

# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

## METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.31

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70



### РАСЧЁТ ДОЛИ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ В ОТКЛОНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШИНЕ

Нигаматуллин Р.М.

АО «Магнитогорскгражданпроект», Магнитогорск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Актуальность проведенных в статье исследований диктуется ужесточением требований к качеству электроэнергии (КЭ) в последнее время. При этом нагрузка является одним из факторов, влияющих на основные показатели качества: отклонения напряжения и частоты сети от их номинальных значений. Целью настоящей работы является оценка доли регулирующего эффекта нагрузки (РЭН) в отклонении напряжения на примере распределительной шины электроприёмников промышленного объекта – насосной станции. **Используемые методы.** Для достижения поставленной цели были проведены расчёты параметров смоделированной части системы электроснабжения предприятия чёрной металлургии (ПАО «ММК»), имеющего в своём составе собственные источники электроэнергии, в программном комплексе «КАТРАН» (Комплекс автоматизированного режимного анализа). **Новизна.** Предложен новый подход в оценке влияния регулирующего эффекта нагрузки на параметры режима и показатели качества электроэнергии через расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения сети. Был составлен алгоритм для оптимизации режима с учётом статических характеристик нагрузки, суть которого состоит в определении положительного либо отрицательного регулирующего эффекта нагрузки и степени его влияния на отклонение напряжения сети с последующей выдачей рекомендаций. **Результат.** В ходе исследования получены процентные доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения при различной длине питающего кабеля. Также на основании полученных расчётов было выявлено, что с увеличением удаленности электрической нагрузки от источника электроэнергии влияние регулирующего эффекта нагрузки на отклонение напряжения сети возрастает. **Практическая значимость.** Предложенный подход может быть использован для оценки влияния статических характеристик нагрузки (СХН) на основные показатели качества электроэнергии и последующих рекомендаций по оптимизации параметров режима электрических систем по условию минимума отклонения напряжения сети.

**Ключевые слова:** регулирующий эффект нагрузки, статические характеристики нагрузки, качество электроэнергии, отклонение напряжения, режим.

© Нигаматуллин Р.М., 2020

#### Для цитирования

Нигаматуллин Р.М. Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №4. С. 65–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## CALCULATION OF A SHARE OF THE LOAD REGULATING EFFECT IN THE DISTRIBUTION BUSBAR VOLTAGE DEVIATION

Nigamatullin R.M.

JSC Magnitogorsk Civil Design Company, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** The relevance of the research carried out and described in the paper is defined by setting the stricter requirements for the quality of electricity (QE) in recent years. At the same time, load is one of the factors that affect the main quality indicators: deviations of the mains voltage and frequency from their nominal values. **Objectives:** The research is aimed at assessing the share of the load regulating effect (LRE) in the voltage deviation by the example of the distribution bus of electrical receivers of an industrial facility: a pumping station. **Methods Applied:** To achieve this goal, the KATRAN software package (automated mode analysis complex) was applied to calculate the parameters of the simulated part of the power supply system of the iron and steel works (PJSC MMK), which has its own electric power sources. **Originality:** A new approach is proposed to assess the influence of the load regulating effect on the mode parameters and power quality indicators by calculating the share of the load regulating effect in the mains voltage deviation. An algorithm was developed to optimize the mode in view of static load characteristics. It focuses on determining positive or negative load regulating effect and the degree of its influence on the mains voltage deviation, and giving relevant recommendations. **Findings:** The research described percentage shares of the load regulating effect in the voltage deviation at various lengths of supply cables. The calculation showed that when increasing the distance between electric load and the source of electric power, the influence of the load regulating effect on the mains deviation increased. **Practical Relevance:** The proposed approach may be used to assess the influence of static load characteristics (SLC) on the main indicators of electric power quality and subsequent recommendations for optimizing the parameters of the electrical system mode by the condition of the minimum mains voltage deviation.

**Keywords:** load regulating effect, static load characteristics, electric power quality, voltage deviation, operating mode.

**For citation**

Nigamatullin R.M. Calculation of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 4, pp. 65–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70>

**Введение**

На уровень напряжения узла сети влияют два фактора: мощность источников и мощность нагрузки, питаемой от данного узла. При этом видимая степень влияния нагрузки на этот параметр может быть нулевой только в том случае, если шина нагрузки будет совпадать с шиной генераторного напряжения и система возбуждения синхронных генераторов будет поддерживать напряжение на номинальном уровне. В остальных случаях она будет ненулевой, поскольку присутствуют потери напряжения в элементах сети, способных вносить также свои коррективы в установившийся режим [1].

