



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.Р. Саттаров, Р.Р. Гарафутдинов

Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа, Россия

Резюме: Провалы напряжения достаточно частое и опасное явление, которое может привести к нарушению технологического процесса производства. Обеспечение сохранения устойчивости асинхронных двигателей при провалах напряжения является важной задачей обеспечения непрерывности технологического процесса, а также снижения материальных убытков. **ЦЕЛЬ.** Привести основные причины провалов напряжения. Разработать имитационную модель, соответствующую типовой схеме электроснабжения нефтеперекачивающей насосной станции с группой асинхронных двигателей в качестве нагрузки. Выполнить две серии расчетов по определению параметров электрического режима при провалах напряжения и последующем восстановлении напряжения на шинах питающей подстанции. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялся программный комплекс PSCAD. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, приведены основные причины провалов напряжения. Выполнено моделирование провалов напряжения, возникающих в результате короткого замыкания на оборудовании подстанции. Выполнены серии расчетов, отличающиеся друг от друга измененными исходными данными: место возникновения короткого замыкания (далее – КЗ), выдержка времени автоматического ввода резерва (далее – АВР). Выполнен анализ полученных результатов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** По результатам проведения испытаний видно, что снижение напряжения на шинах низшего напряжения подстанций после работы АВР тем ниже, чем больше выдержка времени АВР. В настоящей работе максимальная выдержка времени составляла 7 секунд, при этом, нарушения устойчивости асинхронных двигателей не возникло. Также определена необходимость исследования работы группы асинхронных двигателей при авариях во внешней электрической сети.

Ключевые слова: асинхронный, двигатель, провал, напряжения, пуск, самозапуск.

Для цитирования: 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:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.

RESEARCH OF THE OPERATION OF A GROUP OF ASYNCHRONOUS MOTORS AT SHORT-TERM VOLTAGE SLOPES FOR THE CONDITIONS OF THE OIL INDUSTRY

RR. Sattarov, RR. Garafutdinov

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract: Voltage dips are quite frequent and dangerous phenomenon, which can lead to disruption of the production process. Ensuring the stability of induction motors during voltage dips is an important task to ensure the continuity of the technological process, as well as to reduce material losses. **THE PURPOSE.** List the main causes of voltage dips. Develop a simulation model corresponding to a typical power supply scheme for an oil pumping station with a group of asynchronous motors as a load. Perform two series of calculations to determine the parameters of

the electrical mode in case of voltage dips and the subsequent restoration of the voltage on the buses of the supply substation. **METHODS.** When solving the problem, the PSCAD software package was used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, the main causes of voltage dips are given. The simulation of voltage dips resulting from a short circuit on the substation equipment has been performed. A series of calculations were performed, differing from each other in the changed initial data: the place of occurrence of a short circuit, the time delay of automatic transfer of the reserve. The analysis of the obtained results is carried out. **CONCLUSION.** According to the test results, it can be seen that the decrease in voltage on the low voltage buses of substations after the operation of automatic transfer switch is the lower, the longer the time delay of automatic transfer switch. In this work, the maximum time delay was 7 seconds, while there was no violation of the stability of the induction motors. The need to study the operation of a group of asynchronous motors in case of accidents in an external electrical network is also determined.

Keywords: asynchronous, motor; failure; voltage; start; self-launch.

For citation: Sattarov RR, Garafutdinov RR. 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;22(6):92-100. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100.

Введение

Провал напряжения это внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9 U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд.

Несмотря на то, что проявления отклонения напряжения имеют случайный характер, вероятность этого события зависит от вполне определенных причин. Основные причины возникновения провалов напряжения в электрических сетях приведены на рис. 1 [1-4].

