

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299>

УДК 621.31

## Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети

Я. Э. Шклярский<sup>1)</sup>, К. К. Лобко<sup>1)</sup>, Ю. Н. Кузнецова<sup>1)</sup>, М. С. Воробьев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В статье рассматриваются методики замещения составной двигательной нагрузки как потребителя высших гармоник. Используются две схемы замещения, по которым проводились расчеты комплексного сопротивления нагрузки, а затем сравнивались с результатами имитационного моделирования. Моделирование осуществлялось в среде MATLAB Simulink, использовалась библиотека Specialized Power Systems, в которой была разработана имитационная модель с двигателями и источником гармонических искажений. Для исследования выбраны пять асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором марки АИР с мощностями, варьирующимися от 0,75 до 5,50 кВт. Моделирование проводилось при разных нагрузках двигателей. Момент на валу изменялся со значениями 50; 70; 90 и 100 % от номинальных значений каждого двигателя. В качестве источника гармонических токов в сети использовался шестипульсный диодный выпрямитель, генерирующий гармоники с номерами 5, 7, ..., 25, соответствующие пульсности, равной шести. Фиксировались осциллограммы токов и напряжений в точке общего подключения асинхронных двигателей и выпрямителя, которые впоследствии использовались для расчета комплексного сопротивления. По результатам работы получены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики импеданса составной двигательной нагрузки, анализ которых выявил несходимость расчетных методов с имитационным моделированием. Сделаны выводы о необходимости продолжать исследования в данном направлении, так как имеются качественные расхождения в функциональной зависимости комплексного сопротивления от номера гармоники с экспериментальными данными, полученными для одиночного асинхронного двигателя. Результаты работы могут быть использованы при расчетах коэффициента искажения по напряжению и моделировании режимов, связанных с высшими гармониками, как на существующих предприятиях, так и при их проектировании, что повысит надежность и эффективность работы электрических сетей.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, качество электроэнергии, схема замещения, импеданс, коэффициент искажения

**Для цитирования:** Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети / Я. Э. Шклярский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 285–299. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299>

---

### Адрес для переписки

Лобко Кирилл Константинович  
Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II  
Васильевский остров, 21 линия, д. 2  
199106, Санкт-Петербург, Российская Федерация  
Тел.: +7 (981)836-88-96  
kirill1999lobko@yandex.ru

### Address for correspondence

Lobko Kirill K.  
Empress Catherine II Saint Petersburg  
Mining University  
2, 21 Line, Vasilievsky Island  
199106, Saint Petersburg, Russian Federation  
Tel.: +7 (981)836-88-96  
kirill1999lobko@yandex.ru

---

## Investigation of the Composite Motor Load in the Presence of Higher Harmonics in the Electrical Network

Ya. E. Shklyarskiy<sup>1)</sup>, K. K. Lobko<sup>1)</sup>, Yu. N. Kuznetsova<sup>1)</sup>, M. S. Vorobyov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
(Saint Petersburg, Russian Federation)

**Abstract.** The article discusses the methods of substitution of a compound motor load as a consumer of higher harmonics. Two substitution schemes were used. The calculation of the complex resistance against them was compared with the results of simulation modeling. The simulation was carried out in the MATLAB Simulink environment, with the use of the Specialized Power Systems library, in which a simulation model with motors and a source of harmonic distortion was developed. Five asynchronous motors with a squirrel-cage rotor of the AIR brand with powers varying from 0.75 to 5.50 kW were selected for the study. The simulation was carried out at different motor loads. The shaft torque varied with values of 50; 70; 90 and 100 % of the nominal values of each motor. A six-pulse diode rectifier was used as a source of harmonic currents in the network, generating harmonics with numbers 5, 7, ..., 25, corresponding to a pulse rate equal to six. Oscillograms of currents and voltages were recorded at the point of common connection of asynchronous motors and the rectifier, which were subsequently used to calculate the complex resistance. Based on the results of the work, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the impedance of a composite motor load were obtained, the analysis of which revealed the incongruence of calculation methods with simulation modeling. Conclusions have been drawn on the need to continue research in this direction, since there are qualitative discrepancies in the functional dependence of the complex resistance on the harmonic number with the experimental data obtained for a single asynchronous motor. The results of the work can be used in calculating the voltage distortion factor and modeling modes associated with higher harmonics both at existing enterprises and during their design, which will increase the reliability and efficiency of electrical networks.

**Keywords:** higher harmonics, power quality, equivalent circuit, impedance, distortion factor

**For citation:** Shklyarskiy Ya. E., Lobko K. K., Kuznetsova Yu. N., Vorobyov M. S. (2024) Investigation of the Composite Motor Load in the Presence of Higher Harmonics in the Electrical Network. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 285–299. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299> (in Russian)

### Введение

Проблемы электромагнитной совместимости и качества электрической энергии продолжают оставаться одними из важнейших для систем электроснабжения [1–3] в контексте стратегического развития отдельных стран и регионов [4–6] и, как следствие, увеличения спроса на электроэнергию. Данный фактор обусловлен наличием нелинейных элементов в сетях, таких как диоды [7], транзисторы и тиристоры. В свою очередь, вышеперечисленные элементы находятся в составе электротехнических устройств, без которых трудно представить современные промышленные предприятия [8–10]: преобразователи частоты [11–13], управляемые и неуправляемые выпрямители [14–16], регуляторы мощности, источники возобновляемой энергетики [17–19] и накопители электроэнергии [20]. Для снижения гармоник в сети используют различные фильтры, которые могут классифицироваться как активные, пассивные и гибридные [21–23]. На сегодняшний день активные фильтры являются достаточно дорогим решением для определенных предприятий [24], а также не всегда могут подходить по

напряжению сети и мощности гармоник. Задачу по снижению воздействий высших гармоник в сетях можно решить более дешевыми пассивными фильтрами, однако для этого необходим расчет гармонических токов и коэффициентов искажения при различной конфигурации электрической сети [25–27].

