

УДК 621.316.3.003.13

## Об анализе последствий от нарушений электроснабжения

Б.В. Папков<sup>1</sup>, В.А. Савельев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГБОУВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,  
г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Оценка возможных последствий от нарушений электроснабжения потребителей производилась разными авторами в основном по ретроспективной или экспертной информации. Анализ фактических последствий нарушений электроснабжения конкретного потребителя представляет отдельную задачу. В условиях усложнения технологических процессов производства решение ее позволит получить объективные оценки показателей надежности и ущерба, минимизируя возможные и фактические последствия.

**Материалы и методы.** Решение поставленной задачи выполнено на основе детального исследования технологической, нормативной и экспертной документации по анализируемому производству. Главные факторы, определяющие надежность электроснабжения конкретного потребителя, выделены на основе системного подхода.

**Результаты.** Проведен анализ функционирования регулирующей и управляющей автоматики, наличия резервов, структуры и режимов схемы электроснабжения. Выявлены особенности эксплуатации конкретного потребителя и недостатки первоначального проекта. Показано, что эффективность решений, принимаемых при оценке показателей надежности электроснабжения и технико-экономических последствий внезапных нарушений электроснабжения, зависит от полноты, точности и своевременности берущейся за основу информации. Детальный анализ последствий от нарушений электроснабжения в условиях неполной, нечеткой и неопределенной технико-экономической информации дал возможность сформулировать предложения по оценке фактических последствий отказов в системах электроснабжения потребителей.

**Вывод.** Повышение уровня надежности электроснабжения, минимизация (или исключение) последствий внезапных нарушений электроснабжения потребителей требует перехода к активно-адаптивным системам автоматизированного управления режимами электроснабжения и технологическим процессом производства.

**Ключевые слова:** электроснабжение, системный подход, первичная информация, надежность, ущерб от нарушений электроснабжения, автоматизация.

## Analysis of power supply interruption consequences

B.V. Papkov<sup>1</sup>, V.A. Savelyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino,  
Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

### Abstract

**Background.** A lot of researchers have tried to assess the possible effects of electricity supply interruption mainly based on retrospective or expert information. But analysis of actual consequences of interruption of power supply to a particular consumer is a separate problem. As the technological complexity of power production increases, solving this problem can help objectively assess reliability and damage indicators minimizing potential and actual consequences.

**Materials and methods.** The problem solution is based on a detailed study of technological, regulatory and expert documentation of the industry under consideration. The main factors that determine reliability of electricity supply to a particular consumer have been identified based on the systematic approach.

**Results.** By analyzing operation of the automatic regulatory and control equipment, availability of reserves, structure and mode of power supply circuits we have identified operation specifics of a particular consumer and disadvantages of the original project. It has been shown that the effectiveness of decisions taken to assess indicators of power supply reliability, and engineering and economic consequences of sudden power failure depends on completeness, accuracy and timeliness of the information such decisions are based on. A detailed analysis of the effects of power interruptions in conditions of incomplete, fuzzy and uncertain technical and economic information enabled us to formulate proposals for the evaluation of actual consequences of failures in consumer power systems.

**Conclusions.** It is possible to increase reliability of power supply and to minimize (or eliminate) consequences of sudden interruptions of power supply to consumers by introducing active-adaptive systems of power supply mode and production process automatic control.

**Key words:** power supply, system approach, raw information, reliability, damages from power supply interruption, automation.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.046-050

**Введение.** Основная задача обеспечения надежности электроэнергетических систем

(ЭЭС) – снабжение потребителей электроэнергией в нужном количестве и при надлежащем

качестве [1]. Нарушения нормального режима электроснабжения потребителей могут привести к значительному технико-экономическому и социальному ущербу [2, 3]. В самом общем виде понятие «ущерб» представляет стоимостное выражение реакции потребителей электроэнергии и смежных систем на нарушение функциональных режимов связей, объединяющих эти системы с системой энергетики [4–10]. Ущерб может быть соизмерим с национальными бедствиями (аварии на ЛЭП и подстанциях 2003 г. в США и Канаде; 2003 г. в Италии; 2005 г. в Москве, Калужской и Тульской областях) и бедствиями мирового масштаба (АЭС Чернобыль, 1986 г.). Возможные последствия ненадежности становятся все более тяжелыми в связи с увеличением сложности и возрастанием угроз опасности производственных процессов при внезапных нарушениях электроснабжения. В этой связи требуется постоянное совершенствование методов прогнозирования развития, проектирования, строительства, монтажа, эксплуатации и диагностики систем электроснабжения (СЭС) потребителей, позволяющих полнее учитывать надежность, наиболее экономно расходовать выделяемые на ее обеспечение средства и минимизировать возможные и фактические последствия.