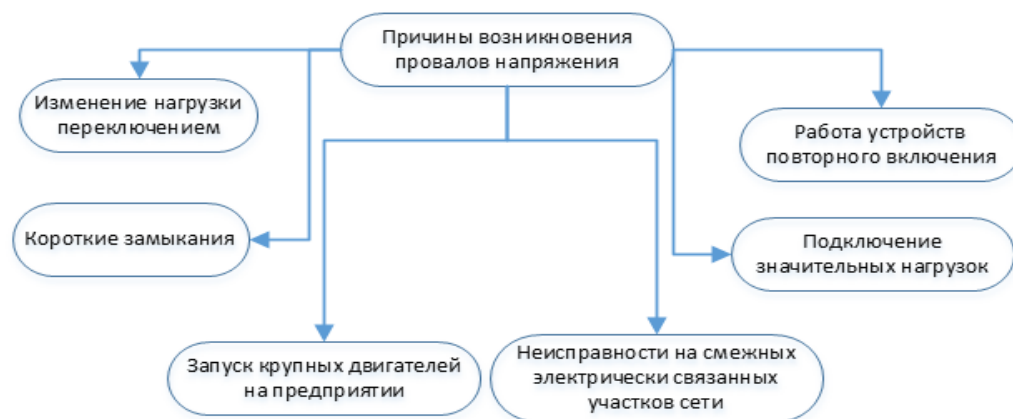


Рис. 1. Основные причины возникновения провалов напряжения

Данное явление считается менее опасным отклонения частоты и импульсов напряжения, но, тем не менее, провалы могут привести к следующим последствиям:

- понижению интенсивности светового потока, производимого источниками с нитью накала;
- ложным срабатываниям электронных систем управления;
- понижению уровня постоянного тока в контактной сети электротранспорта, что негативно отражается на работе подвижного состава;
- изменению характеристик преобразователей напряжения;
- падению мощности электродвигателей, что приводит к повышенным потерям электроэнергии и износу;
- нарушению технологического процесса производства и связанным с этим экономическим убыткам.

Основными потребителями электроэнергии на промышленных предприятиях, в том числе и в нефтяной промышленности, являются асинхронные электродвигатели (далее – АД) [5-9]. Исследование работы АД при кратковременных провалах напряжения является актуальной задачей, поскольку обеспечение возможности восстановления их нормальной работы после провалов напряжения позволит значительно снизить материальные затраты вследствие исключения останова АД и нарушения производственного процесса [10-13].

В данной работе выполнено исследование работы группы АД при кратковременных провалах напряжений.

Описание имитационной модели

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса PSCAD [14-15]. Разработана типовая схема электроснабжения нефтеперекачивающей насосной станции [16], которая представляет собой понижающую подстанцию 35/10 кВ с расположенными на шинах низшего напряжения (10кВ) тремя АД (рис. 2).

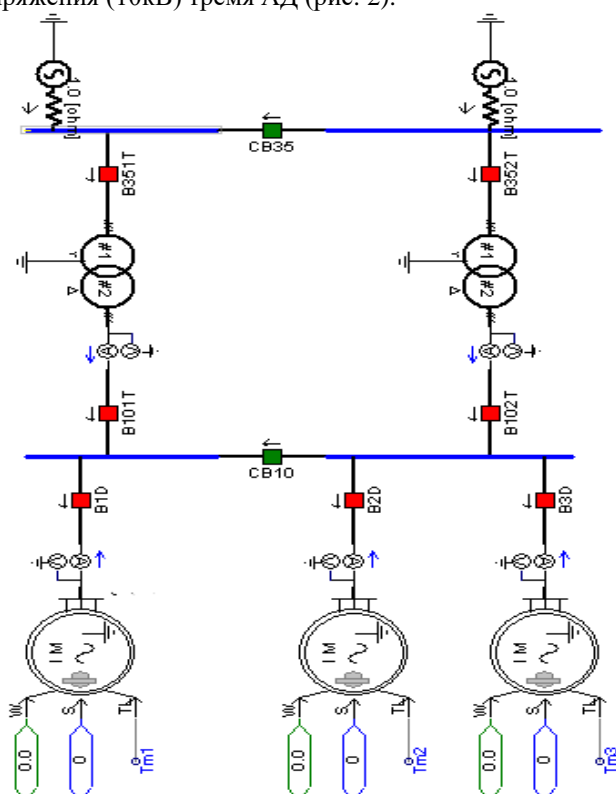


Рис. 2. Типовая схема электроснабжения с двумя секциями шин

Подстанция питается от сети внешнего электроснабжения напряжением 35 кВ. Шины 35 кВ и 10 кВ нормально секционированы.