Прямая задача по расчету параметров сети на высших гармониках: экспериментально можно измерить ток и напряжение и найти сопротивление на гармониках. При этом напряжение и ток раскладываются в ряды Фурье, находится сопротивление на каждой гармонике и затем – функция сопротивления от номера гармоники. Обратная задача по расчету высших гармоник – при известном напряжении и сопротивлении нагрузок посчитать гармонические токи [28, 29]. Сопротивления нагрузок на сегодняшний день обычно представляются импедансами, то есть полными сопротивлениями. Импеданс, как комплексная величина, имеет два параметра: амплитуду и аргумент, которые изменяются в зависимости от частоты или номера гармоники. Схема сети представляется своим эквивалентом на каждой гармонике отдельно для ее расчета и анализа [30]. Полные токи или напряжения ветвей затем суммируются по принципу суперпозиции. Примеры эквивалентирования нагрузок и принцип расчета сети на высших гармониках наглядно продемонстрированы на рис. 1 и 2 соответственно.

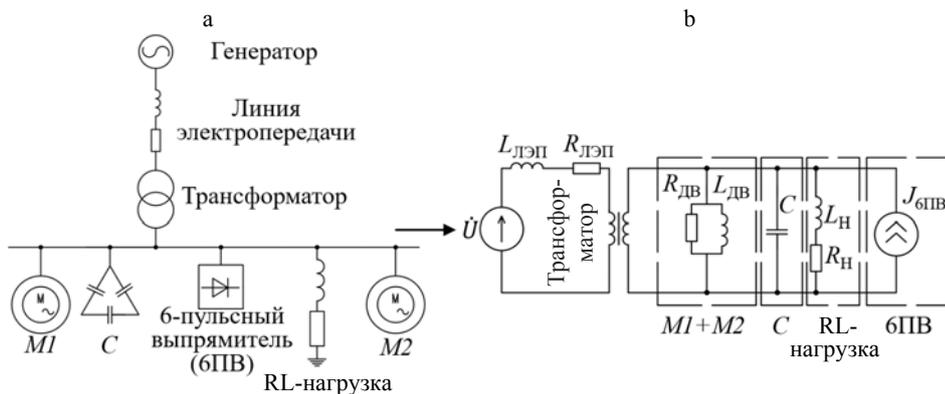


Рис. 1. Переход от общей схемы предприятия (а) к эквивалентной (б)

Fig. 1. Transition from the general enterprise scheme (a) to the equivalent one (b)

Таким образом, вышеописанный метод – метод анализа несинусоидальности напряжений с помощью схем замещения – потенциально может позволить определить показатели качества электроэнергии сети и провести их оценку на соответствие стандартным величинам, если известны схемы замещения элементов сети и нагрузок.

Схемы замещения потребителей и генераторов токов высших гармоник являются наиболее важными исходными данными при расчете показателей качества электроэнергии. Если эквивалентирование объектов электротехнического комплекса выполнено с большим количеством допущений, результаты будут иметь большие расхождения с экспериментальными данными.

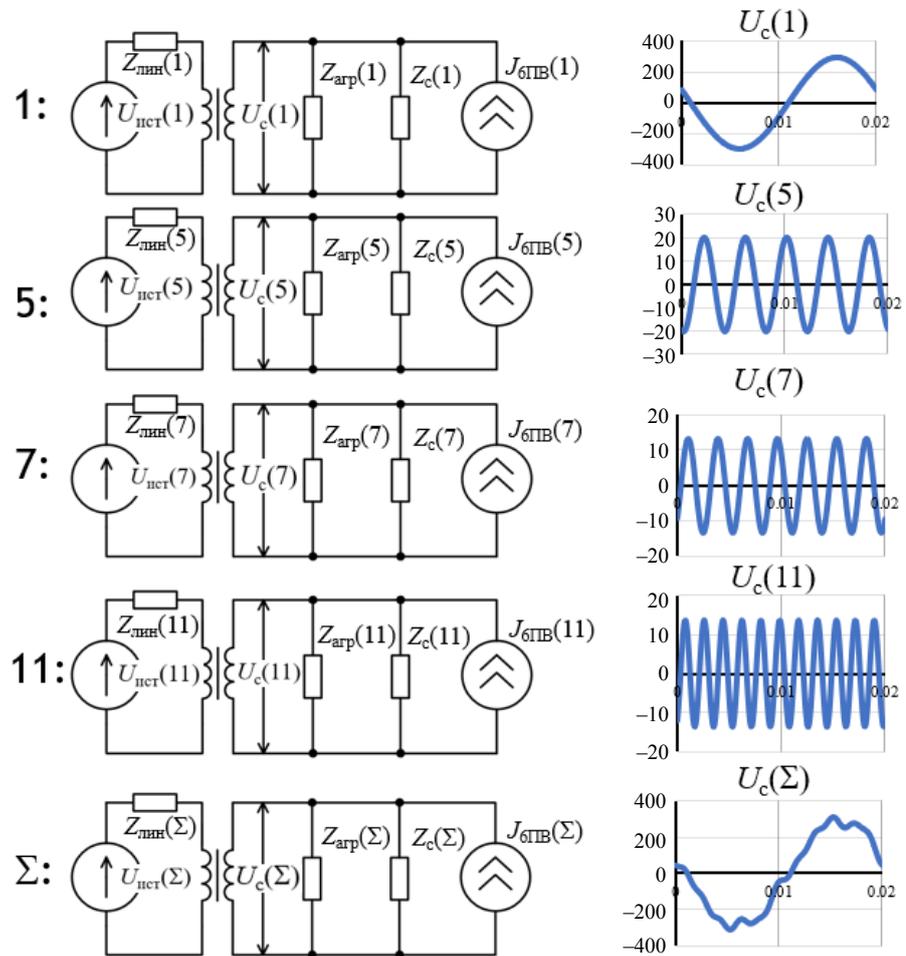


Рис. 2. Расчет искаженного напряжения по эквивалентной схеме

Fig. 2. Calculation of distorted voltage using the equivalent circuit

Современные методы предлагают составлять схемы замещения объектов электротехнических комплексов на основе: покомпонентного состава нагрузки [31], а также экспериментальных измерений [32], которые могут использовать алгоритмы нейронных сетей как методы обработки данных [33]. Одним из подходов также является агрегирование общей нагрузки в единую эквивалентную модель [30, 34–35]. Здесь под общей нагрузкой понимается множество потребителей, которые представляют неделимым целым: офисное здание, жилой дом, серверное помещение, распределительную подстанцию и т. п. [36–38].