В существующих научных трудах, посвящённых регулируемому эффекту нагрузки, производятся оценка статических характеристик нагрузки различных потребителей и оценка их влияния на параметры режима [2–9]. Однако не рассмотрено влияние СХН непосредственно на показатели качества электроэнергии, значительно влияющих на нормальную работу электрического оборудования [10]. В связи с этим в данной статье предлагается оценить влияние РЭН

на отклонение напряжения в узле промышленной нагрузки посредством расчёта процентной доли РЭН в  $\delta U$ .

Проведенный в работе эксперимент был проделан в программном комплексе «КАТРАН» [11–13], предназначенном для расчёта режимов промышленных систем электроснабжения с собственными источниками электроэнергии.

**Полученные результаты и их обсуждение**

В программе «КАТРАН» была смоделирована система, состоящая, главным образом, из электростанции, шины генераторного напряжения, питающего кабеля, распределительной шины и двигательной нагрузки (рис. 1). Она соответствует реальному объекту: Центральная электростанция ПАО «ММК» (ЦЭС) мощностью 216 МВт и питающаяся от неё насосная станция 1А ЦВС с установленной мощностью 14,6 МВт. Потребитель располагает девятью синхронными и двумя асинхронными двигателями по 10 кВ. СД работают в режиме перевозбуждения, вырабатывая реактивную мощность в сеть. Длина кабеля соответствует расстоянию между шиной нагрузки и шиной генераторов ЦЭС.

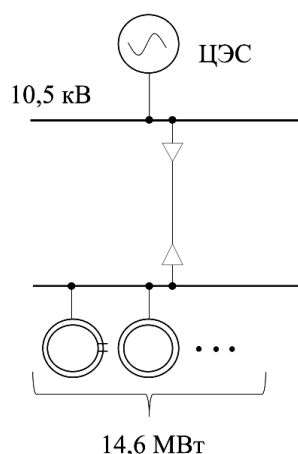


Рис. 1. Исследуемая система  
Fig. 1. The system under study

Далее в программе были получены напряжения исследуемого узла нагрузки с учётом и без учёта регулирующего эффекта двигателей при различной удаленности их от источника и подсчитана процентная доля РЭН в отклонении напряжения на распределительной шине через соотношение:  $\left| \frac{\Delta U}{\delta U} \right| \cdot 100\%$ . Здесь  $\Delta U$  – разность между напряжениями с учётом и без учёта статических характеристик нагрузки:

$$\Delta U = U_{с\ уч. СХН} - U_{без\ уч. СХН},$$

где  $U_{с\ уч. СХН}$  – напряжение с учётом статических характеристик нагрузки, кВ;

$U_{без\ уч. СХН}$  – напряжение без учёта статических характеристик нагрузки, кВ.

$\delta U$  – отклонение напряжения в абсолютных единицах.

$$\delta U = U_{\phi} - U_{ном},$$

где  $U_{\phi}$  – фактическое напряжение, кВ;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение, кВ.

Фактическое напряжение соответствует рассчитанному в программе напряжению с учётом регулирующего эффекта нагрузки, поэтому принимаем  $U_{\phi} = U_{с\ уч. СХН}$ . Подставляя их в соотношение, взятое по модулю, получим:

$$\left| \frac{\Delta U}{\delta U} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{U_{с\ уч. СХН} - U_{без\ уч. СХН}}{U_{с\ уч. СХН} - U_{ном}} \right| \cdot 100\%.$$

Наглядно разницу между  $\Delta U$  и  $\delta U$  мы можем увидеть на графике (рис. 2).

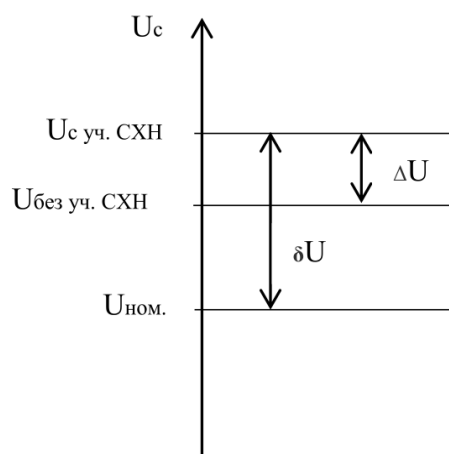


Рис. 2. Разница между  $\Delta U$  и  $\delta U$   
Fig. 2. Difference between  $\Delta U$  and  $\delta U$

Результаты проведенного эксперимента приведены в **таблице**.

