
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_43

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СВЯЗИ С ПЕРЕВОДОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ НА ТЕХНОЛОГИЮ *SMART GRID*

Г.Я. Вагин

e-mail: ee@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.Л. Куликов

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Севостьянов

e-mail: ee@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ показателей качества электроснабжения, характеризующих надежность, качество электрической энергии и качество обслуживания систем электроснабжения. Даны рекомендации по учету анализируемых показателей качества, при проведении комплексной модернизации существующих систем электроснабжения. Приведены рекомендации по модернизации систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом внедрения технологии *Smart Grid*.

Ключевые слова: индикаторы надежности, качество электрической энергии, надежность электроснабжения, показатели качества электроснабжения, ущерб.

Для цитирования: Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid* // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 43-52. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_43

REQUIREMENTS FOR QUALITY OF POWER SUPPLY TO INDUSTRIAL ENTERPRISES IN CONNECTION WITH TRANSFER OF RUSSIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY TO SMART GRID TECHNOLOGY

G.Y. Vagin

e-mail: ee@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.L. Kulikov

ORCID: [0000-0003-1092-7136](https://orcid.org/0000-0003-1092-7136) e-mail: inventor61@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Sevostyanov

e-mail: ee@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The analysis of power supply quality indicators characterizing reliability, quality of electric energy and quality of service of power supply systems is given. Recommendations are presented on taking into account the analyzed quality indicators when carrying out a comprehensive modernization of existing power supply systems. Recommendations are given for the modernization of power supply systems of industrial enterprises, taking into account the introduction of Smart Grid technology.

Keywords: reliability indicators, power quality, power supply reliability, power supply quality indicators, damage.

For citation: G.Y. Vagin, A.L. Kulikov and A.A. Sevostyanov, "Requirements for quality of power supply to industrial enterprises in connection with transfer of Russian electric power industry to smart grid technology", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-52, 2022. DOI: [10.46960/2658-6754_2022_4_43](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2022_4_43)

I. Введение

Перевод электроэнергетики России на «цифру» и технологию *Smart Grid* (интеллектуальные энергетические системы) требует модернизации существующих систем электроснабжения (СЭС) потребителей электроэнергии, в первую очередь – СЭС промышленных предприятий, которые также должны стать интеллектуальными. СЭС призваны координировать действие всех элементов СЭС, присоединенных к ней (потребителей электроэнергии, средств повышения качества электроэнергии и компенсации

реактивной мощности, распределенных источников энергии и др.), чтобы эффективно обеспечивать безопасное, экономичное и надежное электроснабжение [1, 2]. Большинство СЭС предприятий этим требованиям не соответствуют [3], поэтому основное внимание при их модернизации необходимо обратить на повышение качества электроснабжения.

Качество электроснабжения СЭС оценивается следующими показателями [1]:

- 1) надежностью;
- 2) качеством электроэнергии;
- 3) качеством обслуживания.

В настоящей статье дан анализ этих показателей качества и рекомендации по их учету при модернизации СЭС промышленных предприятий.

II. Надежность электроснабжения

При оценке надежности СЭС потребителей электроэнергии необходимо учитывать следующие возможные нарушения нормального электроснабжения [4-5]:

- 1) внезапные кратковременные перерывы электроснабжения или глубокие посадки напряжения, вызванные короткими замыканиями или переходными процессами в питающей энергосистеме или в СЭС;
- 2) внеплановые перерывы электроснабжения с предварительным предупреждением;
- 3) внезапные длительные (до нескольких часов) перерывы электроснабжения;
- 4) ограничения по мощности или энергии (с предварительным предупреждением или без предупреждения).

При указанных выше нарушениях нормального электроснабжения на промышленных предприятиях может происходить:

- 1) снижение или прекращение выработки продукции;
- 2) разладка технологических процессов;
- 3) брак продукции;
- 4) выход из строя и сокращение срока службы оборудования, инструментов и приспособлений;
- 5) увеличение расходов электроэнергии, сырья и материалов на выработку продукции;
- 6) простой обслуживающего персонала.