На подстанции установлено два силовых трансформатора ТМН-10000/35 напряжением 35/10 кВ и мощностью 10 МВА каждый. Параметры указанных трансформаторов приведены в [17].

К шинам 10 кВ подключено три АД типа 4А3МВ-1600. Распределение по секциям следующее: один АД на 1 секции шин (далее – сек.ш.) 10 кВ и два АД на 2 сек.ш. 10 кВ. Характер нагрузки, подключенной к АД, соответствует центробежному насосу без противодействия [18-19].

Моделирование характера нагрузки в программном комплексе PSCAD выполняется путем задания уравнения изменения момента на валу АД в зависимости от его скорости (рис. 3).

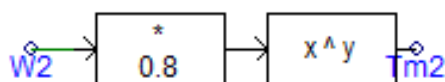


Рис. 3. Уравнение изменения момента на валу АД в зависимости от его скорости, соответствующее центробежному насосу в режиме без противодействия (значение $y=1,4$)

Проведение испытаний

На разработанной модели было выполнено последовательно два испытания:

- 1) КЗ на 1 сек.ш. 35 кВ и его отключение действием РЗА. В результате пропадает напряжение на 1 сек.ш. 10 кВ на время действия АВР на СВ10;
- 2) КЗ на 2 сек.ш. 35 кВ и его отключение действием РЗА. В результате пропадает напряжение на 2 сек.ш. 10 кВ на время действия АВР на СВ10.

Так, программа первого испытания следующая:

1. Пуск моделирования;
2. Возникновение КЗ на 1 сек.ш. 35 кВ и отключение В351Т и СВ35($t=3$ с);
3. Погашение 1 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t=3-8$ с);
4. Работа АВР 10 кВ и включение СВ10, подача напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t=8$).

Результаты первого испытания приведены на рис. 4 и 5.

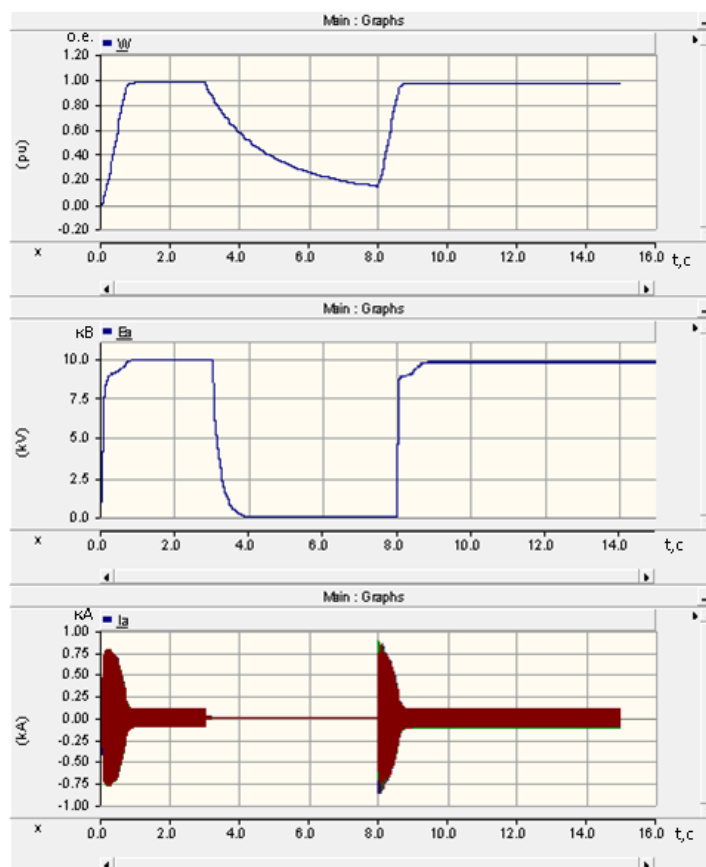


Рис. 4. Графики изменения параметров АД-1 при проведении испытаний.
 W – скорость вращения АД относительно номинального значения; Ea – напряжение на выводах АД;
 Ia – ток на выводах АД.