Данная работа будет посвящена исследованию на основе имитационного моделирования характера агрегированной или составной асинхронной двигательной нагрузки, так как зачастую при расчете коэффициента искажения до конца не известно, сколько двигателей может быть подключено к шинам сети и как в таком случае она может эквивалентироваться.

### Схемы замещения в данной работе

Для исследования составной двигательной нагрузки использовалось имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink. Всего было выбрано пять асинхронных двигателей марки АИР.

В данной работе имитационное моделирование сравнивалось с существующими методами замещения обобщенной двигательной нагрузки в качестве потребителя высших гармоник. Первая методика взята из рекомендаций CIGRE, вторая методика основывается на методе, предлагаемом И. В. Жежеленко для асинхронных двигателей. Схемы замещения приведены на рис. 3.

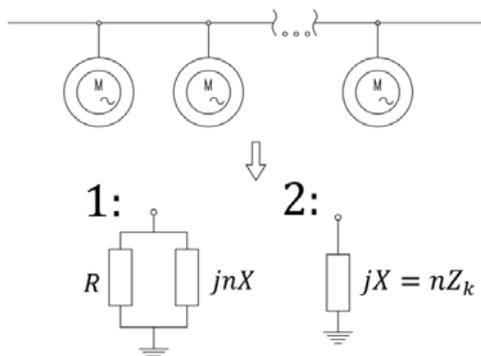


Рис. 3. Схемы замещения агрегированной двигательной нагрузки

Fig. 3. Equivalent circuits for aggregated motor load

Методика, рассмотренная в [25], рекомендует эквивалентирование множества двигателей как параллельное соединение активного (статический компонент) и индуктивного (вращающийся компонент) сопротивлений. Для расчета используется напряжения и активная мощность, измеряемые в точке общего подключения двигателей, и эмпирические коэффициенты, которые не имеют строгих критериев выбора:

$$R = \frac{U^2}{(1-K)P_1};$$

$$X = \frac{U^2}{1,2(K + K_E)K_1P_1}.$$

Здесь  $P_1$  – общая потребляемая мощность;  $K$  – коэффициент, показывающий долю двигательной нагрузки в общей нагрузке предприятия;  $K_E$  – доля нагрузки, контролируемая электроникой, от общей нагрузки;  $K_1$  представляет тяжесть условия запуска двигателя.

Общие рекомендации для выбора данных коэффициентов:  $K = 0,8$  – для промышленных нагрузок;  $K_1$  обычно принимается в диапазоне от 4 до 7;  $K_E$  может приниматься равным нулю. Таким образом, в данном исследовании они принимались следующими:  $K = 0,8$ ;  $K_1 = 5,5$ ;  $K_E = 0$ .

Также был рассмотрен метод с делением на пусковой коэффициент у И. В. Жежеленко [27]:

$$X = nZ_k = \frac{U_\phi}{k_\pi I_\phi}$$

Так как двигателей было несколько, пусковой коэффициент был взят как среднее арифметическое всех пусковых коэффициентов двигателей.

**Имитационное моделирование.** Таким образом, с целью проверки применимости вышеперечисленных схем замещения проводилось имитационное моделирование в MATLAB Simulink и на основе входных данных в виде измеренных значений: активной мощности – для методики 1; токов и напряжений – для методики 2, они сравнивались с результатами имитационного моделирования. Обычно в каталогах асинхронных двигателей приводятся следующие величины, которые называют паспортными, или номинальными, параметрами:  $P_{\text{ном}}$  – мощность на валу;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $I_{\text{ном}}$  – ток статора;  $U_{\text{ном}}$  – напряжение сети;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $\cos\phi$  – то же мощности;  $I_\pi/I_{\text{ном}}$  – то же пускового тока;  $M_\pi/M_{\text{ном}}$  – то же пускового момента на валу;  $M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$  – то же критического момента на валу;  $M_{\text{ном}}$  – момент на валу;  $J$  – то же инерции. Параметры моделируемых двигателей приведены в табл. 1. Они использовались для расчета параметров схемы замещения двигателей ( $R_1$  – активное сопротивление статора;  $R_2$  – то же ротора;  $L_1$  – индуктивность статора;  $L_2$  – то же ротора;  $L_m$  – то же магнитного зазора) при помощи встроенной функции Parameter Estimator, которые используются при моделировании. Параметры схем замещения приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры моделируемых двигателей  
Parameters of motors in simulation

Двигатель	АИР90L6	АИР90LA8	АИР90LB8	АИР100S2	АИР100L2
$P_{\text{ном}}$ , кВт	1,50	0,75	1,10	4,00	5,50
$\omega$ , об/мин	920	680	680	2880	2900
$I_{\text{ном}}$ , А	4,00	2,43	3,36	8,20	11,10
$U_{\text{ном}}$ , В	220				
$\eta$ , %	76,0	70,0	72,0	84,2	85,7
$\cos\phi$	0,75	0,67	0,69	0,88	0,88
$I_\pi/I_{\text{ном}}$	5,5	4,0	5,0	7,5	7,5
$M_\pi/M_{\text{ном}}$	2,0	1,8	1,8	2,2	2,2
$M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$	2,1	2,0	2,0	2,3	2,3
$M_{\text{ном}}$ , Н·м	15,57	10,53	15,45	13,26	18,11
$J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0067	0,0063	0,009	0,007	0,008

Таблица 2

Параметры схем замещения двигателей для моделирования  
Parameters of equivalent circuits of motors for modeling

Двигатель	АИР90L6	АИР90LA8	АИР90LB8	АИР100S2	АИР100L2
$R_1$ , Ом	7,98	15,29	10,39	3,18	2,04
$R_2$ , Ом	9,44	19,46	13,35	2,234	1,315
$L_1$ , Гн	0,0132	0,0330	0,0226	0,0009	0,0021
$L_2$ , Гн	0,0134	0,0335	0,0226	0,0014	0,015
$L_m$ , Гн	0,2126	0,3035	0,2286	0,1351	0,1181

Собранная схема имитационной модели приведена на рис. 4.