В настоящее время в России надежность электроснабжения потребителей определяется по упрощенному методу (категорийности электроснабжения электроприемников) [7]. Установлены три категории I, II и III, для каждой из них предусмотрены допустимые времена перерывов питания.

Количество электроприемников в СЭС промышленных предприятий может достигать сотен тысяч, режим их работы весьма разнообразен и зависит от отрасли промышленности, поэтому сложно определить категорию всей СЭС и правильно выбрать оптимальную схему питания. В странах Евросоюза надежность энергосистем и СЭС потребителей зависит от величины ущерба, который возникает при перерывах электроснабжения потребителей. Используются следующие индикаторы надежности [1, 8]:

- 1) *SAIFI* – показатель средней частоты прерываний в работе энергосистемы, число в год (число прерываний работы на число всех потребителей в энергосистеме за год);
- 2) *SAIDI* – показатель средней длительности прерываний в работе энергосистемы, мин/год (совокупная продолжительность прерываний на число потребителей в энергосистеме за год);
- 3) *CAIFI* – показатель средней частоты прерываний электроснабжения потребителей (число прерываний работы на число всех прерванных потребителей в энергосистеме за год);
- 4) *CAIDI* – показатель средней длительности прерывания электроснабжения потребителей, мин/год (средняя длительность прерывания электроснабжения потребителей);
- 5) *ENS* – недоотпуск электроэнергии, МВт · ч/год (суммарный объем электроэнергии, недопоставленный во время всех отключений потребителей).

Энергосистемы и СЭС потребителей считаются высоконадежными, если выполняется критерий *N-1*, а показатели надежности 1-5 имеют минимальные значения. Критерий *N-1* означает, что надежность энергосистемы или СЭС потребителей сохраняется, если выходит из строя один из ее элементов (генератор, трансформатор, одна питающая линия, рабочие сборные шины и т.д.) [1].

На основании показателей надежности определяются ущербы от перерывов электроснабжения как для отдельных предприятий, так и для отраслей промышленности. Такая работа активно ведется в странах Евросоюза. Так, в [8] приведены данные по ущербам в пяти отраслях промышленности. Он находится в пределах от 5 до 100 Евро на 1 кВт отключенной мощности. Наибольший ущерб зафиксирован в медицинской промышленности, наименьший – в производстве цемента. На основании величин ущербов выбираются оптимальные варианты при проектировании и модернизации систем электроснабжения.

В нашей стране подобные исследования проводились в 1960-е гг. [4]. Это позволило повысить надежность электроснабжения многих промышленных предприятий.

В XXI в. исследования ущербов практически не проводятся в связи с ликвидацией крупных проектных институтов и нежеланием собственников предприятий давать сведения об ущербах от перерывов электроснабжения. Данных о величинах *SAIFI* и *CAIDI* по потребителям электроэнергии нет. Имеются сведения только по энергосистемам *SAIFI* и *SAIDI*. В 2018 г. по ЕЭС России *SAIDI* составлял 8,7 часов в год, в 2035 г. данный показатель планируется довести до 2,23 часа. *SAIFI* составлял 2,3 единицы, а в 2035 г. планируется – 0,85 единиц [10]. По странам Евросоюза средняя величина *SAIDI* составляет 1,5 часа в год, при этом *SAIFI* – 1,0 единиц в год [12].

III. Качество электроэнергии

В интеллектуальных СЭС применяется большое количество микропроцессоров и цифровых устройств, которые весьма чувствительны к качеству электроэнергии (КЭ). Низкое значение КЭ приводит к экономическому ущербу, который определяется по выражению [13]:

$$Y_{\Sigma} = Y_{T} + Y_{\Delta}, \quad (1)$$

где Y_{T} – технологическая составляющая ущерба, в которую входят ущербы от изменения производительности, брака продукции и изменения срока службы электроустановок; Y_{Δ} – электромагнитная составляющая ущерба, в которую входят ущербы от изменения потребления и потерь активной и реактивной мощности, а также срока службы элементов СЭС.

