленный алгоритм позволит повысить точность расчета потерь в токоведущих частях при несинусоидальных режимах. Вейвлет-анализ позволяет более точно определить частоту интергармоник, а также зафиксировать длительность присутствия этой частоты в сигнале тока.

**Заключение**

В работе предложена модернизация алгоритма расчета потерь энергии при несинусоидальных режимах электрических сетей. Алгоритм основан на математическом аппарате вейвлет-преобразования. На основе предложенного критерия выбора оптимального типа вейвлет-функции производится расчет частот, амплитуд высших гармоник и интергармоник, а также длительности присутствия высокочастотных составляющих в исследуемом сигнале тока. Возможность представления результатов анализа в трехмерной интерпретации «амплитуда – частота – время» является безусловным преимуществом вейвлет-анализа. Предложенный в работе метод позволит повысить точность оценки потерь в токоведущих частях для дальнейшей технико-экономической оценки технических мероприятий по фильтрации высших гармоник и интергармоник.

**Список литературы**

1. Hanzelka Z., Bien A. “Power Quality Application Guide: Harmonics & Interharmonics”, A guide material by Leonardo Power Quality Initiative, Copper Development Association, 2004.

2. Определение интергармоник тока асинхронного двигателя с переменной периодической нагрузкой / Б.А. Авдеев, С.Г. Черный, И.С. Моисеев, А.А. Жиленков // Электротехника. 2022. № 6. С. 39–44. DOI: 10.53891/00135860_2022_6_39

3. Eidson B., Halpin M. An evaluation of the extent of correlation between interharmonic and voltage fluctuation measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31, iss. 2. P. 753–760. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2480715

4. Interharmonics: theory and modeling / A. Testa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, iss. 4. P. 2335–2348. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505

5. Сивоконь В.П., Лапшов Д.В., Белов О.А. Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник КамчатГТУ. 2019. № 48. С. 18–27. DOI: 10.17217/2079-0333-2019-48-18-27

6. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Качество тока: аспекты оценки и нормирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20, №4. С. 23–35. DOI: 10.14529/power200403

7. Доброскок Н.А. Лавриновский В.С. Спектральный анализ базовых алгоритмов широтно-импульсного управления без обратной связи для двухуровневых преобразователей частоты // Электротехника. 2021. № 3. С. 21–26.

8. Степанов П.И. Закураев В.В. Модель и алгоритм оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования на основе комплексного анализа тока и вибрации // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 2 (36). С. 122–127. DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.015

9. Barros J., Diego R.I., de Apráiz M. Applications of Wavelet Transform for Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems: A Review // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2012. Vol. 61, iss. 10. P. 2604–2611. DOI: 10.1109/TIM.2012.2199194

10. Morsi W., El-Hawary M. Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on wavelet packet transform; Part II: case studies and results // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2013. Vol. 35 (1). P. 8–14. DOI: 10.1109/cjece.2010.5783379

11. Hui J., Xu W., Yang H. A Method to determine the existence of genuine interharmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. Vol. 27 (3). P. 1690–1692. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2198313

12. Sheshyekani K., Fallahi G., Hamzeh M., Kheradmandi M. A General Noise-Resilient Technique Based on the Matrix Pencil Method for the Assessment of Harmonics and Interharmonics in Power Systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, no. 5. p. 2179–2188. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2625329

13. ГОСТ 30804.4.7–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.

14. ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ. 2014. 52 с.

15. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 2 (46). С. 61–67.

16. Xiong J., Wang B. Measuring power system harmonics and interharmonics by envelope spectrum analysis» // Przeglad Elektrotechniczny. 2010. Vol. 86, no. 12. P. 319–324.

17. Обеспечение когерентности цифровой обработки сигналов токов и напряжений электроэнергетических систем при снижении частоты дискретизации / А.Л. Куликов, А.Б. Лоскутов, П.В. Ильюшин, А.А. Севостьянов // Электричество. 2020. № 8. С. 5–16. DOI: 10.24160/0013538020208516

18. Разработка метода расчета потерь мощности в токоведущих частях при наличии интергармоник / Д.С. Осипов, Д.В. Коваленко, Л.А. Файфер и др. // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 60–65.

19. Latran M.B., Teke A. A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm // International journal of electric power and energy systems. 2015. Vol. 71. P. 131–139. DOI: ijepes.2015.02.040

20. Voltage sag and swell detection and segmentation based on independent component analysis / E.A. Nagata, D.D. Ferreira, C.A. Duque, A.S. Cequeira // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 155. P. 274–280. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.10.029

21. Жежеленко И.В., Саенко. Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.

22. Манусов В.З., Хрипков В.В., Фролова В.В. Сравнительный анализ математических моделей для определения коэффициента увеличения активного сопротивления проводников от высших гармоник // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 184–188.

23. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В.Н. Тульский, И.И. Карташев, Р.Р. Насыров, М.Г. Симуткин // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 39–44.

24. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 4. С. 96–105. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

**References**

1. Hanzelka Z., Bien A. “Power Quality Application Guide: Harmonics & Interharmonics”, A guide material by Leonardo Power Quality Initiative, Copper Development Association, 2004.