Таблица. Результаты эксперимента, проведенного в программе «КАТРАН»  
Table. Results of the experiment conducted in KATRAN

S, км	$U_{с\ уч. СХН}$ , кВ	$U_{без\ уч. СХН}$ , кВ	$\left  \frac{\Delta U}{\delta U} \right  \cdot 100\%$
0,1	12,15	12,07	3,72
0,2	11,99	11,91	4,00
0,3	11,82	11,74	4,40
0,4	11,66	11,57	5,42
0,5	11,48	11,4	5,41
0,6	11,31	11,21	7,63
0,7	11,12	11,03	8,00
0,8	10,93	10,83	10,75
0,9	10,7	10,43	38,57
1,0	10,11	9,65	100

Примечание. Если  $\Delta U > \delta U$ , то доля регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения принимается равной 100%.

Как видно из таблицы, доля (влияние) РЭН в отклонении напряжения возрастает с увеличением длины кабеля (наглядно на гистограмме на рис. 3). При длине 1 км она составляет 100%. Данный подход позволяет нам оценить степень влияния СХН на отклонение напряжения сети и вычислить процентную долю этого влияния. Опираясь на расчётные данные, можно также предложить методы по снижению влияния отрицательного регулирующего эффекта нагрузки на параметры режима путём, например, внедрения частотного регулирования двигательной нагрузки, сводящего, как правило, РЭН практически к нулю.

Согласно последним нормативам, предельно допустимое отклонение напряжения сети составляет 10% от  $U_{ном}$ . В нашем случае регулирующий эффект двигателей насосной станции оказывает отрицательное влияние на  $\delta U$  распределительной шины, поскольку напряжение с учётом СХН будет отличаться от номинального значения на большую величину, чем напряжение без учёта СХН. Поэтому здесь возникает целесообразность снижения такого нежелательного эффекта нагрузки путём внедрения частотных преобразователей или изменения конфигурации сети. В первом случае параметры двигателей будут зависеть, по большей мере, от параметров самого ПЧ, выходные значения которого практически не изменяются при незначительных колебаниях напряжения или частоты сети, а не от параметров питающей сети.

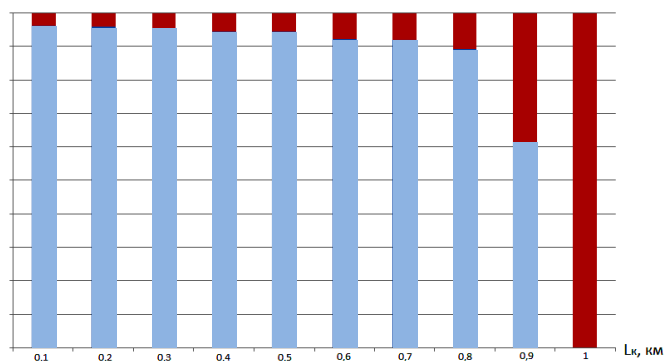


Рис. 3. Доля регулирующего эффекта (красный) в отклонении напряжения

Fig. 3. Percentage of the regulating effect (red) in the voltage deviation

Предложенные расчёты могут использоваться для выдачи рекомендаций по оптимизации режима электроэнергетических систем. Например, по алгоритму (рис. 4).