Исследования показывают, что наибольший ущерб создают кратковременные провалы напряжения, прерывания электроснабжения и высшие гармоники. В [14, 15] приведены значения ущербов от высших гармоник у некоторых потребителей электроэнергии:

- 1) страховая компания: ложное срабатывание автоматического выключателя – 100 000 евро за час простоя;
- 2) металлургический завод: выход из строя трех индукционных печей из-за резонанса – 20 000 евро в час;
- 3) мебельная фабрика: выход из строя регулируемых электроприводов – 10 000 евро в час;
- 4) фармацевтическая лаборатория: выход из строя генераторной установки при испытании новых лекарственных средств – 17 млн евро.

В России ущербы от низкого качества электроэнергии оцениваются в 25 млрд долл. в год [16]. Учитывая, что в интеллектуальных СЭС они будут расти, при проектировании данных систем необходим комплексный учет ущербов от надежности и качества электроэнергии.

Суммарный ущерб для СЭС промышленных предприятий будет определяться по выражению:

$$Y_{\Sigma} = Y_{НЭ} + Y_{КЭ}, \quad (2)$$

где $Y_{НЭ}$ – ущерб от надежности электроснабжения; $Y_{Э}$ – ущерб от низкого качества электроэнергии.

Учитывая большие сложности в определении ущербов в (2), авторы рекомендуют при модернизации СЭС промышленных предприятий применять имитационное моделирование.

Имитационная модель СЭС предприятия позволяет предсказывать поведение данной системы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах при воздействии как внешних, так и внутренних факторов различного характера. С помощью имитационного моделирования определяются характеристики, необходимые для расчета надежности, ущербов, качества электроэнергии, и определяются методы и средства повышения качества электроснабжения.

Для построения имитационной модели СЭС необходимо выполнить агрегатное моделирование производственного процесса предприятия [17]. Идея метода агрегатного моделирования основана на разложении производственного процесса на элементарные части: участки производства – «агрегаты», накопители и их связи для детального анализа его индивидуальных особенностей и взаимодействия отдельных частей.

«Агрегатом» является наименьший набор производственных механизмов, устройств, отделенный от остального оборудования предприятия промежуточными накопителями сырья – продукции [17] (рис. 1).

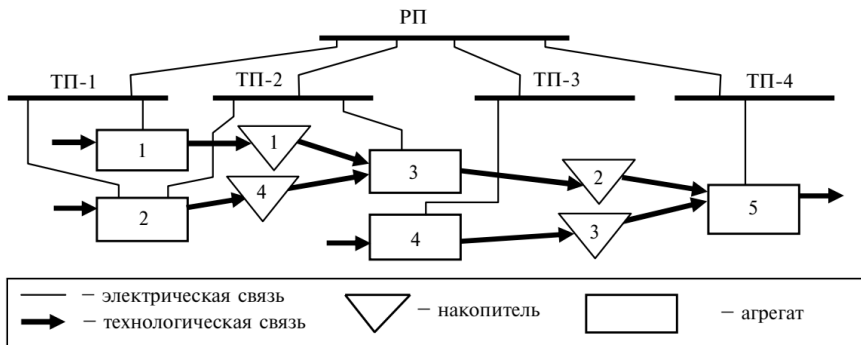


Рис. 1. Пример агрегатной модели

Fig. 1. An example of an aggregate model

При агрегатном преобразовании производственной системы все разнообразие технологического оборудования предприятия и организация его технологического процесса отражается тремя абстрактными элементами: «агрегатом» (участки производства), «накопители» (склады, емкости) и «связью» (электрические, технологические и прочие) учитывающей взаимовлияние первых двух элементов. Структура производства задается в виде направленного графа (рис. 1).

В [17] приведены примеры применения метода агрегатного моделирования для определения ущербов и классификация агрегатных моделей для предприятий различных отраслей промышленности.