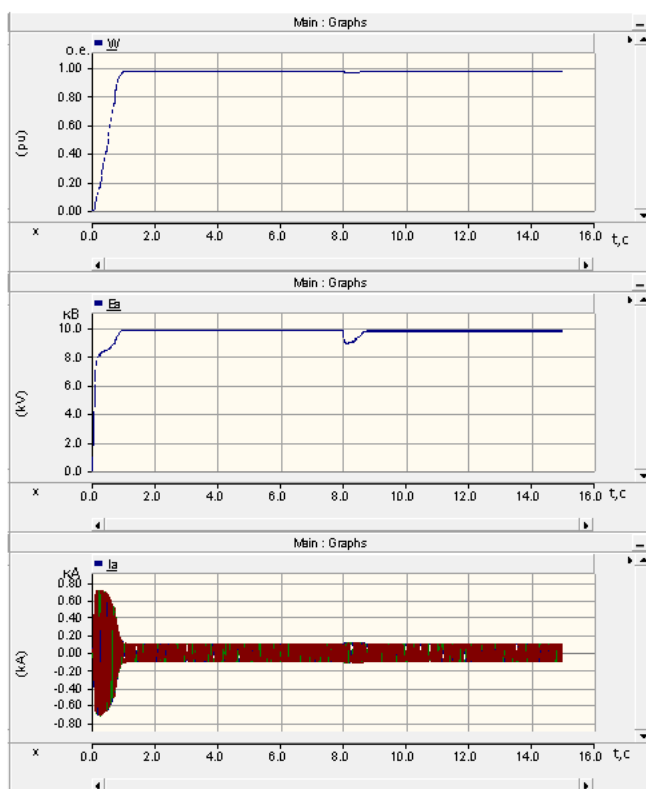


Рис. 5. Графики изменения параметров АД-2 при проведении испытаний.

W – скорость вращения АД относительно номинального значения;

E_a – напряжение на выводах АД;

I_a – ток на выводах АД.

Дополнительно, была выполнена серия расчетов, с целью определения зависимости снижения напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ после работы АВР от длительности провала напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ. В данном случае длительность провала напряжения определяется выдержкой времени срабатывания АВР на СВ10. Серия расчетов выполнялась с использованием инструмента *Multiple Run*, встроенного в *PSCAD*. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов с использованием *Multiple Run*

	Выдержка времени АВР, сек	Величина напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ после работы АВР, кВ
	1,0	8,67
	2,0	8,41
	3,0	8,31
	4,0	8,27
	5,0	8,24
	6,0	8,22
	7,0	8,21

Выводы по результатам первого испытания

1. После работы АВР работа АД-1 восстанавливается.
2. После работы АВР возникает кратковременное снижение напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ из-за перевода питания АД-1 на питание от 2 сек.ш. 10 кВ. И на основании серии расчетов можно сказать, что величина снижения напряжения прямо пропорциональна длительности провала напряжения.
3. Напряжение на выводах АД-2 и АД-3 после работы АВР кратковременно снижается с 10 кВ до 9 кВ (в первом расчете серии) и не приводит к нарушению устойчивости (во всей серии расчетов). При этом ток на выводах АД-2 и АД-3 увеличивается незначительно.
4. После работы АВР скорость вращения АД-2 и АД-3 снижается кратковременно и незначительно.

Программа второго испытания следующая:

1. Пуск моделирования;
2. Возникновение КЗ на 2 сек.ш. 35 кВ и отключение В352Г и СВ35 ($t = 3$ с);
3. Погашение 2 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t = 3-8$ с);
4. Работа АВР 10 кВ и включение СВ10, подача напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ и АД-1 ($t = 8$ с).

Результаты второго испытания приведены на рис. 6 и 7.

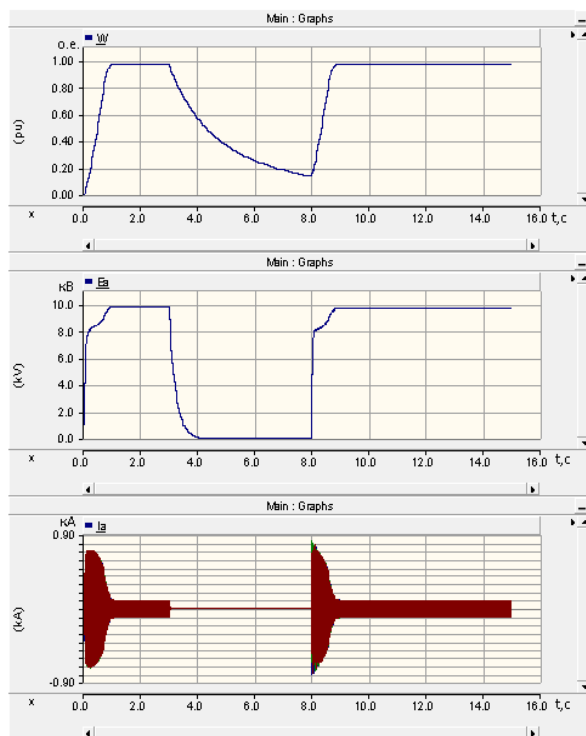


Рис. 6. Графики изменения параметров АД-2 (АД-3) при проведении испытаний:
 W – скорость вращения АД относительно номинального значения;
 Ea – напряжение на выводах АД;
 Ia – ток на выводах АД.

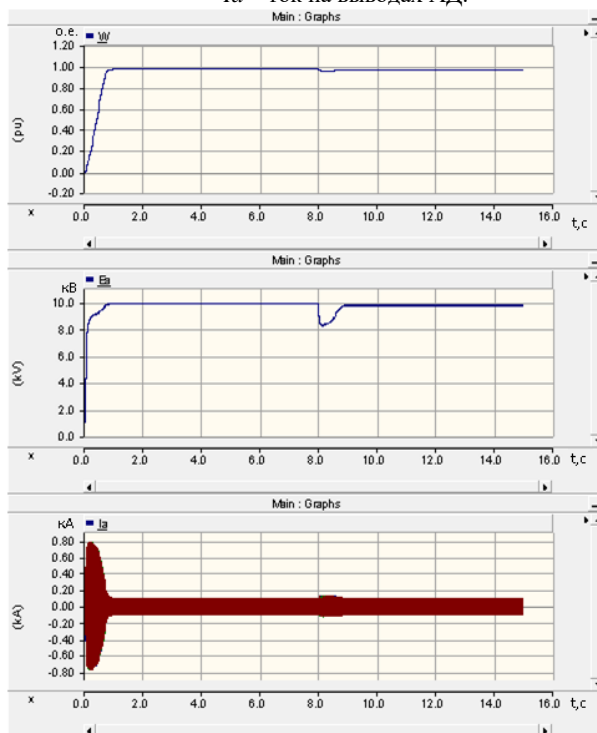


Рис. 7. Графики изменений параметров АД-1 при проведении испытаний:
 W – скорость вращения АД относительно номинального значения;
 Ea – напряжение на выводах АД;
 Ia – ток на выводах АД.

Аналогично первому испытанию была выполнена серия расчетов, с целью определения зависимости снижения напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ после работы АВР от длительности провала напряжения на 2 сек.ш. 10 кВ. В данном случае длительность провала напряжения определяется выдержкой времени срабатывания АВР на СВ10. Результаты расчетов приведены в табл. 2

Таблица 2

Результаты расчетов с использованием *Multiple Run*

	Выдержка времени АВР, сек	Величина напряжения на 1 сек.ш. 10 кВ после работы АВР, кВ
	1,0	8,67
	2,0	8,41
	3,0	8,31
	4,0	8,27
	5,0	8,24
	6,0	8,22
	7,0	8,21

Выводы по результатам второго испытания

1. После работы АВР работа АД-2 и АД-3 восстанавливается.
2. После работы АВР возникает кратковременное снижение напряжения на 1 сек. ш. 10 кВ из-за перевода питания АД-2 и АД-3 на питание от 1 сек. ш. И на основании серии расчетов можно сказать, что величина снижения напряжения прямо пропорциональна длительности провала напряжения.
3. Напряжение на выводах АД-1 после работы АВР кратковременно снижается с 10 кВ до 8 кВ (в первом расчете из серии) и не приводит к нарушению устойчивости АД-1(во всей серии расчетов). При этом ток на выводах АД-1 увеличивается незначительно
4. После работы АВР скорость вращения АД-1 снижается кратковременно и незначительно.

Заключение

По результатам проведения испытаний видно, что снижение напряжения на шинах 10 кВ после работы АВР тем ниже, чем больше выдержка времени АВР. В настоящей работе максимальная выдержка времени составляла 7 секунд, при этом, нарушения устойчивости АД не возникло. Однако, нарушение устойчивости АД может произойти и при выдержке времени 7 секунд и ниже в условиях, отличных от рассматриваемых в настоящей работе (аварии во внешней сети, иной характер нагрузки на АД, большее количество АД на шинах и более высокая мощность АД). Анализ возможности нарушения устойчивости при иных схемно-режимных условиях следует выполнять дополнительно.

Литература

1. Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В., Гареев А.Ш. и др. Негативное влияние провалов напряжения на потребителей и способы его уменьшения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. V. 18. № 3 (64).
2. Liao H., Milanovic J., Rodrigues M., et al. Voltage Sag Estimation in Sparsely Monitored Power Systems Based on Deep Learning and System Area Mapping // IEEE Transactions on Power Delivery, 1–1.2018.
3. Felce A., Matas G., Da Silva Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors // Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc). 2004. V. 4. pp. 2573–2578.
4. Секретарев Ю.А., Меняйкин Д.А. Особенности расчетов последствий отказов электроснабжения в распределительных сетях с монопотребителем электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. №2. С. 43-50.
5. Garnica Lopez M. A., Garcia de Vicuna J. L., Miret J., et al. Control Strategy for Grid-Connected Three-Phase Inverters During Voltage Sags to Meet Grid Codes and to Maximize Power Delivery Capability // IEEE Transactions on Power Electronics, V. 33. N11. pp. 9360–9374.2018.
6. De Santis M., Noce C., Varilone P., et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks // Electric Power Systems Research. 2018. V. 154. pp. 391–400.

7. Николаев А.А., Денисевич А.С., Ложкин И.А. и др. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей прокатки // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28).
8. Gomez J.C., Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of voltage sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment // Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc. 2001. Vol. 2, № С. pp. 1196–1199.
9. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21 № 1-2. С. 131-140.
10. Wang Z., Zhu K., Wang X. An analytical method to calculate critical clearance time of symmetrical voltage sags for induction motors // Dianwang Jishu. Power Syst. Technol. 2014. V. 38. № 2. pp. 509–514.
11. Ojaghi M., Faiz J., Shahrouzi H. et al. Induction motors performance study under various voltage sags using simulation // Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems. 2012. V.1. N.3. pp.32- 39.
12. Sattarov R. R., Morozov P. V. Physical approach to analysis of induction motor braking under machinery load // Journal of Physics: Conference Series 2020. pp.1-5.
13. Bollen M.H.J., Yalcinkaya G., Hazza G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sag analysis // Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP. 1998. V. 1. P. 598–603.
14. Гарафутдинов Р.Р., Саттаров, Р.Р. Моделирование усовершенствованной автоматике ограничения перегрузки оборудования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20. № 1. С. 30–37.
15. Sattarov R.R. et al. Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Students // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019. P. 1–6.
16. Gomez J.C., Morcos M.M., Reineri C.A. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions // IEEE Trans. Power Deliv. 2002. V. 17. № 2. P. 434–440.
17. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М.:ЭНАС. 2012. 376 с.: ил.
18. Petronijević M., Mitrović N., Kostić V., Banković B. An Improved Scheme for Voltage Sag Override in Direct Torque Controlled Induction Motor Drives // Energies. 10(5). С. 663–2017.
19. Галеев Л.М. Исследование напряжения в линейно нагруженной электрической сети, образованного плоской электромагнитной волной // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 54-63.

