

РАСЧЕТ РЕЖИМА ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ФАНЕРНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Безаварийное функционирование элементов системы электроснабжения фанерных производств во многом зависит от поддержания требуемого качества электрической энергии. При проектировании системы электроснабжения фанерных производств необходимо особое внимание уделять расчету режима высших гармоник, т.к. для осуществления технологического процесса по производству фанеры используются мощные полупроводниковые управляемые выпрямители. В статье рассматривается управляемый выпрямитель, который необходим для работы четырехфазового лущильного станка. Авторами установлено, что данный агрегат генерирует в сеть токи высших гармоник, которые оказывают отрицательное влияние на все элементы системы электроснабжения. При этом в настоящее время отсутствует методика расчета режима высших гармоник в системе электроснабжения фанерного производства. Следовательно, целью исследования является разработка методики расчета режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств. Для достижения поставленной цели был проведен эксперимент на действующем фанерном предприятии в Кировской области. В качестве объекта исследования выступил четырехфазовый лущильный станок. В ходе исследования установлено, что высшие гармоники, генерируемые главным приводом лущильного станка, изменяются случайным образом. В расчетах предложено их рассматривать как случайные величины. Определены статистические законы распределения высших гармоник и их числовые характеристики. Получены аналитические выражения для вычисления амплитуд высших гармоник через амплитуду основной гармонической составляющей тока при отсутствии информации об углах управления и коммутации выпрямителя. Предложенная методика позволяет рассчитать амплитудные спектры токов высших гармоник в ветвях и напряжения в узлах системы электроснабжения фанерного производства. Результаты расчетов по предложенной методике рекомендуется использовать для решения ряда практических задач.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрическая сеть фанерного производства, управляемый выпрямитель, лущильный станок, высшие гармоники, несинусоидальность напряжения, режим высших гармоник, методика расчета.

Введение. На сегодняшний день электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой применяются во всех отраслях промышленности, включая объекты деревообрабатывающего комплекса. Нелинейные нагрузки приводят к значительному повышению уровня гармонических составляющих токов и напряжений в системе электроснабжения (СЭС), что способствует снижению качества электрической энергии (КЭЭ).

Высшие гармоники (ВГ) тока и напряжения, наложенные на основную гармонику, негативно влияют на приборы и оборудование [1, 2]. В зависимости от типов имеющихся электроприемников ВГ оказывают либо мгновенные (нарушают работу устройств управления электронных приборов, релейной защиты и автоматики, приводят к возникновению вибраций и акустических шумов, вызывают

появление помех), либо длительные (нагрев и механическая усталость материалов, потери электроэнергии) воздействия, о чем свидетельствуют многие авторы [3–5].

Основные источники гармонических искажений на промышленных предприятиях можно разделить на три группы: статические преобразователи, сварочное и дуговое оборудование, насыщаемые электромагнитные устройства.

Современные фанерные предприятия для осуществления технологического процесса используют частотно-регулируемые электроприводы с преобразователями частоты (ПЧ) и двигатели постоянного тока с управляемыми выпрямителями (УВ). ПЧ и УВ являются нелинейными нагрузками и вносят существенный вклад в искажение кривых тока и напряжения в СЭС. Уровень и спектральный со-

став ВГ, генерируемых ПЧ и УВ, определяется видом устройства, схмотехническими решениями, топологией силовой части, схемой управления вентилями и прочее [6].

В настоящее время методика расчета несинусоидальных режимов в СЭС фанерных производств отсутствует, и выбор параметров СЭС осуществляется без учета ВГ тока и напряжения, присутствующих в электрических сетях. Это приводит к появлению ряда нежелательных последствий. Так, например, на трех обследуемых нами фанерных предприятиях вышли из строя конденсаторные батареи (КБ), применяемые для компенсации реактивной мощности. Причина повреждения КБ во всех случаях одна — резонанс токов на частотах ВГ.

При проектировании СЭС фанерных производств необходимо выполнять расчет режима ВГ электрической сети, который сводится к определению амплитудных спектров токов в ветвях и напряжений в узлах схемы замещения СЭС. Расчет необходим для решения таких задач, как:

- оценка соответствия показателей КЭЭ, относящихся к несинусоидальности кривой напряжения, согласно ГОСТ 32144-2013 [7];

- определение степени влияния токов ВГ на элементы СЭС и загрузки элементов токами ВГ;

- прогнозирование дополнительных потерь электроэнергии вследствие протекания по элементам электрической сети токов ВГ;

- расчет величины ущерба, вызванного наличием гармонических составляющих напряжения и тока;

- выбор мероприятий, направленных на снижение уровня ВГ, подбор и определение оптимальных параметров средств, способствующих повышению КЭЭ.

Основной причиной отсутствия методики расчета несинусоидального режима в электрических сетях фанерных производств является отсутствие сведений о режиме работы УВ шпонового производства. В связи с этим актуальным является исследование режимов работы УВ и разработка эффективных методов расчета режимов ВГ в электрических сетях фанерных производств.

Материалы и методы. Теоретические исследования проводились с применением научно-технического обобщения литературных источников по изучаемой теме, методов расчета электрических цепей переменного тока, методов системного анализа. Для оценки параметров несинусоидального режима выполнено экспериментальное исследование на высокотехнологичном предприятии, специализирующемся на производстве широкоформатной березовой фанеры. Для осуществления технологического процесса на производстве эксплуатируется четырехфазовая линия лущения.

Объектом исследования в данной статье является четырехфазовый лущильный станок (ЛС) фирмы Raute [8]. Главный привод станка — двигатель постоянного тока фирмы Siemens с номинальной мощностью 154 кВт серии 1GG6. Для образования трехфазного переменного тока в постоянный ЛС оснащается УВ Sinamics DCM фирмы Siemens. Для электрической сети УВ является нелинейной нагрузкой и, следовательно, источником ВГ.

Измерение токов ВГ на объекте исследования проводилось сертифицированным и прошедшим государственную поверку анализатором КЭЭ «РQM-701», осуществляющим измерения в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30–2013 [9]. Экспе-

Таблица 1

Числовые характеристики статистических законов распределения гармоник тока УВ на интервале осреднения 10 мин/30 мин

Номер гармоники	M, A	σ, A	D, A	max, A
1	90,8/90,9	30,2/26,3	909,2/690,5	115,3/111,5
5	14,8/14,8	4,9/4,3	23,9/18,3	18,3/17,9
7	8,2/8,2	2,7/2,4	7,3/5,7	10,4/10,1
11	7,9/7,9	2,6/2,3	6,9/5,3	10,1/9,7
13	4,7/4,7	1,6/1,4	2,4/1,8	6,1/5,9
17	4,7/4,7	1,6/1,4	2,5/1,9	6,1/5,8
19	3,2/3,2	1,1/0,9	1,1/0,9	4,2/4,0
23	3,2/3,2	1,1/0,9	1,1/0,9	4,1/3,9
25	2,4/2,4	0,8/0,7	0,6/0,5	3,1/2,9

римент длился одни сутки и проводился в реальных условиях эксплуатации ЛС. Регистрация измеренных значений токов ВГ производилась с интервалом осреднения 10 мин по требованиям ГОСТ 32144–2013 [7].

Результаты. В ходе исследования установлено, что в спектре токов присутствуют канонические и аномальные гармоники, при этом наибольшими по величине являются токи 5, 7, 11, 13 гармоник. Преобладание в спектре данных гармоник объясняется тем, что УВ работает по трехфазной мостовой схеме (схема Ларионова).

Установлено, что параметры режима ВГ в электрических сетях фанерного производства изменяются случайным образом. Процесс изменения параметров режима является стационарным и имеет эргодический характер [10].

На основании полученных экспериментальных данных определены числовые характеристики статистических законов распределения токов ВГ (канонических) четырехфазового ЛС (табл. 1) на интервале осреднения 10 и 30 мин.: математическое ожидание M , среднеквадратичное отклонение σ , дисперсия D и максимальное значение max . В расчетах режимов ВГ предложено рассматривать как случайные величины.

Для интервалов осреднения 10 и 30 мин построены зависимости тока n -ной канонической гармоники I_n от тока первой гармоники I_1 . Поскольку зависимости имеют аналогичный вид, то для примера представлена зависимость $I_5 = f(I_1)$ на интервале осреднения 10 мин (рис. 1).

На этапе проектирования СЭС фанерных производств сведения об углах управления α и коммутации γ вентиля УВ отсутствуют. Это не позволяет для расчета амплитуд ВГ использовать известные выражения, например [11]. Авторами предложено определять амплитуды ВГ тока УВ через ток I_1 , используя результаты измерений, полученных в ходе эксперимента.

Установлено, что зависимость $I_n = f(I_1)$ для интервалов осреднения 10 и 30 мин для канонических гармоник может быть описана линейной функцией, имеющей следующий вид:

$$I_n = a_n \cdot I_1, \quad (1)$$

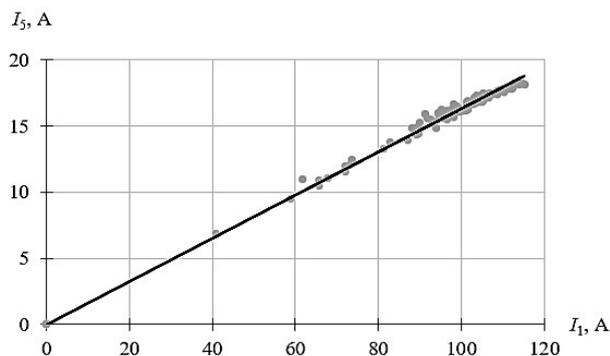


Рис. 1. Аппроксимация зависимости I_3 от I_1 на интервале осреднения 10 мин

Таблица 2

Значения коэффициента a_n

Номер гармоники	Интервал осреднения	
	10 мин.	30 мин.
5	0,163	0,163
7	0,090	0,090
11	0,087	0,087
13	0,051	0,051
17	0,052	0,052
19	0,035	0,035
23	0,035	0,035
25	0,026	0,026

где a_n — коэффициент, представленный рациональным числом; I_1 — среднее значение действующего значения тока основной гармонической составляющей, определенное по результатам эксперимента на интервале осреднения 10 и 30 мин.

На рис. 1 линейная аппроксимация представлена функцией $I_3 = 0,163I_1$, значения коэффициента a_n для канонических гармоник приведены в табл. 2.

При использовании формулы (1) погрешность при расчетах параметров канонических гармоник не превышает 2 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности полученного аналитического выражения для расчета режима ВГ, генерируемых УВ четырехфазного ЛС. Формулу (1) рекомендуется использовать при выполнении расчетов амплитудного спектра тока УВ.

При выполнении расчетов режимов ВГ принимаются следующие допущения:

- источники гармоник — симметричные трехфазные нагрузки, которые генерируют в сеть токи ВГ. В данной статье источником гармоник выступает электропривод постоянного тока с УВ четырехфазового ЛС;

- СЭС симметричная и линейная;

- сопротивления элементов СЭС токам ВГ прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми.

Указанные допущения позволяют рассматривать режим для каждой ВГ независимо от режима другой и использовать для определения амплитудных спектров токов и напряжений принцип наложения.

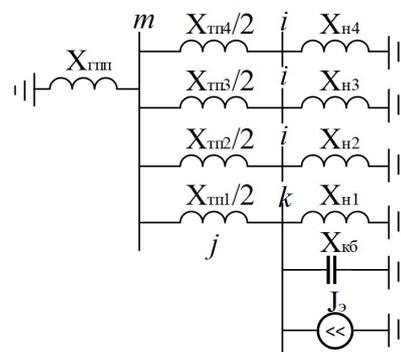


Рис. 2. Расчетная схема замещения СЭС фанерного предприятия:

$X_{ГПП}$ — реактивное сопротивление трансформатора ГПП;
 $X_{ТП4/2}$, $X_{ТП3/2}$, $X_{ТП2/2}$, $X_{ТП1/2}$ — реактивные сопротивления трансформаторов ТП; $X_{Н4}$, $X_{Н3}$, $X_{Н2}$, $X_{Н1}$ — реактивные сопротивления комплексных нагрузок;
 $X_{КБ}$ — реактивное сопротивление конденсаторной батареи; J_3 — источник тока бесконечной мощности, в СЭС фанерного предприятия это УВ ЛС;
 i, m — номера узлов, в которых необходимо найти напряжения ВГ;
 k — номера узлов, к которым подключены источники ВГ;
 j — номер ветви, в которой необходимо найти токи ВГ

Точный расчет и анализ режима ВГ в электрических сетях предполагает учет активных сопротивлений. Однако корректный учет активных сопротивлений элементов СЭС — сложная задача. Авторами был произведен расчет режима участка СЭС фанерного предприятия и установлено, что пренебрежение активными сопротивлениями незначительно влияет на результаты расчета. Величина погрешности расчета параметров режима без учета активных сопротивлений не превышает 1 %, следовательно, в дальнейшем активные сопротивления при расчете режима ВГ учитываться не будут.

Алгоритм расчета режима ВГ основан на методе узловых напряжений [12], который предлагается реализовывать следующим образом:

1. Составляется схема замещения для расчета токов ВГ, которая имеет одну фазу и нейтраль, к которой присоединяются нулевые точки схем замещения генераторов, обобщенных нагрузок, двигателей, батарей конденсаторов и емкостных проводимостей кабельных и воздушных линий большой протяженности.

Источники гармонических искажений представляют источниками токов бесконечной мощности канонических ВГ.

Для рассматриваемой СЭС фанерного предприятия схема замещения представлена на рис. 2.

2. Рассчитываются параметры схем замещения элементов СЭС для каждой гармоники. Параметры схем замещения определяются по известным формулам [11].

3. Для канонических гармоник, генерируемых УВ, определяются математическое ожидание $M(I_n)$ и дисперсия $D(I_n)$ по предлагаемым авторами формулам:

$$M(I_n) = m_n M(I_1), \quad (2)$$

$$D(I_n) = d_n M(I_n), \quad (3)$$

Таблица 3

Значения коэффициента d_n

Номер гармоники	Интервал осреднения	
	10 мин.	30 мин.
5	1,608	1,235
7	0,898	0,681
11	0,873	0,662
13	0,523	0,392
17	0,525	0,396
19	0,359	0,268
23	0,354	0,267
25	0,265	0,198

где $M(I_j)$ — математическое ожидание тока основной гармонической составляющей УВ главного привода ЛС на интервале осреднения 30 мин определяется по результатам эксперимента; m_n, d_n — коэффициенты, представленные рациональными числами, принимаем по табл. 2 и 3 соответственно для канонических гармоник.

При расчете суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения аномальные гармоники (четные и кратные трем) предлагается учитывать при помощи поправочного коэффициента, величина которого, согласно результатам экспериментального исследования, равна 1,03.

4. Особенностью схем замещения для расчета режимов ВГ является отсутствие в них источников ЭДС. Это позволяет в качестве балансирующего узла принимать узел 0 «земля», потенциал которого принимается равным нулю. При этом формула для определения математического ожидания напряжения n -й гармоники для каждого узла i , если источник ВГ подключен к узлу k , будет иметь вид:

$$\begin{aligned} M(U_{ni}) &= M(X_{nik}I_{nk}) = \\ &= X_{nik}M(I_{nk}) = X_{nik}m_nM(I_{1k}), \end{aligned} \quad (4)$$

где X_{nik} — узловое реактивное сопротивление между узлами i и k , определяется по прямому методу расчета [13]; $M(I_{nk})$ — математическое ожидание тока n -й гармоники УВ главного привода ЛС, подключенного к узлу k ; $M(I_{1k})$ — математическое ожидание тока основной гармонической составляющей УВ главного привода ЛС, подключенного к узлу k , на интервале осреднения 30 минут.

Дисперсия напряжения n -й гармоники в узле i :

$$D(U_{ni}) = X_{nik}^2 D(I_{nk}) = X_{nik}^2 d_n M(I_{nk}). \quad (5)$$

5. Рассчитывается математическое ожидание $M(I_{nj})$ и дисперсия $D(I_{nj})$ действующего тока n -й гармоники в ветви j схемы замещения:

$$\begin{aligned} M(I_{nj}) &= \frac{M(U_{nm}) - M(U_{nk})}{X_{nj}} = \\ &= \frac{X_{nim}m_nM(I_{1k}) - X_{nik}m_nM(I_{1k})}{X_{nj}} = \\ &= \frac{m_nM(I_{1k})(X_{nim} - X_{nik})}{X_{nj}} = \\ &= Y_{nj}m_nM(I_{1k})(X_{nim} - X_{nik}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} D(I_{nj}) &= \frac{D(U_{nm}) + D(U_{nk}) - 2\sigma_{U_{nm}}\sigma_{U_{nk}}r_{U_{nm}U_{nk}}}{X_{nj}^2} = \\ &= \frac{d_nM(I_{nk})(X_{nim}^2 + X_{nik}^2 - 2X_{nim}X_{nik}r_{U_{nm}U_{nk}})}{X_{nj}^2} = \\ &= Y_{nj}^2d_nM(I_{nk})(X_{nim}^2 + X_{nik}^2 - 2X_{nim}X_{nik}r_{U_{nm}U_{nk}}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $M(U_{nm}), M(U_{nk}), D(U_{nm}), D(U_{nk})$ — математическое ожидание и дисперсия действующих значений n -й гармоники напряжения в m - и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь; X_{nj} — реактивное сопротивление j -й ветви току n -й гармоники; $\sigma_{U_{nm}}, \sigma_{U_{nk}}$ — среднеквадратичное отклонение действующего значения n -й гармоники напряжения в m - и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь; $r_{U_{nm}U_{nk}}$ — коэффициент корреляции между действующим значением n -й гармоники напряжения в m - и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь.

Предложенная методика расчета режима ВГ в электрических сетях фанерных производств может быть использована и при других мощностях электродвигателей главного привода ЛС. Но для уточнения эмпирических коэффициентов, приведенных в данной статье, рекомендуется выполнить дополнительные экспериментальные исследования.

Заключение

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования спектрального состава сетевых токов УВ, работающего с главным приводом четырехфазового ЛС. Установлено, что ВГ УВ изменяются случайным образом. Получены статистические законы распределения ВГ, генерируемых в сеть УВ, и определены их числовые характеристики.

2. Для определения амплитуд канонических ВГ, генерируемых УВ, работающим в составе главного привода ЛС, получены аналитические выражения. Они позволяют при отсутствии сведений об углах управления и коммутации УВ определить амплитуды канонических ВГ через амплитуду основной гармонической составляющей тока. Погрешность расчетов амплитуд ВГ не превышает 2 %.

3. Предложена методика расчета числовых характеристик амплитудных спектров токов в ветвях и напряжения в узлах ВГ СЭС фанерного производства. Результаты расчетов по предложенной методике рекомендуется использовать для решения ряда практических задач, перечисленных выше.

Список источников

- Хворостенко С. В., Авербух М. А. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для ослабления высших гармоник в цеховых сетях электроснабжения с нелинейными потребителями // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1. С. 84–93. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_84. EDN: ZAYWAP.
- Нос О. В., Востриков А. С., Штанг А. А., Маляво Е. Ю. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. № 12 (330). С. 28–36. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2389. EDN: YEYDQD.
- Бирюлин В. И., Куделина Д. В. Разработка модели для определения источника высших гармоник в системах электроснабжения // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 3. С. 73–87. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-84-3-73-87. EDN: ZLYCDK.

4. Портягин Н. Н., Ершов М. С., Барбасов П. Ю., Чернев М. Ю. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. № 1 (60). С. 61–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. EDN: XWZQHL.
5. Hu Z., Han Y., Zalhaf A. S., Zhou S. [et al.]. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview // Electric Power Systems Research. 2023. № 218. 109234. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
6. Исаева Т. М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции // Главный энергетик. 2016. № 11. С. 32–35. EDN: YGJZXV.
7. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–07–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
8. Veneer peeling // Raute. URL: <https://www.raute.com/lines-and-machines/lines/veneer-peeling> (дата обращения: 01.07.2024).
9. ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01–01–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 58 с.
10. Торопова А. К., Черепанов В. В. Исследование режима высших гармоник в электрических сетях фанерного производства // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. № 1 (67). С. 124–130. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-124-130. EDN: NLRUMY.
11. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промпредприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 252 с. ISBN 5-283-03200-0.
12. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с. ISBN 5-283-0319-8.
13. Гераскин О. Т. Обобщенные параметры электрических сетей. Москва: Энергия: СВИПКэнерго, 1977. 112 с.

ТОРОПОВА Анна Константиновна, аспирант, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Вятского государственного университета (ВятГУ), г. Киров.

SPIN-код: 2130-82524

AuthorID (РИНЦ): 1121463

ORCID: 0000-0002-4450-7669

ResearcherID: JQI-0198-2023

Адрес для переписки: usr22264@vyatsu.ru

ЧЕРЕПАНОВ Вячеслав Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение» ВятГУ, г. Киров.

SPIN-код: 1058-6079

AuthorID (РИНЦ): 610927

ORCID: 0009-0004-6940-2961

Адрес для переписки: stud2398@yandex.ru

Для цитирования

Торопова А. К., Черепанов В. В. Расчет режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 91–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-91-97. EDN: OHSGDN.

Статья поступила в редакцию 05.09.2024.

© А. К. Торопова, В. В. Черепанов

CALCULATION OF THE MODE OF HIGHER HARMONICS IN ELECTRICAL NETWORKS OF PLYWOOD PRODUCTION

The trouble-free operation of the power supply system elements of plywood production largely depends on maintaining the required quality of electric energy. It is essential to focus on calculation of higher harmonics mode at engineering the power supply system of plywood production, as the process uses powerful semiconductor controlled rectifiers. The article discusses the controlled rectifier that is required for the operation of a four-foot veneer peeling machine. The authors determine that the presented unit generates higher harmonic currents into the network. These currents negatively affect all elements of the power supply system. However, there is no calculation method for the mode of higher harmonics in the power supply system of plywood production. Therefore, the purpose of the research is to develop a methodology for calculating the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production. The experiment was conducted at an operating plywood production in the Kirov region to achieve the research purpose. The investigation object was a four-foot veneer peeling machine. It was found that the higher harmonics generated by the main drive of the veneer peeling machine change randomly. The authors proposed to consider them as random variables in the calculations. The research determined statistical laws of the higher harmonics distribution and their numerical features. The authors obtained analytical expressions for calculating the amplitudes of the higher harmonics through the amplitudes of the main harmonic component of the current in the absence of information about the control and switching angles of the rectifier. The proposed technique allows calculating amplitude spectra of higher harmonic currents in branches and voltages in nodes of the power supply system of plywood production. According to the proposed methodology, the results of calculations are recommended for solving series of practical problems.

Keywords: electric power quality, electrical networks of plywood production, controlled rectifier, veneer peeling machine, higher harmonics, non-sinusoidal voltage, mode of higher harmonics, calculation method.