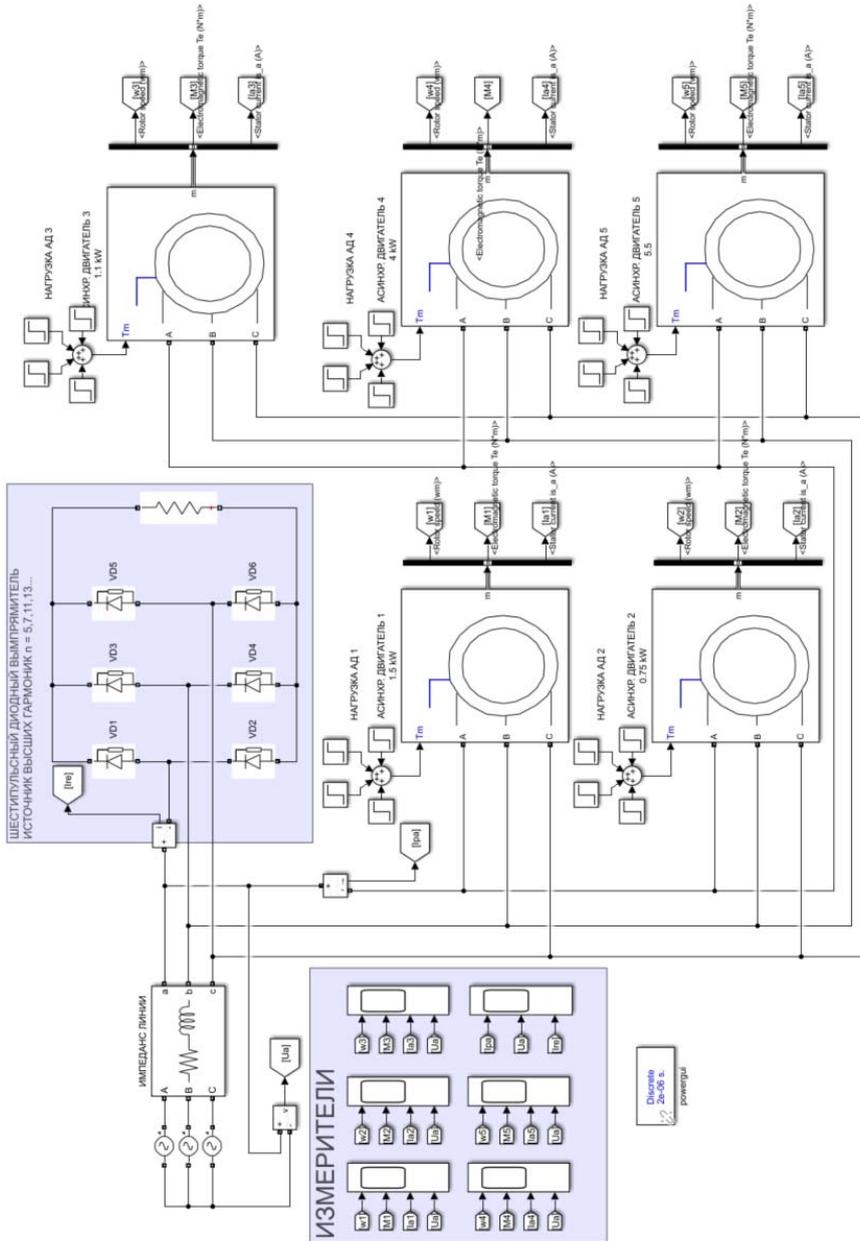


Рис. 4. Имитационная модель MATLAB Simulink для исследования составной двигательной нагрузки  
Fig. 4. MATLAB Simulink simulation model for studying composite motor load

Моделировались пять асинхронных двигателей, подключенных к общей шине питания, соединенной с источником синусоидального напряжения через активно-индуктивное сопротивление. Следующие данные выводились из двигателей в виде осциллограмм: частота вращения, момент на валу и токи, для того чтобы отследить правильность отработки модели. Также фиксировались напряжение, ток и активная мощность, потребляемые двигателями на общей шине, которые далее использовались при расчете импеданса агрегированной двигательной нагрузки.

Для того чтобы внести искажения в сеть, использовался источник высших гармоник в виде шестипульсного диодного выпрямителя. При моделировании двигателя работали в четырех режимах загрузки: 50; 70; 90 и 100 % от номинального момента на валу. Момент изменялся одновременно для всех двигателей, чтобы можно было зафиксировать работу общей двигательной нагрузки при разных моментах и определить эту зависимость. Полученные данные обрабатывались при помощи Fast Fourier Transformation анализа. Таким образом, вычислялись сначала гармонические составляющие тока и напряжения, а затем – гармонические составляющие импеданса составной двигательной нагрузки.

Параметры модели были следующими: параметры линии – 0,33 Ом – для активного сопротивления, 0,0011 Гн – для индуктивности, мощность нагрузки шестипульсного выпрямителя – 5 кВт, фазное напряжение источника – 220 В, частота сети – 50 Гц, моделирование осуществлялось с шагом  $2 \cdot 10^{-6}$  с, что по теореме Котельникова является достаточно точным для получения данных. Необходимо также отметить, что данные об эксперименте проводились только по одной фазе – фазе *A*, что не является ограничением, так как нагрузка была симметричной в ходе имитационного моделирования.

### Результаты и обсуждение

По результатам имитационного моделирования и расчетов по схемам замещения для сравнительной оценки построены зависимости для модулей и аргументов импеданса, представленных в виде амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик на рис. 5 и 6 соответственно. На каждом графике приведены 12 зависимостей соответствующей функции от номера гармоники для разных режимов работы двигателей. Также численные значения приводятся в табл. 3 в соответствующих графах: «Им. м.» – для имитационного моделирования, «1» и «2» – для расчетов по схемам замещения 1 и 2 соответственно. Обсуждение результатов приводится для 5-й и выше гармоник, так как комплексное сопротивление двигателя на высших гармониках не зависит от сопротивления на основной [39].

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования и расчетов  
Results of simulation modeling and calculations

Нагрузка	0,5M <sub>ном</sub>						0,7M <sub>ном</sub>					
	Z, Ом			Ф <sub>агр</sub> , град.			Z, Ом			Ф <sub>агр</sub> , град.		
	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2
1	9,73	3,05	1,65	54,6	87,9	90,0	8,38	2,41	1,42	50,9	87,9	90,0
5	2,12	15,02	8,25	50,8	79,7	90,0	2,42	11,89	7,10	50,4	79,7	90,0
7	2,67	20,72	11,54	55,8	75,7	90,0	3,06	16,39	9,94	54,8	75,7	90,0
11	3,44	31,19	18,14	64,0	68,2	90,0	4,00	24,68	15,63	65,1	68,2	90,0
13	4,04	35,89	21,44	66,2	64,7	90,0	4,65	28,40	18,47	67,3	64,7	90,0
17	4,79	44,16	28,04	72,7	58,3	90,0	5,71	34,94	24,15	72,5	58,3	90,0
19	5,33	47,74	31,33	72,9	55,4	90,0	6,32	37,77	26,99	73,4	55,4	90,0
23	6,46	53,88	37,93	79,4	50,1	90,0	7,50	42,63	32,67	77,8	50,1	90,0
25	6,99	56,49	41,23	81,2	47,7	90,0	8,01	44,70	35,52	78,6	47,7	90,0

Окончание табл. 3  
 End of table 3

Нагрузка	0,9M <sub>ном</sub>						M <sub>ном</sub>					
	Z, Ом			Ф <sub>агр</sub> , град.			Z, Ом			Ф <sub>агр</sub> , град.		
	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2
1	7,33	1,85	1,24	43,8	87,9	90,0	6,40	1,51	1,08	39,7	87,9	90,0
5	2,77	9,09	6,21	50,1	79,7	90,0	3,13	7,44	5,42	50,4	79,7	90,0
7	3,51	12,53	8,70	54,2	75,7	90,0	3,98	10,26	7,59	54,4	75,7	90,0
11	4,56	18,86	13,67	65,4	68,2	90,0	5,26	15,45	11,93	65,6	68,2	90,0
13	5,21	21,71	16,16	67,4	64,7	90,0	6,06	17,78	14,10	68,0	64,7	90,0
17	6,57	26,71	21,13	73,4	58,3	90,0	7,49	21,87	18,44	72,3	58,3	90,0
19	7,32	28,87	23,61	75,0	55,4	90,0	8,39	23,64	20,61	73,6	55,4	90,0
23	8,76	32,59	28,58	76,6	50,1	90,0	9,62	26,68	24,95	77,0	50,1	90,0
25	9,40	34,17	31,07	77,3	47,7	90,0	10,37	27,98	27,12	77,4	47,7	90,0

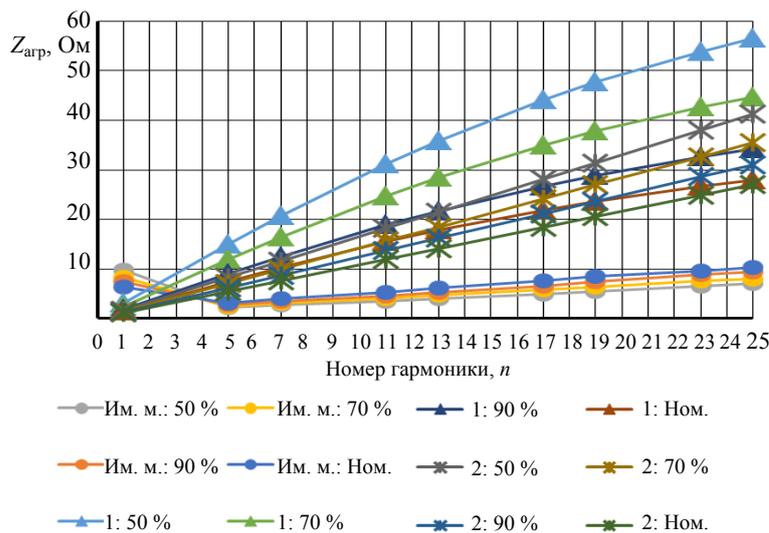


Рис. 5. Импеданс составной двигательной нагрузки в зависимости от номера гармоники

Fig. 5. Impedance of a composite motor load depending on the harmonic number

Для имитационного моделирования по амплитудно-частотной характеристике видно, что с ростом нагрузки увеличивается модуль комплексного сопротивления двигательной нагрузки на высших гармониках, притом можно заметить, что меняется пропорционально моменту на валу. Качественная характеристика графика в зоне высших гармоник при этом не меняется. Далее с ростом номера гармоник и частоты сопротивление увеличивается прямо пропорционально номеру гармоники. Если необходимо проанализировать сеть до 50-й гармоники, полученные зависимости можно экстраполировать и получить точки выше 25-й гармоники. Схемы замещения 1 и 2 имеют совсем иной характер, так как они изменяются в соответ-

ствии с сопротивлением на 1-й гармонике, которое уменьшается при увеличении момента на валу.