IV. Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие рекомендации по модернизации СЭС промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid*.

1. На промышленных предприятиях России наблюдаются большие ущербы от перерывов электроснабжения и низкого качества электроэнергии, поэтому необходимы разработка и принятие государственной программы «Повышение качества электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid*».

2. Необходима разработка дорожной карты реализации этой Программы.

3. В процессе выполнения Программы необходимо следующее.

3.1. Провести исследование ущербов от нарушений электроснабжения и низкого качества электроэнергии на предприятиях различных отраслей промышленности и создать банк данных по ущербам.

3.2. Определить критерии надежности этих предприятий *CAIFI* и *CAIDI*.

3.3. Разработать методику построения имитационных моделей СЭС предприятий различных отраслей промышленных предприятий.

4. При сравнении вариантов модернизации СЭС промышленных предприятий необходимо обязательно учитывать ущербы от нарушения электроснабжения и низкого качества электроэнергии, за весь срок службы элементов СЭС.

5. Модернизированные СЭС должны соответствовать основным требованиям стандарта МЭК 61850.

© Вагин Г.Я., 2022

© Куликов А.Л., 2022

© Севостьянов А.А., 2022

Поступила в редакцию 12.08.2022

Received 12.08.2022

Библиографический список

- [1] Бухгольц Б.М., Стычински З.А. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего. М.: МЭИ, 2017. – 460 с.
- [2] EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006. – 44 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.smartgrid.gov/files/documents/Vision_Strategy_for_Europe_Electricity_Networks_Future_200601.pdf (дата обращения 01.08.2022).
- [3] Бушуев В.В., Кобец Б.Б., Лизалек Н.Н., Васильев В.В. Энергетическая политика: Интеллектуальное развитие электроэнергетики с учетом «активного» потребителя. М.: Энергия, 2013. – 84 с.
- [4] Михайлов В.В. Потребление электрической энергии – надежность и режимы. М.: Высшая школа, 1989. – 143 с.
- [5] Гук Ю.Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. М.: Энергия, 1970. – 177 с.
- [6] Baigent D., Adamiak M., Mackiewicz R. IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users // Protection & Control Journal. 2009. № 8. P. 61-68. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf> (дата обращения 17.07.2022).
- [7] Правила устройства электроустановок. М.: ЗАО “Энергосервис”, 1998. – 607 с.
- [8] Цапенко А.В., Тухас В.А. Системы мониторинга качества электрической энергии. Проблемы и пути контроля и управления качеством электрической энергии в электроэнергетике // Энергонадзор и Энергобезопасность. 2007. № 2. С. 24-29.
- [9] Головкин П.И. Режимы электроснабжения потребителей. М.: Энергия, 1971. – 112 с.
- [10] Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 №1523-р. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года.
- [11] Концепция “Цифровая трансформация 2030”. М.: 2018. – 31 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения 18.07.2022).
- [12] Ремизова Т.С., Кошелев Д.Б. Применение цифровых технологий для модернизации инфраструктуры электроэнергетической отрасли России // Проблемы Современной Экономики. 2018. № 2 (66). С. 31-34.
- [13] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. М.: Академия, 2010. – 224 с.
- [14] Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойберггер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- [15] Руководство по устройству электроустановок. Schneider Electric, 2009. – 469 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.se.com/ru/ru/download/document/Electrical_Guide_2009/ (дата обращения 19.07.2022).
- [16] Добрусин Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 30-35.
- [17] Шарыгин М.В. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными потребителями. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 283 с.