**Состояние вопроса.** Надежность электроснабжения конкретного потребителя зависит от многих факторов [5, 9], главными из которых являются:

- обеспечение ЭЭС показателей надежности внешней СЭС, требуемых потребителю в зависимости от особенностей его технологического процесса;

- наличие (при необходимости) независимых источников питания ответственных потребителей;

- возможность управления режимом электропотребления при плановых (неплановых) изменениях режима ЭЭС;

- возможность управления режимом электропотребления при плановых (неплановых) изменениях режима производства продукции;

- наличие автоматизированных средств оперативного контроля и управления режимами электроснабжения и электропотребления в нормальных и аварийных режимах;

- наличие современных средств релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА).

Известны различные средства РЗ и ПА, с помощью которых повышается надежность, ликвидируется или предотвращается развитие аварийных ситуаций. К ним относятся: все виды РЗ от коротких замыканий; автоматическое повторное включение (АПВ); автоматический ввод резерва (АВР); автоматическое регулирование возбуждения (АРВ); автоматическая

частотная разгрузка (АЧР); автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ); автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР); автоматическая синхронизация генераторов; система автоматического отключения нагрузки (САОН) и т.д. Особое место в задачах обеспечения надежности занимает автоматика самозапуска ответственных электродвигателей.

Наряду с перечисленными средствами РЗ и ПА повышения надежности большое значение приобретают такие мероприятия, как внедрение автоматизированных систем контроля и управления электроснабжением (АСКУЭ) и автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ) [11]; резервирование генерирующей мощности, систем передачи, преобразования и распределения электроэнергии; увеличение пропускной способности ЛЭП, трансформаторов.

Принятие решения о резервировании систем и элементов энергоснабжения большого количества потребителей связано со значительными материальными затратами, что должно быть надлежащим образом обосновано. Оценив ущерб, нанесенный потребителям перерывом электроснабжения, ущерб, связанный с аварийным ремонтом и восстановлением технологического процесса, а также расходы на повышение надежности, можно ставить вопрос об оптимальном уровне надежности внешнего и внутреннего электроснабжения, надежности электроэнергетического и технологического оборудования производственных и вспомогательных установок и систем.

Современный технический прогресс способствовал созданию структурно сложных технических систем, под которыми понимаются производственно-технологические комплексы промышленных предприятий и системы их электроснабжения. К методам оценки показателей надежности электроснабжения таких потребителей предъявляются повышенные требования и уделяется большое внимание исследователей, проектировщиков, эксплуатационного персонала и административных органов управления:

- проявляются коммерческие требования к режиму электроснабжения и могут вводиться ограничения на изменение технологии производства, что снижает надежность и управляемость СЭС;

- разделяются интересы по поддержанию надежности и получению прибыли;

- возникает проблема экономического и надежного электроснабжения субабонентов;

- образуются субъекты, существенно влияющие на надежность и не отвечающие за ее обеспечение (торговые операторы);

- происходит постоянное давление рынка в целях экономии издержек, снижения всех видов резервов и запасов, наиболее полного

использования энергетического оборудования и пропускной способности сети;

- увеличивается количество «узких мест» в системе передачи электроэнергии вследствие изменения распределения и направления потоков мощности, что стимулируется свободной торговлей электроэнергией.

Закон «Об электроэнергетике» устанавливает основные положения защиты потребителей от не предусмотренных законодательством нарушений электроснабжения со стороны рынка при проявлении различных видов его неустойчивости. В соответствии с концепцией обеспечения надежности в электроэнергетике [1], она не может быть абсолютной и должна рассматриваться как некоторый конечный комплексный ресурс. Требования или запросы потребителей по обеспечению того или иного уровня надежности формируют спрос на этот ресурс. При этом потребители сами выбирают необходимый уровень надежности из предоставляемого «меню» с соответствующей ценой. Это позволит избежать перекрестного субсидирования за счет перераспределения оплаты в соответствии с выбранными уровнями надежности [4].

Следует отметить, что качество принимаемых решений в значительной степени зависит от полноты, точности и своевременности берущейся за основу информации. Она никогда не бывает абсолютно точной и достаточной даже только по той причине, что для принятия решения, ориентированного на будущее, возможны использование лишь ограниченного объема ретроспективных данных и учет только настоящего состояния контролируемого объекта. Даже при полном отсутствии ретроспективной информации об условиях функционирования высоконадежных структурно сложных систем в экстремальных ситуациях очевидна ценность сравнительных расчетов, так как они дают возможность получить данные для дальнейшего взаимодействия с энергоснабжающими организациями.

**Анализ фактических последствий внезапного нарушения электроснабжения.** В большинстве публикаций, связанных с оценкой последствий внезапных нарушений электроснабжения потребителей, рассматриваются модели расчета ущерба и его количественные характеристики, полученные на основе нормативной документации, информации от экспертов и (или) из имеющихся справочных данных [2, 3, 6, 8, 9]. Доступ аналитика к фактическим данным о последствиях нарушений электроснабжения бывает практически закрыт по экономическим, коммерческим, юридическим, экологическим и даже социальным соображениям. Однако фактическая объективная информация об отключениях даже отдельных электроприемников может послужить основой

повышения надежности и эффективности функционирования СЭС в целом.

В качестве примера рассмотрим случай многократного кратковременного (до 15 секунд) отключения одной из питающих предприятие ЛЭП, что привело к сбоям в работе всех систем охлаждения нагревательной печи и возникновению общих и локальных перегревов ее оборудования. В результате этих нарушений кроме полного отключения основного оборудования печи отключились контрольные и управляющие системы вентиляторов, системы воздушного охлаждения, системы оборотного водяного охлаждения печи. Последствия аварийной ситуации были успешно устранены оперативным электротехническим и технологическим персоналом за 10–15 минут путем переключения управления процессом производства в «ручной» режим.

Через 4 часа произошло повторное отключение ЛЭП длительностью 15 минут, затем, через час, – третье, той же длительности, и еще через час – четвертое, длившееся около 1 часа.

Следствием этих отключений был выход горячего продукта из печи, разрушение им кладки аварийного бассейна и возникновение пожара, приведшего к повреждению основного технологического оборудования. Причиненный ущерб оценен в 60 млн руб.

Детальный анализ последствий описанной ситуации позволил установить следующее.

1. В соответствии с договором оказания услуг по передаче электрической энергии «осуществлять передачу электрической энергии в соответствии с согласованной категорией», можно утверждать, что в договоре отсутствуют обоснование категории электроснабжения нагревательной печи (по действующим ПУЭ) и параметры допустимой длительности перерыва электроснабжения для данного технологического процесса. С другой стороны, в акте согласования аварийной и технологической брони электроснабжения потребителя электрической энергии (основного абонента с субабонентами) отмечено, что время (длительность) допустимого перерыва электроснабжения – 1 час. Такое несоответствие уже вызывает вопросы при предъявлении претензий к энергоснабжающей организации о возмещении возникшего ущерба.

2. Согласно представленным для анализа документам (стандарт предприятия «Действия в нестандартных ситуациях»; договор оказания услуг по передаче электрической энергии; акт о пожаре; акт расследования причин аварии; техническое заключение судебно-экспертного учреждения), проект системы электроснабжения нагревательной печи лишь формально учитывал ситуацию отключения внешнего электроснабжения. Имеющийся автономный источник питания – дизель-

генераторная электростанция (ДЭС), мощность которой должна была бы быть достаточной для обеспечения (завершения) процесса производства и в анализируемых условиях нарушения электроснабжения должна была бы обеспечить питание электродвигателей системы охлаждения печи, – не обеспечила их успешного самозапуска. Известно, что длительность успешного самозапуска лежит в пределах нескольких секунд, а пуск ДЭС по технологическому регламенту занимал около 30 минут. Поэтому очевидно, что реальные последствия конкретного нарушения электроснабжения (выход продукта из объема печи, разрушение кладки, пожар) свидетельствуют о том, что максимальная длительность перерыва электроснабжения двигателей системы охлаждения печи должна быть существенно меньше длительности нормативного запуска ДЭС. Кроме того, следует учитывать, что токи самозапуска электродвигателей существенно превышают номинальные токи. Поэтому мощность автономного источника должна соответствовать пусковому режиму, определяющемуся суммой пусковых токов электродвигателей системы охлаждения печи. На основании изложенного очевидно, что условиями технологических регламентов нагревательной печи не были полностью учтены особенности существующей схемы СЭС и условия безаварийного завершения технологического процесса. Следовательно, системы АВР и самозапуска электродвигателей системы охлаждения печи не могли быть эффективными.

3. Оценку категории электроснабжения электроприемников охлаждения печи, обоснование необходимости горячего резерва автономного источника питания и решение вопросов самозапуска ответственных электродвигателей необходимо было произвести еще на этапе проектирования СЭС. В процессе относительно длительной эксплуатации анализируемой печи электротехнический и технологический персонал, имеющий достаточную для этого квалификацию, мог заметить и учесть недостатки проекта. При наличии и успешном срабатывании системы самозапуска электродвигателей, питающих систему охлаждения печи, наличии и успешном срабатывании системы АВР, своевременной подаче напряжения от ДЭС необходимой мощности (или другого резервного источника, находящегося в горячем резерве) в рассматриваемой ситуации сбоя в работе всех систем охлаждения печи и последовавшего за этими событиями пожара не должно было произойти.

### Заключение

Существующие разработки по оценке ущерба позволяют всесторонне оценить составляющие и суммарный ущерб потребите-

лей, вызванных отключением как отдельных электроприемников, так и производственных объектов в целом. Повышение уровня надежности электроснабжения, минимизация (или исключение) последствий внезапных нарушений электроснабжения потребителей требуют перехода к активно-адаптивным системам автоматизированного управления режимами электроснабжения и технологическим процессом производства. Объективный анализ последствий нарушений электроснабжения требует наличия достоверной технико-экономической информации, которая в современных условиях функционирования ряда конкретных производств часто бывает неполной, неопределенной, а в отдельных случаях просто скрывается по финансовым, корпоративным или каким-либо другим обстоятельствам.

### Список литературы

1. **Концепция** обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалев, Ю.Н. Кучеров и др. – М.: ООО ИД «Энергия», 2013. – 304 с.
2. **Эдельман В.И.** Надежность технических систем: экономическая оценка. – М.: Экономика, 1998. – 151 с.
3. **Надежность** систем энергетики и их оборудования: справочник: в 4 т. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем / под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
4. **Куликов А.Л., Папков Б.В., Шарыгин М.В.** Анализ и оценка последствий отключения потребителей электроэнергии. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2014. – 84 с. [Библиотека электротехника, прил. к журналу «Энергетик». Вып. 8(188)].
5. **Папков Б.В., Куликов А.Л.** Основы теории систем для электроэнергетиков / под ред. Н.И. Воропая. – Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2011. – 456 с.
6. **Китушин В.Г.** Надежность энергетических систем. Ч. 1. Теоретические основы: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с.
7. **Гук Ю.Б.** Теория надежности в электроэнергетике: учеб. пособие. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 208 с.
8. **Михайлов В.В.** Тарифы и режимы электропотребления. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
9. **Непомнящий В.А.** Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 188 с.
10. **Надежность** систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения / А.Ф. Дьяков, В.А. Стенников, С.М. Сендеров и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 214 с.
11. **Савельев В.А., Зыков А.В., Лушников А.М.** Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). – Иваново, 2004. – 132 с.

### References

1. Voropay, N.I., Kovalev, G.F., Kucherov, Yu.N. *Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike* [Reliability concept in electrical power engineering]. Moscow, ООО ИД «Энергия», 2013. 304 p.
2. Edel'man, V.I. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: ekonomicheskaya otsenka* [Reliability of engineering systems: economic assessment]. Moscow, Ekonomika, 1998. 151 p.
3. Rozanov, M.N. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya: spravochnik v 4 t., t. 2. Nadezhnost' elektroenergeticheskikh system* [Reliability of power supply systems and their equipment: in 4 vol. Vol. 2]. Moscow, Energoatomizdat, 2000. 568 p.

4. Kulikov, A.L., Papkov, B.V., Sharygin, M.V. *Analiz i otsenka posledstviy otklyucheniya potrebiteley elektroenergii* [Analysis and assessment of consumer power supply interruption consequences]. Moscow, NTF «Energoprogress», 2014. 84 p.

5. Papkov, B.V., Kulikov, A.L. *Osnovy teorii sistem dlya elektroenergetikov* [Basic system theory for power engineers]. N. Novgorod, Izdatel'stvo VVAGS, 2011. 456 p.

6. Kitushin, V.G. *Nadezhnost' energeticheskikh sistem. Ch. 1. Teoreticheskie osnovy* [Reliability of power systems. Part 1. Basic theory: a study guide]. Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2003. 256 p.

7. Gyk, Yu.B. *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike* [Theory of reliability in electrical power engineering: a study guide]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1990. 208 p.

8. Mikhailov, V.V. *Tarif i rezhimy elektropotrebleniya* [Power consumption rates and modes]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 216 p.

9. Nepomnyashchy, V.A. *Ekonomicheskie poteri ot narusheniy elektrosnabzheniya potrebiteley* [Economic losses from consumer power supply interruption]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 188 p.

10. Dyakov, A.F., Stennikov, V.A., Senderov, S.M. *Nadezhnost' sistem energetiki: problemy, modeli i metody ikh resheniya* [Power supply systems reliability: problems, and models and methods of their solution]. Novosibirsk, Nauka, 2014. 214 p.

11. Savelyev, V.A., Zykov, A.V., Lushnikov, A.M. *Avtomatizirovannye informatsionno-izmeritel'nye sistemy kommercheskogo ucheta elektricheskoy energii (moshchnosti)* [Automated data-measuring systems of electric power fiscal metering]. Ivanovo, 2004. 132 p.

*Папков Борис Васильевич,*

ГБОУВПО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,

доктор технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации,

e-mail: boris.papkov@gmail.com

*Савельев Виталий Андреевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,

e-mail: savelev@esde.ispu.ru