References

1. Khvorostenko S. V., Averbukh M. A. Sintez passivnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya oslableniya vysshikh garmonik v tsekhovykh setyakh elektrosnabzheniya s nelineynymi potrebitelyami [Synthesis of passive filter — compensating devices for attenuation higher harmonics in power supply system of workshop with non-linear consumers]. *Intellektual'naya elektrotehnika. Smart Electrical Engineering*. 2019. No. 1. P. 84–93. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_84. EDN: ZAYWAP. (In Russ.).
2. Nos O. V., Vostrikov A. S., Shtang A. A., Malyavko E. Yu. Povysheniye energoeffektivnosti proizvodstva za schet primeneniya silovykh fil'trov vysshikh garmonik [Enhancing energy efficiency of industrial production by using power harmonic filters]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. No. 12 (330). P. 28–36. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2389. EDN: YEYDQD. (In Russ.).
3. Biryulin V. I., Kudelina D. V. Razrabotka modeli dlya opredeleniya istochnika vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya [Model development for determining the source of higher harmonics in power supply systems]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskii zhurnal. The International Technical-Economic Journal*. 2022. No. 3. P. 73–87. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-84-3-73-87. EDN: ZLYCDK. (In Russ.).
4. Portnyagin N. N., Ershov M. S., Barbasov P. Yu., Chernev M. Yu. Modelirovaniye vliyaniya velichiny nelineynoy nagruzki na kachestvo elektroenergii promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem [Modelling influence of nonlinear loading's level on quality of the electric power of electrotechnical systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2017. No. 1 (60). P. 61–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. EDN: XWZQHL. (In Russ.).
5. Hu Z., Han Y., Zalhaf A. S., Zhou S. [et al.]. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview. *Electric Power Systems Research*. 2023. No. 218. 109234. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234. (In Engl.).
6. Isayeva T. M. O rezul'tatakh issledovaniya vysshikh garmonik na vysokovol'tnoy podstantsii [Results of researching high harmonics at high voltage substation]. *Glavnyy energetik*.

Chief Power Engineer. 2016. No. 11. P. 32–35. EDN: YGJZXV. (In Russ.).

7. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).

8. Veneer peeling // Raute. URL: <https://www.raute.com/lines-and-machines/lines/veneer-peeling> (accessed: 01.07.2024). (In Engl.).

9. GOST 30804.4.30–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, 2014. 58 p. (In Russ.).

10. Toropova A. K., Cherepanov V. V. Issledovaniye rezhima vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh fanernogo proizvodstva [Investigation of the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2024. No. 1 (67). P. 124–130. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-124-130. EDN: NLRUMY. (In Russ.).

11. Zhezhelenko I. V., Sayenko Yu. L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na prompredpriyatiyakh [Power quality in industrial plants]. 3 ed., revised and suppl. Moscow, Energoatomizdat, 2005. 261 p. (In Russ.).

12. Zhezhelenko I. V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. 4 ed., revised and

suppl. Moscow, Energoatomizdat, 2000. 331 p. ISBN 5-283-0319-8. (In Russ.).

13. Geraskin O. T. Obobshchennyye parametry elektricheskikh setey [Generalized parameters of electrical networks]. Moscow, 1977. 112 p. (In Russ.).

TOROPOVA Anna Konstantinovna, Graduate Student, Senior Lecturer of the Electricity Supply Department, Vyatka State University (VyatSU), Kirov.

SPIN-code: 2130-82524

AuthorID (RSCI): 1121463

ORCID: 0000-0002-4450-7669

ResearcherID: JQI-0198-2023.

Correspondence address: usr22264@vyatsu.ru

CHEREPANOV Vyacheslav Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Electricity Supply Department, VyatSU, Kirov.

SPIN-code: 1058-6079

AuthorID (RSCI): 610927

ORCID: 0009-0004-6940-2961

Correspondence address: stud2398@yandex.ru

For citations

Toropova A. K., Cherepanov V. V. Calculation of the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 91–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-91-97. EDN: OHSGDN.

Received September 05, 2024.

© A. K. Toropova, V. V. Cherepanov