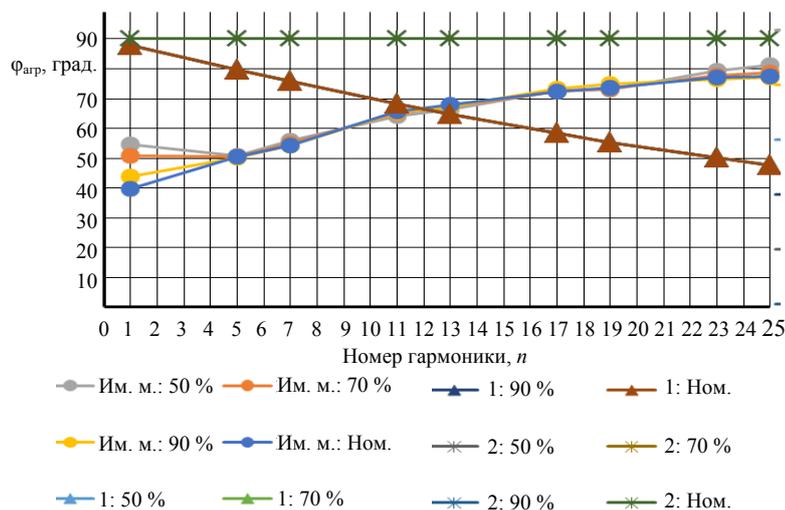


Рис. 6. Фазовая характеристика составной двигательной нагрузки в зависимости от номера гармоники

Fig. 6. Phase characteristic of a composite motor load depending on the harmonic number

По фазовой характеристике для имитационного моделирования видно, что с ростом номера гармоники растет аргумент комплексного сопротивления. Сам график имеет асимптотический характер и стремится к  $90^\circ$  при стремлении частоты к бесконечности. Видно, что численные значения аргумента комплексного сопротивления не меняется в зависимости от нагрузки. Это говорит о том, что соотношение активной мощности к реактивной мощности на гармониках не зависит от нагрузки на валах двигателей, что может позволить не учитывать режим работы асинхронных двигателей при анализе электрической сети на высших гармониках.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы существующие методы замещения агрегированной двигательной нагрузки, по которым были рассчитаны комплексные сопротивления и сравнены с результатами имитационного моделирования.

2. Выявлена несходимость результатов имитационного моделирования с результатами исследований по существующим методикам как по количественным, так и по качественным характеристикам, о чем можно судить по амплитудно-частотным характеристикам. Ошибка связана с теоретическим предположением о том, что комплексное сопротивление на фундаментальной гармонике должно изменяться пропорционально номеру, для того чтобы получить комплексное сопротивление двигателя на высших гармониках.

3. Несходимость результатов эксперимента с результатами моделирования указывает на то, что необходимо продолжать исследования в области составных нагрузок. Характер графика, полученный по результатам имитационного моделирования, соответствует графику, полученному по результатам эксперимента для одного асинхронного двигателя, проводившегося в работе [39]. Однако агрегированная двигательная нагрузки ведет себя иначе и проявляет эмерджентное свойство изменяться в зависимости от момента на валу двигателей, чего не было выявлено в эксперименте с одиночным асинхронным двигателем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Ч. 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / А. В. Седнин, М. И. Позднякова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.
2. Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021 Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>.
3. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
4. Koptev, V. Y. Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System / V. Y. Koptev, A. V Kopteva, V. V Starshaya // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2020. P. 674–679. <https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.9039314>.
5. Renewable and Sustainable Clean Energy Development and Impact on Social, Economic, and Environmental Health / K. Kumar, [et al.] // Energy Nexus. 2022. Vol. 7. P. 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>.
6. Nguyen, M. P. Energy Transition in Vietnam: A Strategic Analysis and Forecas / M. P. Nguyen, T. Ponomarenko, N. Nguyen // Sustainability. 2024. Vol. 16, No 5. P. 1969. <https://doi.org/10.3390/su16051969>.
7. Бялобржеский, А. В. Искажающая электрическая мощность переменного тока в простейшей цепи с диодом / А. В. Бялобржеский, Д. Й. Родькин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 433–443. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444>.
8. Nguyen, H. H. Optimization of the control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin during Dendritic Precipitation / H. H. Nguyen, V. Y. Bazhin // Metallurgist. 2023. Vol. 67, № 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3>.
9. Бажин, В. Ю. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния / В. Ю. Бажин, О. Н. Масько, С. А. Мартынов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 53–60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.07>.
10. Федорова, А. Р. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов / А. Р. Федорова, Е. А. Пупышева, В. В. Моргунов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 77–84. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.10>.
11. Nos, O. V. The Sliding-Mode Observer for PMSM Sensorless Control with Adaptive Complex-Coefficient Filter and PLL / O. V. Nos, T. V Pudkova, S. A. Kharitonov // 2023 XX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), 2023. P. 44–49. <https://doi.org/10.1109/tsczh58792.2023.10233364>.
12. Счастный, В. П. Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведе-

- ний и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 1. С. 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>.
13. Васильев, Б. Ю. Анализ влияния полупроводниковых преобразователей на батарею и двигатель асинхронного привода шахтных горнотранспортных машин / Б. Ю. Васильев, Т. Х. Нгуен // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9–1. С. 299–318.
  14. Coordinate control Strategy for Stability Operation of Offshore wind Farm Integrated with Diode-Rectifier HVDC / L. Xie [et al.] // Global Energy Interconnection. 2020. Vol. 3, No 3. P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.002>.
  15. A New Nonlinear Control of an Active Rectifier for Variable Speed Generating Units / C. M. Verrelli [et al.] // Control Engineering Practice. 2023. Vol. 139. P. 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>.
  16. Taha, M. 12 Pulse High power Active Rectifier for Electric Vehicle Charging / M. Taha, A. Almaktoof, M. T. E. Khan // Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 70. P. 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.033>.
  17. Belsky, A. A. Standalone Power System with Photovoltaic and Thermoelectric Installations for Power Supply of Remote Monitoring And Control Stations for Oil Pipelines / A. A. Belsky, D. Y. Glukhanich // Renewable Energy Focus. 2023. Vol. 47. P. 100493. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100493>.
  18. Fortes, R. R. A. Harmonic Distortion Assessment in Power Distribution Networks Considering DC component Injection From PV inverters / R. R. A. Fortes, R. F. Buzo, L. C. O. de Oliveira // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 188. P. 106521. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106521>.
  19. Artificial Neural Networks Based Harmonics Estimation for Real University Microgrids using Hourly Solar Irradiation and Temperature Data / N. Yasar [et al.] // Energy Nexus. 2023. Vol. 9. P. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100172>.
  20. Hybrid System of Hydrogen Generation by Water Electrolysis and Methane Partial Oxidation / G. Buslaev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, No 63. P. 24166–24179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.098>.
  21. Сычев, Ю. А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально – сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 132–140. <https://doi.org/10.31897/pmi.2021.1.14>.
  22. Скамьин, А. Н. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении / А. Н. Скамьин, В. С. Добуш, М. Х. Жопри // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 443–454. <https://doi.org/10.31897/pmi.2023.25>.
  23. Reduction and Control of Harmonic on Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors with Voltage Source Inverter (VSI) using ANN-Grasshopper Optimization Shunt Active Filters (ANN-GOSAF) / T. O. Araoye [et al.] // Scientific African. 2023. Vol. 21. P. e01785. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01785>.
  24. Сычев, Ю. А. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Ю. А. Сычев, М. Е. Аладьин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. С. 159–181.
  25. Network Modelling for Harmonic Studies. CIGRE, 2019. 241 p.
  26. Arrillaga, J. Power System Harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. 2<sup>nd</sup>. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 389 p. <https://doi.org/10.1002/0470871229>.
  27. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. Изд. 4-е. М.: Энергоатомиздат, 2006. 331 с.
  28. Extraction of Frequency-Dependent Impedances of Residential Loads in Low-Voltage Grids for Harmonic Stability Assessment / S. Simon // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 212. P. 108528 <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108528>.
  29. Смирнов, С. С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. / С. С. Смирнов. Новосибирск: Наука, 2010. 327 с.
  30. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605 / K. Yamashita [et al.] // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, No 21. P. 405–410. <https://doi.org/10.3182/20120902-4-fr-2032.00072>.
  31. Harmonic Modeling, Data Generation, and Analysis of Power Electronics-Interfaced Residential Loads / A. Singhal [et al.] // 2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart

- Grid Technologies Conference (ISGT), 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/isgt50606.2022.9817492>.
32. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными / В. П. Кузьменко [и др.] // Научный вестник НГТУ. 2019. № 1. С. 197–212. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-1-197-212>.
  33. Liu, W. Aggregation Method of Distributed Load Resources Based on Non-intrusive Load Identification / W. Liu, C. Wang, Y. Li // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2138. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2138/1/012004>.
  34. Using Aggregated Electrical Loads for the Multinodal Load Forecasting / J. R. Moreira-Júnior [et al.] // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2022. Vol. 33. P. 1592–1600. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00906-1>.
  35. Chapter 5 – Modeling and simulation of active electrical distribution systems using the OpenDSS / L. C. Ribeiro [et al.] // Decision Making Applications in Modern Power Systems / eds.: S. H. E. Abdel Aleem [et al.]. Academic Press, 2020. P. 121–152. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816445-7.00005-0>.
  36. Research on the Harmonics Penetration Characteristics of the Traction Network to Three-Phase 380 V Power System of the Traction Substation and Suppression Scheme / Y. Zhao [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 195359–195369. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033889>.
  37. Викторов, В. А. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости / В. А. Викторов, В. А. Мешалкин, В. М. Салтыков // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381–402.
  38. Косарев, Б. А. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией / Б. А. Косарев, В. К. Федоров // Омский научный вестник. 2019. № 5. С. 64–71. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-64-71>.
  39. Impedance Analysis of Squirrel-Cage Induction Motor at High Harmonics Condition / A. Skamyin [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 33, No 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.
- Поступила 16.08.2023 Подписана в печать 20.10.2023 Опубликовано онлайн 31.07.2024

## REFERENCES

1. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1. Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).
2. Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics When Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V., Starshaya V. V. (2020) Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System, *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 674–679, <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039314>.