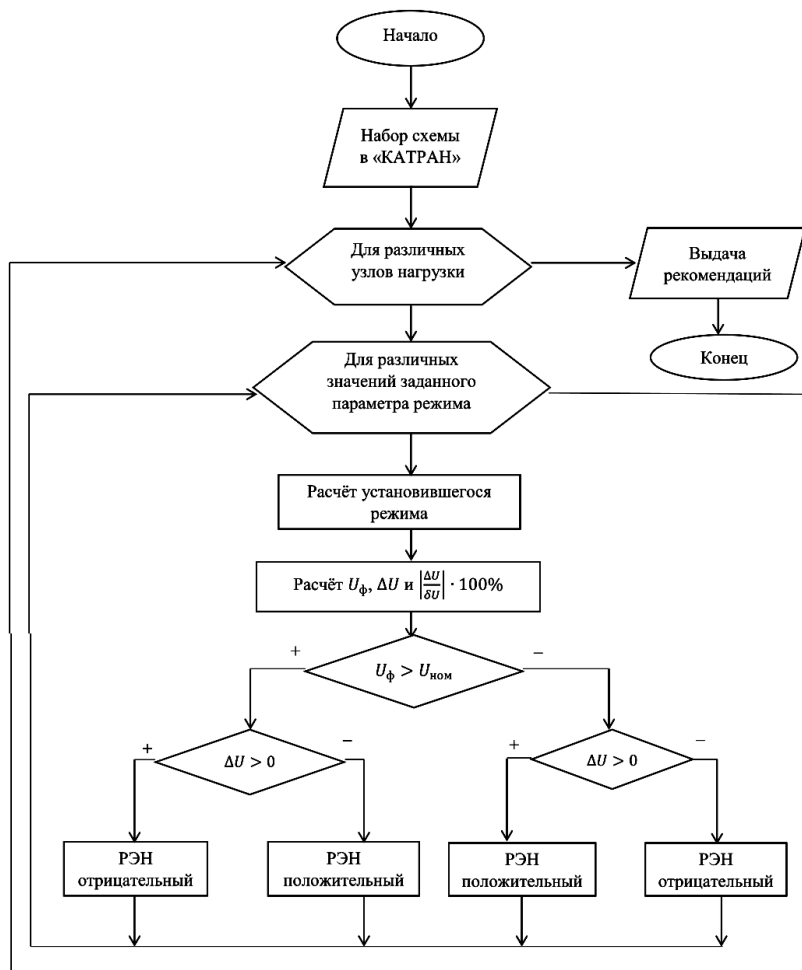


Рис. 4. Алгоритм оптимизации режима электрических систем по статическим характеристикам нагрузки  
 Fig. 4. Algorithm for optimizing the mode of electrical systems by static load characteristics

Алгоритм предлагает расчёт степени влияния РЭН на отклонение напряжения различных узлов нагрузки и при различных значениях заданного параметра режима (в нашем случае это была длина питающего кабеля), а также определение положительного либо отрицательного влияния регулирующего эффекта на уровень напряжения сети. При отрицательном РЭН возникает необходимость искусственного снижения негативного влияния нагрузки на напряжение сети. Целесообразность этого снижения можно оценить при помощи расчёта доли регулирующего эффекта в  $\delta U$ . Расчёт по алгоритму был проведён на примере узла нагрузки промышленной насосной станции, в результате которого была выявлена целесообразность снижения РЭН ввиду его отрицательного влияния на уровень питающего напряжения, которая возрастает по ме-

ре увеличения удалённости от источника электроэнергии.

### Заключение

Был рассмотрен новый подход в оценке влияния регулирующего эффекта нагрузки на отклонение напряжения сети посредством расчёта доли РЭН в этом отклонении. Полученные расчёты могут использоваться для оценки целесообразности изменения степени влияния нагрузки на параметры режима. Результаты эксперимента, освещённые в статье, также подтверждают тот факт, что при увеличении удалённости нагрузки от источника влияние источника на напряжение распределительной шины уменьшается, а влияние фактически изменяющейся мощности нагрузки увеличивается.

### Список литературы

1. Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 19–25. URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)
2. Лисунец Н.Л., Соломонов К.Н., Цепин М.А. Объемная штамповка алюминиевых заготовок. М.: Машиностроение, 2009. 171 с.
3. Малафеев А.В., Ефимов С.А., Зайцева Ю.Ю. Влияние регулирующего эффекта нагрузки промышленного предприятия на параметры установившегося режима // *Материалы 65-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2006–2007 гг.*: сб. докл. Т.2. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 32–34.
4. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2011. №4. С. 115–118.
5. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2015. №1. С. 11–20.
6. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев, П.В. Чусовитин, А.В. Юдин // *Научное обозрение*. 2013. №7. С. 77–79.
7. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокорылов, Ю.Н. Дементьев, Ю.В. Крохта, А.Р. Ари, Л.С. Удут // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №4. С. 109–120.
8. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // *Журнал Сибирского федерального университета*. 2015. С. 795–801.
9. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке / В.З. Ковалёв, А.Г. Щербаков, О.А. Петухова, А.А. Зябкин // *Омский научный вестник*. 2017. №5. С. 116–125.
10. Влияние отклонения напряжения на потери мощности в электрооборудовании электрических сетей и потребителей / Д.Г. Сафонов, А.Г. Лютаевич, С.Ю. Долингер, С.В. Бирюков // *Омский научный вестник*. 2013. №2. С. 203–206.
11. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №3(32). С. 27–38.
12. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. №1(38). С. 40–47.
13. Пат. 2019610251 Российская Федерация. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, М.А. Малафеев, Е.А. Панова, А.В. Варганова, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова,



В.В. Зиновьев, А.И. Юлдашева, А.А. Крубцова, Н.А. Анисимова, А.Т. Насибуллин, М.А. Трemasов, В.С. Щербakова, В.К. Богущ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Носова». № 2018661952; заявл. 29.10.2018; опублик. 10.01.2019.

## References

1. Nigmatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeev A.V. Study of the influence of the load regulating effect on the voltage level of the supply substation, taking into account short-circuit power of the power system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2020, no. 2(47), pp. 19–25. URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)
2. Lisunets N.L., Solomonov K.N., Tsepin M.A. *Obemnaya shtampovka alyuminievykh zagotovok* [Die forging of aluminum billets]. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 171 p. (In Russ.)
3. Malafeev A.V., Efimov S.A., Zaitseva Yu.Yu. Influence of the load regulatory effect of the industrial enterprise on the parameters of the steady-state mode. *Materialy 65-y nauch.-tekh. konf. po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2006–2007 gg.* [Proceedings of the 65th Scientific and Technical Conference according to the results of scientific research for 2006–2007: abstracts]. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, vol. 2, pp. 32–34. (In Russ.)
4. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Assessing rectifier load regulatory effect to determine the parameters of the established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Education Institutions. Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115–118. (In Russ.)
5. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N. L. Experimental determination of static load characteristics of electric power systems. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2015, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.)
6. Pazderin A.V., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Chusovitin P.V., Yudin A.V. Determination of the static characteristics of major load nodes. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2013, no. 7, pp. 77–79. (In Russ.)
7. Odnokopylov I.G., Dementiev Yu.N., Krokhta Yu.V., Ari A.R., Udut L.S. Static limiting characteristics of the asynchronous electric drive with frequency vector control. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.)
8. Filatov A.N., Sizganova E.Yu., Panteleev V.I., Petukhov R.A., Pilyugin G.A. Static characteristics and methods for calculating steady-state modes of synchronous motors. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University], 2015, pp. 795–801. (In Russ.)
9. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Petukhova O.A., Zyabkin A.A. Influence of the deviation of asynchronous machine parameters on its static characteristics under fan load. *Omskiy nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2017, no. 5, pp. 116–125. (In Russ.)
10. Safonov D.G., Lyutarevich A.G., Dolinger S.Yu., Biryukov S.V. Influence of the voltage deviation on power losses in electrical equipment of electric mains and consumers. *Omskiy nauchny vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 2, pp. 203–206. (In Russ.)
11. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeev A.V. Improving the efficiency of managing the modes of industrial power plants by predicting static and dynamic stability when changing the network configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27–38. (In Russ.)
12. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeev A.V. On the issue of saturation accounting in the mathematical model of an industrial generator for calculating transient modes in the power supply system of a complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40–47. (In Russ.)
13. Igumenshchev V.A., Malafeev M.A., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Yuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov M.A., Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [KATRAN 10.0 automated mode analysis software]. Software Registration Certificate of the Russian Federation, no. 2019610251, applied on 29.10.2018; published on 09.01.2019.

Поступила 07.11.2020; принята к публикации 08.12.2020; опубликована 25.12.2020  
Submitted 07/11/2020; revised 08/12/2020; published 25/12/2020

**Нигаматуллин Руслан Миратович** – инженер,  
АО «Магнитогорскгражданпроект», Магнитогорск, Россия.  
Email: [nigmatullin\\_ruslan@mail.ru](mailto:nigmatullin_ruslan@mail.ru). ORCID 0000-0003-3236-9358

**Ruslan M. Nigmatullin** – Engineer,  
JSC Magnitogorsk Civil Design Company, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [nigmatullin\\_ruslan@mail.ru](mailto:nigmatullin_ruslan@mail.ru). ORCID 0000-0003-3236-9358