Авторы публикации

Саттаров Роберт Радикович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханики» Уфимского государственного авиационного технического университета. г. Уфа. e-mail: sattar.rb@gmail.com.

Гарафутдинов Рустам Разифович – аспирант кафедры «Электромеханики» Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа. e-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru

References

1. Ismagilov FR, Maksudov DV, Gareev ASH. et al. Adverse effect on consumer voltage sags and the way it reduction. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;18(3):64.
2. Liao H, Milanovic J, Rodrigues M, et al. Voltage Sag Estimation in Sparsely Monitored Power Systems Based on Deep Learning and System Area Mapping. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1.2018. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2865906.
3. Felce A, Matas G, Da Silva Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors. *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)* 2004;4:2573–2578. doi: 10.1109/IAS.2004.1348838.

4. Sekretarev YA, Menyainkin DA. Features of calculations of consequences of failures of power supply in distribution networks with the monoconsumer of electric energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):43-50. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-43-50>
5. Garnica Lopez M.A, Garcia de Vicuna JL, Miret J, et al. Control Strategy for Grid-Connected Three-Phase Inverters During Voltage Sags to Meet Grid Codes and to Maximize Power Delivery Capability/ *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(11):9360–9374.
6. De Santis M, Noce C, Varilone P, et al. Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks. *Electric Power Systems Research*. 2018;154:391-400.
7. Nikolaev AA, Denisevich AS, Lozhkin IA. et al. Investigation of voltage drops' influence in the power supply system of the "MMK METALURJI" ironworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Electrotechnical systems and complexes*. 2015;3(28).
8. Gomez JC, Morcos M.M. A simple methodology for estimating the effect of voltage sags produced by induction motor starting cycles on sensitive equipment. *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc.* 2001;2(C): 1196–1199. doi: 10.1109/IAS.2001.955648.
9. Zolotov II, Shevcov AA. Influence of electricity consumers on the autonomous power supply systems voltage form. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):131-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140>.
10. Wang Z, Zhu K, Wang X. An analytical method to calculate critical clearance time of symmetrical voltage sags for induction motors. *Dianwang Jishu/Power Syst. Technol.* 2014;38(2):509-514.
11. Ojaghi M, Faiz J, Shahrouzi H. et al. Induction motors performance study under various voltage sags using simulation. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2012; 1(3):32-9. doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073348.
12. Sattarov RR, Morozov PV. Physical approach to analysis of induction motor braking under machinery load. *Journal of Physics: Conference Series 2020*.2020:1-5.
13. Bollen M.H.J, Yalcinkaya G, Hazza G. The use of electromagnetic transient programs for voltage sag analysis. *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP. Power, ICHQP.* 1998;1(1):598-603.. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759977.
14. Sattarov RR, Garafutdinov RR. Modeling Advanced Automatic Overcurrent Limiting System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020;20(1);30–37. doi:10.14529/power200104.
15. Sattarov RR. et al. Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Students. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. IEEE, 2019;1-6. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950001.
16. Gomez JC, Morcos MM, Reineri CA. et al. Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2002;17(2); 434–440. doi: 10.1109/61.997914.
17. Fajbisovich DL. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej*. 4 ed. Moscow.: ENAS, 2012.
18. Petronijevi'c M, Mitrovi'c N, Kosti'c V. et al. An Improved Scheme for Voltage Sag Override in Direct Torque Controlled Induction Motor Drives. *Energies*. 2017;10(5);663–665. doi: 10.3390/en10050663.
19. Galeev LM. Investigation of the plane wave coupling to a linearly loaded transmission line network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):54-63. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-54-63>.

Authors of the publication

Robert R. Sattarov – Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

Rustam R. Garafutdinov – Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia.

Получено

20 ноября 2020 г.

Отредактировано

14 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.