References

- [1] B.M. Buchholz and Z.A. Stychinski, *Smart Grids – Osnovy i Tekhnologii Energiosistem Budushchego [Smart Grids – Fundamentals and Technologies of Energy Systems of the Future]*. Moscow: MPEI, 2017 (in Russian).
- [2] EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006 [Online]. Available at: https://www.smartgrid.gov/files/documents/Vision_Strategy_for_Europe_Electricity_Networks_Future_200601.pdf [Accessed: Aug. 1, 2021].
- [3] V.V. Bushuev, B.B. Kobets, N.N. Lizalek and V.V. Vasiliev, *Energeticheskaya politika: Intellektual'noe razvitie elektroenergetiki s uchytom «aktivnogo» potrebitelya [Energy policy: Intellectual development of the electric power industry, taking into account the "active" consumer]*. Moscow: Energiya, 2013 (in Russian).
- [4] V.V. Mikhailov, *Potreblenie elektricheskoy energii – nadyozhnost' i rezhimy. [Electric energy consumption – reliability and modes]*. Moscow: Higher School, 1989 (in Russian).
- [5] Yu.B. Guk, *Teoriya i raschyot nadyozhnosti sistem elektrosnabzheniya [Theory and calculation of reliability of power supply systems]*. Moscow: Energiya, 1970 (in Russian).
- [6] D. Baigent, M. Adamiak and R. Mackiewicz, “IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users”, *Protection & Control Journal*, vol. 8, pp. 61-68, July 2009. [Online]. Available at: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf> [Accessed: July 17, 2022].
- [7] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]*. Moscow: CJSC "Energoservice", 1998 (in Russian).
- [8] A.V. Tsapenko and V.A. Tukhas, “Sistemy monitoringa kachestva elektricheskoy energii. Problemy i puti kontrolya i upravleniya kachestvom elektricheskoy energii v elektroenergetike [Electrical energy quality monitoring systems. Problems and ways of monitoring and managing power quality in electric power industry]”, *Energondzor i Energobezopasnost' [Energy Supervision and Energy Security]*, no. 2, pp. 24-29, 2007 (in Russian).
- [9] P.I. Golovkin, *Rezhimy elektrosnabzheniya potrebitel'ev [Modes of power supply to consumers]*. Moscow: Energiya, 1971 (in Russian).
- [10] Decree of the Government of the Russian Federation dated 06.09.2020 no. 1523-r. *Ob utverzhenii Energeticheskoy strategii Rossijskoj federacii na period do 2035 goda [On the approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]* (in Russian).
- [11] *Koncepciya “Cifrovaya transformaciya 2030” [The concept of “Digital Transformation 2030”]*. Moscow: 2018. [Online]. Available at: http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf [Accessed: July 18, 2022] (in Russian).
- [12] T.S. Remizova and D.B. Koshelev, “The use of digital technologies for infrastructural modernization of the electric energy production in Russia (Russia, Moscow)”, *Problems of Modern Economics*, no. 2 (66), pp. 31-34, 2018 (in Russian).
- [13] G.Ya. Vagin, A.B. Loskutov and A.A. Sevostianov, *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in the electric power industry]*. Moscow: Academy, 2010 (in Russian).

- [14] I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovsky, G.G. Pivnyak, Yu.L. Saenko and N.A. Neuberger, *Elektromagnitnaya sovместimost' potrebitelej* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2012 (in Russian).
- [15] *Rukovodstvo po ustrojstvu elektroustanovok* [Manual for the device of electrical installations]. Schneider Electric, 2009. [Online]. Available at: https://www.se.com/ru/ru/download/document/Electrical_Guide_2009/ [Accessed: July 19, 2022] (in Russian).
- [16] L.A. Dobrusin, "Problemy kachestva elektroenergii i elektroснабzheniya v Rossii [Problems of power quality and power supply in Russia]", *Energoekspert* [Energoexpert], no 4 (9), pp. 30-35, 2008 (in Russian).
- [17] M.V. Sharygin, *Zashchita i avtomatika sistem elektroснабzheniya s aktivnymi potrebitelyami* [Protection and automation of power supply systems with active consumers]. N. Novgorod: NRU RANEPА, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вагин Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Gennady Y. Vagin, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Aleksandr L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Севостьянов Александр Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Aleksandr A. Sevostyanov, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation