

УДК 621.3.07

ББК 31.247

А.Л. СЛАВУТСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В УЗЛЕ КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ: ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Ключевые слова: электротехнические комплексы, аварийные режимы, классификация неисправностей, высокочастотные составляющие тока и напряжения.

Цель исследования – на примере моделирования аварийных режимов в ЛЭП и узле комплексной нагрузки показать особенности возникновения высокочастотных составляющих в сигналах тока и напряжения в различных элементах электротехнического комплекса и проанализировать их взаимное влияние.

Материалы и методы. Сигналы токов и напряжений при переходных процессах в ЛЭП и узле нагрузки с трёхобмоточным трансформатором моделировались при использовании авторского программного обеспечения. Расчеты основаны на методе синтетических схем (алгоритме Доммеля). Основное внимание уделено возникновению высокочастотных составляющих тока и напряжения при коротких замыканиях и коммутациях.

Результаты. Моделирование трехфазного короткого замыкания в ЛЭП 110кВ при ее разбиении на П-секции демонстрирует, насколько значительно различается уровень высокочастотных составляющих на каждой из трех фаз. Это проявляется в первую очередь в сигналах напряжения. В комплексном узле нагрузки с трансформатором 110/35/10 кВ короткие замыкания и коммутации на стороне 35 кВ существенно влияют на токи и напряжения на стороне 10 кВ. Показано, что более высокий уровень высокочастотных составляющих сигналов тока соответствует режимам рекуперации энергии при нарушении баланса и выбеге мощного асинхронного двигателя на стороне 10кВ. Обсуждается возможность использования полученных результатов для классификации неисправностей в электротехнических системах.

Выводы. Уровень и спектральный состав высокочастотных составляющих сигналов токов и напряжений при переходных режимах зависит от начальной фазы и представляет интерес для анализа и классификации неисправностей. Характер этих колебаний определяется собственными частотами возникающих электрических контуров при коммутациях и коротких замыканиях.

При коммутациях и аварийных режимах в электротехнических комплексах проявляется взаимное влияние элементов системы, связанных электрических цепей [1, 21]. При этом переходные процессы и их параметры зависят как от структуры цепей, так и от момента начала переходных процессов (фазы тока и напряжения) [3, 4, 18, 19]. Одним из таких проявлений является возникновение высокочастотных составляющих. Соответствующие записи содержат значительные объемы информации, которая может быть использована для оценки характеристик технических систем [2, 17], классификации неисправностей [10, 16], определения места повреждения [5, 11].

Цель работы – показать особенности возникновения высокочастотных составляющих в сигналах тока и напряжения при взаимном влиянии различных элементов электротехнического комплекса в переходных режимах.

На примере моделирования переходных процессов в линии электропередач (ЛЭП) и в узле комплексной нагрузки в настоящей работе исследовались некоторые особенности структуры высокочастотных составляющих тока [9].

Материалы и методы. Моделирование реализовано при использовании авторского программного обеспечения, основанного на методе синтетических схем (алгоритме Доммеля) [1, 12].

На рис. 1 показаны примеры схем, в которых моделировались аварийные и переходные режимы. ЛЭП (рис. 1, а) 110 кВ длиной 114,2 км имеет двухстороннее питание от подстанций ПС1, ПС2. На расстоянии 79,6 км от ПС1 расположена ответвительная подстанция в виде эквивалентной нагрузки НГ на схеме. ЛЭП эквивалентировалась П-секциями на участках по 10 км.

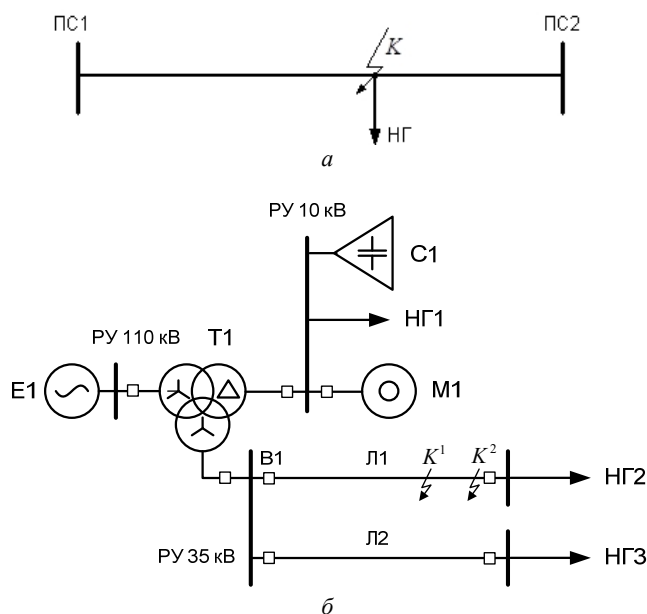
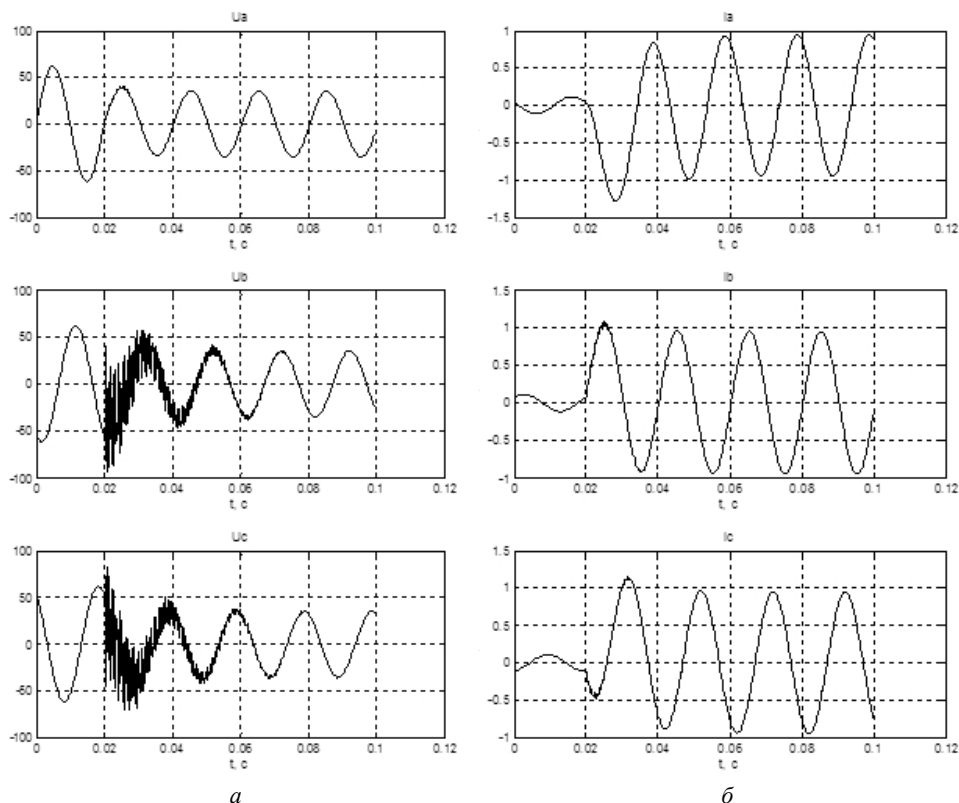


Рис. 1. Схема ЛЭП (а) и исследуемого узла комплексной нагрузки (б)

На рис. 1, б приведена схема комплексного узла нагрузки с трансформатором 110/35/10 кВ, на примере которого анализировались переходные процессы. На стороне 35 кВ включены ЛЭП, в одной из которых происходят КЗ. На стороне 10 кВ включаются мощный асинхронный двигатель, статическая нагрузка и батарея конденсаторов для компенсации реактивной мощности. Параметры узла нагрузки подробно описаны в [1].

Результаты исследования. На рис. 2 приведен пример высокочастотных затухающих колебаний напряжения и тока, соответствующих трехфазному короткому замыканию (КЗ) в линии электропередач (ЛЭП) 110 кВ [20]. Уровень высокочастотных колебаний зависит от начальной фазы сигнала в момент КЗ в точке К, и общей особенностью является тот факт, что колебания напряжения

могут быть сопоставимы с амплитудой основной гармоники промышленной частоты, а колебания тока сглаживаются за счет индуктивного сопротивления электрических цепей.



а б
Рис. 2. Линейное напряжение (а) и токи (б) в фазах на шинах питающей системы ПС1 при трехфазном коротком замыкании в точке К

Высокочастотные колебания в данном случае вызваны возбуждением RLC-контуров, возникающих при соединении П-схем участков ЛЭП [1]. Характерными особенностями является два факта:

1. Напряжение на фазах *b* и *c* испытывает значительные высокочастотные колебания, а колебания в сигналах тока оказываются сглаженными и не проявляются в такой степени, как в сигналах напряжения.

2. Замыкание в данном случае трёхфазное, полученные сигналы очень наглядно показывают, насколько высокочастотные составляющие определяются начальной фазой. Поскольку для фазы *a* напряжение в момент КЗ близко к нулю, высокочастотные биения не проявляются ни в сигналах напряжения, ни в сигналах тока.

Спектр высокочастотных колебаний может быть очень широким и достигать десятков кГц [1, 20]. В данном случае все особенности высокочастотных составляющих токов и напряжений определяются индуктивностью и ёмкостью

линии электропередач, включая взаимные индуктивную и емкостную связь между фазами. Накопленная энергия в реактивных элементах объясняет и возникновение аperiodической составляющей в сигналах тока.

Схема узла комплексной нагрузки рис. 1, б использована для анализа взаимовлияния ветвей разного напряжения при коммутациях и аварийных режимах. Соответствующий пример приведён на рис. 3, где показано возникновение высокочастотных колебаний тока на стороне 10 кВ при коротком замыкании на линии 35 кВ.

Как видно из рис. 3, затухающие высокочастотные колебания передаются в момент однофазного короткого замыкания $t = 2\text{ с}$. Их уровень в сигналах тока относительно его амплитуды на основной частоте оказывается невысоким и примерно соответствует уровню высокочастотных колебаний при КЗ на линии 110 кВ (см. рис. 2).

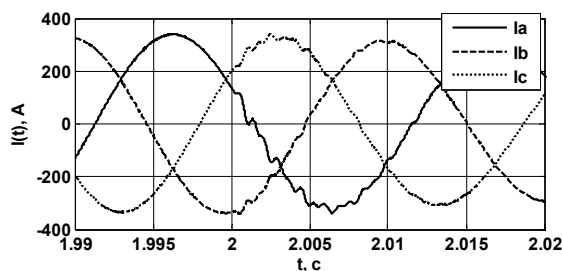


Рис. 3. Токи на стороне 10 кВ в момент КЗ на землю фазы А на линии Л1

На рис. 4 показан характерный пример токов в ЛЭП 35 кВ в случае перехода однофазного замыкания в двухфазное КЗ на землю с последующим отключением выключателя В1. Как видно из рисунка, в момент $t = 2,2\text{ с}$ при возникновении КЗ амплитуда тока в замкнутых фазах значительно увеличивается, однако высокочастотные составляющие существенно не проявляются, как и на рис. 2.

Однако замыкания и последующее отключение линии 35 кВ очень существенно проявляются в токах на стороне 10 кВ. Соответствующие результаты моделирования приведены на рис. 5.

Если однофазное замыкание на линии Л1 слабо сказывается в токах на стороне 10 кВ, то двухфазное замыкание и отключение линии приводят к значительным изменениям в форме токов на стороне 10 кВ. Это определяется взаимовлиянием элементов схемы в цепи 10 кВ и прежде всего изменением в режиме работы мощного асинхронного двигателя [6, 22, 23]. При возникновении междуфазного КЗ наблюдаются «качания» амплитуды тока. Это вызвано потоком мощности в фазах на стороне 35 кВ в сторону повреждения. Элементы на стороне 10 кВ начинают отдавать энергию через трансформатор в направлении повреждения. Двигатель М1 частично работает в генераторном режиме, что приводит к изменению фазы тока на шинах 10 кВ и колебаниям его амплитуды. Наведенный от вращающегося магнитного поля ток, индуцируемый ротором двигателя, образует суммарный ток изменяющейся амплитуды [13, 14]. После отключения линии на стороне 35 кВ в момент $t = 2,3\text{ с}$ в токах цепи двигателя

наблюдаются высокочастотные колебания, амплитуда которых превышает амплитуду тока на основной гармонике промышленной частоты. Это связано с перераспределением энергии между емкостью устройства компенсации реактивной мощности и индуктивностями на стороне 10 кВ.

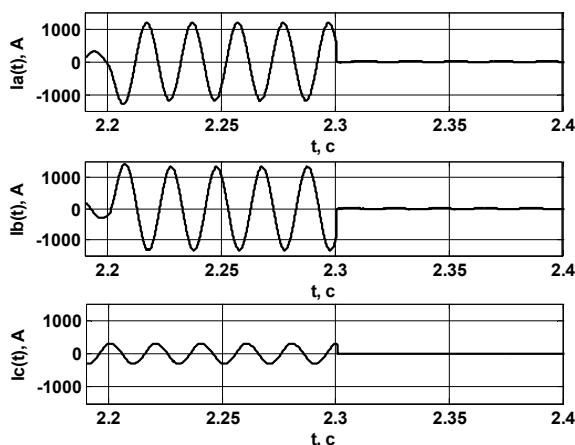


Рис. 4. Ток на шинах 35 кВ
во время замыканий и отключения линии Л1

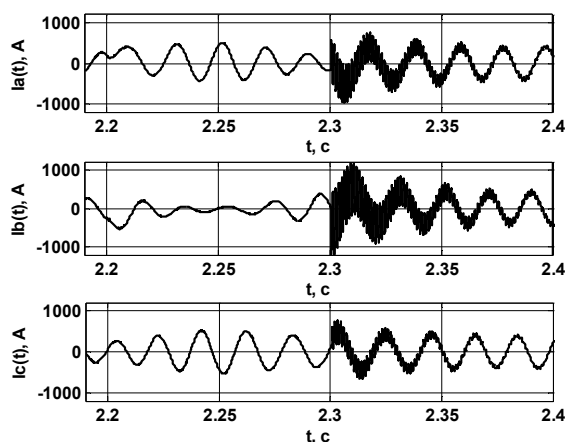


Рис. 5. Ток на шинах 10 кВ
во время замыканий и отключения линии Л1

Момент начала переходных процессов для узлов нагрузки с электродвигателями имеет принципиальное значение. Включение (самозапуск) двигателя до окончания процесса выбега может приводить к очень значительным перегрузкам, в том числе – механическим, и этому вопросу уделяется значительное внимание [7, 8, 19].

Выводы. Уровень и спектральный состав высокочастотных составляющих сигналов токов и напряжений при переходных режимах в электротехнических

комплексах зависят от начальной фазы и представляют интерес для анализа и классификации неисправностей. Характер этих колебаний определяется собственными частотами возникающих электрических контуров при коммутациях и коротких замыканиях. Он определяется также начальными условиями (фазой), соответствующими моменту начала переходного процесса.

Длительность (крутизна) переднего фронта сигналов при переходных процессах оказывается непосредственно связана со спектром высокочастотных составляющих. Кроме того, она определяется переходным сопротивлением дуги при коротких замыканиях и временем срабатывания коммутирующих устройств, которые также влияют на начальную фазу. То есть протекание переходного процесса определяется целым набором факторов, имеющих в значительной степени случайный характер.

С одной стороны, при стандартных требованиях и оцифровке сигнала промышленной частоты в электроэнергетике до 4800 Гц анализ высокочастотных колебаний затруднителен и требует быстродействующих аналого-цифровых преобразователей с обновляемым буфером [20]. С другой стороны, записи таких сигналов могут контролироваться при помощи методов интеллектуального анализа данных и аппарата искусственных нейронных сетей [11, 15, 20].

Литература

1. Андреев О.Н., Ксенофонтов С.И., Славутский А.Л. Моделирование и нейросетевая обработка сигналов при переходных процессах в электротехнических комплексах. Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2023. 212 с.
2. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Ханнанова В.Н. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя при изменении начальных значений оценок в широком диапазоне // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 87–96.
3. Булычев А.В., Грибков М.А. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1(50). С. 30–38.
4. Гусев Ю.П., Каюмов А.Г., Говорин В.В. Учет несинфазности генераторов при расчетах токов в начальный момент короткого замыкания // Вестник Московского энергетического института. 2019. № 4. С. 11–17. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
5. Лачугин В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1(50). С. 58–61.
6. Маджидов А.Ш. Исследование самозапуска асинхронных двигателей 0,4 кВ собственных нужд электростанций // iPolytech Journal. 2020. Т. 24, № 5. С. 1053–1068. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1053-1068>.
7. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р., Крылов А.А. Метод аналитического расчета выбега асинхронных двигателей под действием технологической нагрузки // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20, № 4. С. 123–132. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-123-132.
8. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 6. С. 92–100. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100>.
9. Славутский А.Л. Моделирование переходных режимов узла нагрузки с асинхронным двигателем в фазных координатах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11, № 1. С. 38–45.
10. Bhattacharya B., Sinha A. Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids. In: IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Boston, MA, USA, 2017, pp. 985–990. DOI: 10.1109/ICTAI.2017.00151.

11. *Bulychev A.V., Gribkov M.A., Dmitrenko A.M., Okhotkin G.P.* Remote Protection Based on Digital Methods of Estimating Distance to Points of Fault. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 8, pp. 433–437. DOI: 10.3103/S106837122108006X.
12. *Dommel H.W.* Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399. DOI: 10.1109/TPAS.1969.292459.
13. *Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D.* Analysis of the machinery and drive systems. N.Y., IEEE PRESS, 2002, 630 p. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5265638>.
14. *Krause P.C., Krause T.C.* Introduction to Modern Analysis of Electric Machines and Drives. Wiley-IEEE Press, 2023, 632 p. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/book/9989443>.
15. *Kulikov A., Loskutov A., Bezduzhnyy D.* Relay Protection and Automation Algorithms of Electrical Networks Based on Simulation and Machine Learning Methods. *Energies*, 2022, vol. 15, 6525. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186525>.
16. *Lamets, Y., Podchivaline A., Chevelev A., Nudelman G., Zakonjšek J.* Equivalent transforms of models, conditions and measurements in relay protection. In: IEEE Conference Publication: Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, 2004, pp. 76–79. DOI: 10.1049/cp:20040067.
17. *Lin H., Ebrahimi S., Mahdavyfakhr M., Jatskevich J.* Analysis of sliding-mode-controlled boost converters with mixed loads. In: 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Aalborg, Denmark, 2020, pp. 1–8. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265740.
18. *Majidov A., Kayumov A.G., Hafizov S.* Investigation of the Self-Starting Process of a Low-Power Asynchronous Motor. In: Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021, Moscow, 2021, pp. 1462–1468. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396181.
19. *Ni H., Fang S., Lin H.A.* Simplified Phase-Controlled Switching Strategy for Inrush Current Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 36, no. 1, pp. 215–222. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2984234.
20. *Slavutskii L.A., Ivanova N.N.* Using the simplest neural network as a tool for fault location in power lines. In: AIP Conference Proceedings, Moscow, 01/04/2020 – 02/04/2020. Moscow, 2022, 030006. DOI: 10.1063/5.0074926.
21. *Slavutskiy A.L., Vasileva L.N., Grigoriev V.G. et al.* Transients in the load node at power loss: Group run-out of induction motors. In: E3S Web of Conferences: 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 2019, Sept. 18–20. Vol. 124. Kazan, EDP Sciences, 2019, 05010. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405010.
22. *Vasylyv K.M.* A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.3.03>.
23. *Zheng F., Sun F., Zhou L., Liu W. et al.* Study on Large Asynchronous Motor Starting Check for Auxiliary Power System. In: 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China, 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448843.

СЛАВУТСКИЙ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела разработки программных продуктов, Обособленное подразделение ООО «Юнител Инжиниринг», Россия, Чебоксары (slavutskii@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-2445>).

Aleksandr L. SLAVUTSKIY

**EMERGENCY MODES MODELING IN A COMPLEX LOAD NODE:
HIGH-FREQUENCY COMPONENTS OF SIGNALS**

Key words: electrical complexes, emergency modes, fault classification, high-frequency components of current and voltage.

The purpose of the study is to show the features of the occurrence of high-frequency components in current and voltage signals in various elements of the electrical complex by the example of modeling emergency modes in power lines and a complex load node and to analyze their mutual influence.

Materials and methods. The signals of currents and voltages during transients in a power line and the load node with a three-winding transformer were modeled using the author's software. The calculations are based on the method of synthetic circuits (Dommel's algorithm). The main attention is paid to the occurrence of high-frequency components of current and voltage during short circuits and switching.

Results. Modeling of the three-phase short circuit in a 110 kV transmission line when it is divided into P-sections demonstrates how significantly the level of high-frequency components differs in each of the three phases. This is manifested primarily in voltage signals. In a complex load node with a 110/35/10 kV transformer, short circuits and switching on the 35 kV side significantly affect the currents and voltages on the 10 kV side. It is shown that a higher level of high-frequency components of current signals corresponds to energy recovery modes in case of imbalance and run-out of the powerful asynchronous motor on the 10 kV side. The possibility of using the obtained results for the classification of faults in electrical systems is discussed.

Conclusions. The level and spectral composition of the currents and voltages high-frequency components in transient modes depends on the initial phase and is of interest for the faults analysis and classification. The nature of these oscillations is determined by the resonant frequencies of the electrical circuits that occur during switching and short circuits.

References

1. Andreev O.N., Ksenofontov S. I., Slavutskiy A.L. *Modelirovaniye i neyrosetevaya obrabotka signalov pri perekhodnykh protsessakh v elektrotekhnicheskikh kompleksakh*. [Modeling and neural network signal processing at transient processes in electrical complexes]. *Cheboksary*, 2023, 212 p.
2. Afanasyev A. u., Makarov V.G., Khannanova V. N. *Identifikatsiya parametrov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri izmenenii nachal'nykh znacheniy otsenok v shirokom diapazone*. [Identification of parameters of three-phase asynchronous motor when changing the initial values of the estimates in a wide range]. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2015, no. 11-12, pp. 87–96.
3. Bulichev A.V., Gribkov M.A. *Analiz protsessov samozapuska elektrodvigatelye v sovremennykh elektricheskikh raspredelitel'nykh setyakh s pozitsiy releynoy zashchity* [Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the perspective of relay protection]. *Relay protection and automation*, 2023, no. 1(50), pp. 30–38.
4. Gusev Yu.P., Kayumov A.G., Govorin V.V. *Uchet nesinfaznosti generatorov pri raschetakh tokov v nachal'nyy moment korotkogo замыканиya* [Consideration of the Out-of-Phase Operating Conditions of Generators in the Power System in Calculating the Currents at the Short-Circuit Fault Initial Moment]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2019, no. 4, pp. 11–17. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-11-17.
5. Lachugin V.F. *Volnovyye metody opredeleniya mesta povrezhdeniya na vozdukhnykh liniyakh elektroperedachi* [Traveling wave fault location methods on overhead transmission lines]. *Relay protection and automation*, 2023, no. 1(50), pp. 58–61.
6. Madzhidov A.S.. *Issledovaniye samozapuska asinkhronnykh dvigateley 0,4 kV sobstvennykh nuzhd elektrostantsiy* [Studying self-starting of 0.4 kV induction motors of power plant auxiliary needs]. *iPolytech Journal*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 1053–1068. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1053-1068>.
7. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R., Krylov A.A. *Metod analiticheskogo rascheta vybega asinkhronnykh dvigateley pod deystviyem tekhnologicheskoy nagruzki* [Analytical calculation method of asynchronous motors rundown under process load]. *Petroleum engineering*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 123–132. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-123-132.
8. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. *Issledovaniye raboty gruppy asinkhronnykh dvigateley pri kratkovremennykh provalakh napryazheniya dlya usloviy neftyanoy promyshlennosti* [Research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry]. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2020, vol. 22, no. 6, pp. 92–100.
9. Slavutskiy A.L. *Modelirovaniye perekhodnykh rezhimov uzla nagruzki s asinkhronnym dvigatelem v faznykh koordinatakh* [Modeling transients in the load nodes containing the induction motors in phase coordinates]. *Electrical and data processing facilities and system*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 38–45.
10. Bhattacharya B., Sinha A. *Intelligent Fault Analysis in Electrical Power Grids*. In: IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Boston, MA, USA, 2017, pp. 985–990. DOI: 10.1109/ICTAI.2017.00151.

11. Bulychev A.V., Gribkov M.A., Dmitrenko A.M., Okhotkin G.P. Remote Protection Based on Digital Methods of Estimating Distance to Points of Fault. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 8, pp. 433–437. DOI: 10.3103/S106837122108006X.
12. Dommel H.W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399. DOI: 10.1109/TPAS.1969.292459.
13. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. Analysis of the machinery and drive systems. N.Y., IEEE PRESS, 2002, 630 p. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5265638>.
14. Krause P.C., Krause T.C. Introduction to Modern Analysis of Electric Machines and Drives. Wiley-IEEE Press, 2023, 632 p. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/book/9989443>.
15. Kulikov A., Loskutov A., Bezdushniy D. Relay Protection and Automation Algorithms of Electrical Networks Based on Simulation and Machine Learning Methods. *Energies*, 2022, vol. 15, 6525. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186525>.
16. Lamets, Y., Podchivaline A., Chevelev A., Nudelman G., Zakonjšek J. Equivalent transforms of models, conditions and measurements in relay protection. In: IEEE Conference Publication: Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, 2004, pp. 76–79. DOI: 10.1049/cp:20040067.
17. Lin H., Ebrahimi S., Mahdavyfakhr M., Jatskevich J. Analysis of sliding-mode-controlled boost converters with mixed loads. In: 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Aalborg, Denmark, 2020, pp. 1–8. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265740.
18. Majidov A., Kayumov A.G., Hafizov S. Investigation of the Self-Starting Process of a Low-Power Asynchronous Motor. In: Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 2021, pp. 1462–1468. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396181.
19. Ni H., Fang S., Lin H.A. Simplified Phase-Controlled Switching Strategy for Inrush Current Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 36, no. 1, pp. 215–222. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2984234.
20. Slavutskii L.A., Ivanova N.N. Using the simplest neural network as a tool for fault location in power lines. In: AIP Conference Proceedings, Moscow, 01/04/2020 – 02/04/2020. Moscow, 2022, 030006. DOI: 10.1063/5.0074926.
21. Slavutskiy A.L., Vasilieva L.N., Grigoriev V.G. et al. Transients in the load node at power loss: Group run-out of induction motors. In: E3S Web of Conferences: 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 2019, Sept. 18–20. Vol. 124. Kazan, EDP Sciences, 2019, 05010. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405010.
22. Vasylyv K.M. A mathematical model of thermal power plants smoke exhausters induction motors system operation modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.3.03>.
23. Zheng F., Sun F., Zhou L., Liu W. et al. Study on Large Asynchronous Motor Starting Check for Auxiliary Power System. In: 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China, 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448843.

ALEKSANDR L. SLAVUTSKIY – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Software Development Department, Separate subdivision of Unitel Engineering LLC, Russia, Cheboksary (slavutskii@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-2445>).

Формат цитирования: *Славутский А.Л.* Моделирование аварийных режимов в узле комплексной нагрузки: высокочастотные составляющие тока и напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 151–159. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-151-159.