5. Jaiswal K. K., Chowdhury C. R., Yadav D., Verma R., Dutta S., Jaiswal K. S., Sangmesh B., Karuppasamy K. S. K. (2022) Renewable and Sustainable Clean Energy Development and Impact on Social, Economic, and Environmental Health. *Energy Nexus*, 7, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>.
6. Nguyen M. P., Ponomarenko T., Nguyen T. Energy Transition in Vietnam: A Strategic Analysis and Forecast. *Sustainability* 2024, 16(5), 1969; <https://doi.org/10.3390/su16051969>.
7. Bialobrzeski O. V., Rod'kin D. Y. (2019) Distorting Electrical Power of the Alternating Current in the Simplest Circuit with a Diode. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444> (in Russian).
8. Nguyen H. H., Bazhin V. Y. (2023) Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation. *Metallurgist*, 67 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3>.
9. Bazhin V. Yu., Masko O. N., Martynov S. A. (2023) Automatic Burden Balance Monitoring and Control in the Production of Metallurgical Silicon. *Tsvetnye Metally*, (4), 53–60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.07> (in Russian).
10. Fedorova E. R., Pupysheva E. A., Morgunov V. V. (2023) Settling Parameters Determined during Thickening and Washing of Red Mud. *Tsvetnye Metally*, (4), 77–84. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.10> (in Russian).
11. Nos O. V., Pudkova T. V., Kharitonov S. A. (2023) The Sliding-Mode Observer for PMSM Sensorless Control with Adaptive Complex-Coefficient Filter and PLL. *2023 XX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*, 44–49. <https://doi.org/10.1109/tsczh58792.2023.10233364>.
12. Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2022) Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51> (in Russian).
13. Vasilev B. U., Nguyen T. H. (2023) Influence of Semiconductor Converters on Asynchronous Drive Battery and Motor in Mining Machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (9-1), 299–318 (in Russian).
14. Xie L., Yao L., Cheng F., Li Y., Liang S. (2020) Coordinate Control Strategy for Stability Operation of Offshore wind Farm Integrated with Diode-Rectifier HVDC. *Global Energy Interconnection*, 3 (3), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.002>.
15. Verrelli C. M., Bigarelli L., di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L. (2023) A New Nonlinear Control of an Active Rectifier for Variable Speed Generating Units. *Control Engineering Practice*, 139, 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>.
16. Taha M., Almaktoof A., Khan M. T. E. (2023) 12 Pulse High power Active Rectifier for Electric Vehicle Charging. *Transportation Research Procedia*, 70, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.033>.
17. Belsky A. A., Glukhanich D. Y. (2023) Standalone Power System with Photovoltaic and Thermoelectric Installations for Power Supply of Remote Monitoring and Control Stations for Oil Pipelines. *Renewable Energy Focus*, 47, 100493. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100493>.
18. Fortes R. R. A., Buzo R. F., de Oliveira L. C. O. (2020) Harmonic Distortion Assessment in Power Distribution Networks Considering DC Component Injection From PV Inverters. *Electric Power Systems Research*, 188, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106521>.
19. Yarar N., Yagci M., Bahceci S., Onen A., Ustun T. S. (2023) Artificial Neural Networks Based Harmonics Estimation for Real University Microgrids Using Hourly Solar Irradiation and Temperature Data. *Energy Nexus*, 9, Art. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100172>.
20. Buslaev G., Lavrik A., Lavrik A., Tsvetkov P. Hybrid System of Hydrogen Generation by Water Electrolysis and Methane Partial Oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (63), 24166–24179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.098>.
21. Sychev Y. A., Zimin R. Y. (2021) Improving the Quality of Electricity in the Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex with Hybrid Filter-Compensating Devices. *Journal of Mining Institute*, 247, 132–140. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.14> (in Russian).
22. Skamyin A. N., Dobush V. S., Jopri M. H. (2023) Determination of the Grid Impedance in Power Consumption Modes with Harmonics. *Journal of Mining Institute*, 261, 443–454. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.25> (in Russian).

23. Araoye T. O., Ashigwuike E. C., Adeyemi A. C., Egoigwe S. V., Ajah N. G., Eronu E. (2023) Reduction and Control of Harmonic on Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors with Voltage Source Inverter (VSI) Using ANN-Grasshopper Optimization Shunt Active Filters (ANN-GOSAF). *Scientific African*, 21, e01785. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01785>.
24. Sychev Y. A., Aladin M. E. (2023) Overall Performance Analysis of General-Purpose Power Quality Controls on the Basis of Active Converters in Nonlinearly Loaded Industrial Power Lines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (11), 159–181 (in Russian).
25. CIGRE (2019) *Network Modelling for Harmonic Studies*. 241.
26. Arrillaga J., Watson N. R. (2003) *Power System Harmonics*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Ltd. 399. <https://doi.org/10.1002/0470871229>.
27. Zhezhelenko I. V. (2006) *Higher Harmonics in Power Supply Systems of an Industrial Enterprise*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Energatomizdat Publ. 331 (in Russian).
28. Simon S., Winkens A., Monti A., Andreas A. (2022) Extraction of Frequency-Dependent Impedances of Residential Loads in Low-Voltage Grids for Harmonic Stability Assessment. *Electric Power Systems Research*, 212, 108528. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108528>.
29. Smirnov S. S. (2010) *Higher Harmonics in High Voltage Networks*. Novosibirsk, Nauka Publ. 327 (in Russian).
30. Yamashita K., Djokic S., Matevosyan J., Resende F. O., Korunovic L. M., Dong Z. Y., Milanovic J. V. (2012) Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605. *IFAC Proceedings Volumes*, 45 (21), 405–410. <https://doi.org/10.3182/20120902-4-fr-2032.00072>.
31. Singhal A., Wang D., Reiman A. P., Liu Y., Hammerstrom D. J., Kundu S. Harmonic Modeling, Data Generation, and Analysis of Power Electronics-Interfaced Residential Loads. *2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, New Orleans, LA, USA, 2022, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT50606.2022.9817492>.
32. Kuzmenko V. P., Solonyj S. V., Shishlakov V. F., Solyonaya O. Ya. (2019) Measurement of Power Quality in the Power Supply System with LED Lightning Devices. *Nauchnyi Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, (1), 197–212. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-1-197-212>.
33. Liu W., Wang C., Li Y. (2021) Aggregation Method of Distributed Load Resources Based on Non-Intrusive Load Identification. *Journal of Physics: Conference Series*, 2138, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2138/1/012004>.
34. Moreira-Júnior J. R., Abreu T., Minussi C. R., Lopes M. L. M. (2022) Using Aggregated Electrical Loads for the Multinodal Load Forecasting. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, 33, 1592–1600. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00906-1>.
35. Ribeiro L. C., Vieira F. L., Bonatto B. D., de Souza A. C. Z., Ribeiro P. F. (2020) Chapter 5 – Modeling and Simulation of Active Electrical Distribution Systems Using the OpenDSS. Abdel Aleem H. E., Abdelaziz A. Y., Zobaa A. F., Bansal R. (eds.). *Decision Making Applications in Modern Power Systems*. Academic Press, 121–152. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816445-7.00005-0>.
36. Zhao Y., Ren L., Lin G., Peng F. (2020) Research on the Harmonics Penetration Characteristics of the Traction Network to Three-Phase 380 V Power System of the Traction Substation and Suppression Scheme. *IEEE Access*, 8, 195359–195369. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033889>.
37. Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M. The research of the Levels and Spectra of Higher Harmonics of Current in Electrical Power Networks of Computer Equipment and the Basic Activities of the Electromagnetic Compatibility Provision. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, (4), 381–402. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10415> (in Russian).
38. Kosarev B. A., Fedorov V. K. (2019) Model of an Electrical System with Distributed Generation. *Omsk Scientific Bulletin*, (5), 64–71. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-64-71> (in Russian).
39. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M. H. (2024) Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33 (1), 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.