2. Avdeev B.A., Chernyi S.G., Moiseev I.S., Zhilenkov A.A. Finding of current interharmonics of asynchronous motor working under variable periodic load. *Elektrotekhnika.* 2022;6:39–44. (In Russ.) DOI: 10.53891/00135860_2022_6_39

3. Eidson B., Halpin M. An evaluation of the extent of correlation between interharmonic and voltage fluctuation measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2016;31(2):753–760. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2480715

4. Testa A. et al. Interharmonics: theory and modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007;22(4):2335–2348. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505

5. Sivokon V.P., Lapshov D.V., Belov O.A. Diagnostic signs of non-standard nonlinearity display in electric networks. *Bulletin of Kamchatka state technical university*. 2019;48:18–27. (In Russ.) DOI: 10.17217/2079-0333-2019-48-18-27

6. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Current Quality: Assessment and Standardization Aspects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2020;20(4):23–35. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200403

7. Dobroskok N.A., Lavrinovskiy V.S. Spectral Analysis of Basic Algorithms of Pulse-Width Modulation Control without Feedback in Two-Level Frequency Converters. *Russian Electrical Engineering.* 2021;92(3):139–144. DOI: 10.3103/S1068371221030044

8. Stepanov P.I. Zakuraev V.V. Model and algorithm for estimating the residual life of electromechanical equipment based on comprehensive analysis of current and vibration. *South-Siberian Scientific Bulletin.* 2021;2(36):122–127. (In Russ.) DOI: 10.25699/SSSB.2021.36.2.015

9. Barros J., Diego R.I., de Apráiz M. Applications of Wavelet Transform for Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems: A Review. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012;61(10):2604–2611. DOI: 10.1109/TIM.2012.2199194

10. Morsi W., El-Hawary M. Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on wavelet packet transform; Part II: Case studies and results. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013;35(1):8–14. DOI: 10.1109/cjece.2010.5783379

11. Hui J., Xu W., Yang H. A Method to determine the existence of genuine interharmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012;27(3):1690–1692. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2198313

12. Sheshyekani K., Fallahi G., Hamzeh M., Kheradmandi M. A General Noise-Resilient Technique Based on the Matrix Pencil Method for the Assessment of Harmonics and Interharmonics in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(5):2179–2188. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2625329

13. *GOST 30804.4.7–2013. Sovmestimost’ tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Obshcheye rukovodstvo po sredstvam izmereniy i izmere-niyam garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya i podklyuchayemykh k nim tekhnicheskikh sredstv* [State Standard 30804.4.7–2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto]. Moscow: Standartinform; 2013. 40 p. (In Russ.)

14. *GOST 30804.4.30–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii* [State Standard 30804.4.30–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow: Standartinform; 2014. 52 p. (In Russ.)

15. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Analiz nagreva kabel'nykh liniy tokami vysshikh garmonik i intergarmonik. *Kazan state power engineering university bulletin = Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020;2(46):61–67. (In Russ.)

16. Xiong J., Wang B. Measuring power system harmonics and interharmonics by envelope spectrum analysis. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2010;86(12):319–324.

17. Kulikov A.L., Loskutov A.B. Ilyushin P.V., Sevost'yanov A.A. Securing coherency in digital processing of electric power system current and voltage signals with decreasing the sampling frequency. *Elektrichestvo*. 2020;8:5–16. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013538020208516

18. Osipov D.S., Kovalenko D.V., Faifer L.A., Kiselyov B. Yu., Dolgikh N.N. Development of conductive parts power losses calculation method in case of interharmonics. *Omsk scientific bulletin = Omskiy nauchnyy vestnik.* 2017;4(154): 60–65. (In Russ.)

19. Latran M.B., Teke A. A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm. *International journal of electric power and energy systems.* 2015;71:131–139. DOI: ijepes.2015.02.040

20. Nagata E.A., Ferreira D.D., Duque C.A., Cequeira A.S. Voltage sag and swell detection and segmentation based on independent component analysis. *Electric Power Systems Research*. 2018;155:274–280. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.10.029

21. Zhezhelenko I.V., Sayenko. Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol’ na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Electric power quality indicators and their control at industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat; 2000. 252 p. (In Russ.)

22. Manusov V.Z., Khripkov V.V., Frolova V.V. Comparative analysis of mathematical models for determining the coefficient of increasing the active resistance of conductors from higher harmonics. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2018;1:184–188. (In Russ.)

23. Tul'skii V.N., Kartashev I.I., Nasyrov R.R., Simutkin M.G. The influence of current higher harmonics on the operation modes of cables in the 380 V distribution network. *Industrial power engineering*. 2013;5:39–44. (In Russ.)

24. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university.* 2016;14(4):96–105. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

***Информация об авторах***

**Осипов Дмитрий Сергеевич**, д-р техн. наук, проф., Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; ossipovdmitriy@list.ru.

**Лютаревич Александр Геннадьевич**, канд. техн. наук, доц., Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; l.alexander@inbox.ru.

**Ткаченко Всеволод Андреевич**, преподаватель, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; sevaatmail@gmail.com.

**Логунова Яна Юрьевна**, аспирант, Политехническая школа, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; jana_logunova@mail.ru.

***Information about the authors***

**Dmitry S. Osipov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; ossipovdmitriy@list.ru.

**Alexander G. Lyutarevich**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; l.alexander@inbox.ru.

**Vsevolod A. Tkachenko**, Lecturer, Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; sevaatmail@gmail.com.

**Yana Yu. Logunova**, Postgraduate Student, Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; jana_logunova@mail.ru

***Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена после рецензирования 12.01.2023; принята к публикации 12.01.2023.***

***The article was submitted 21.12.2022; approved after review 12.01.2023; accepted for publication 12.01.2023.***