

33. The Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP): «Wholesale Electricity Market Design». Washington, DC: World Bank. 2022. 92 p. URL: <https://clck.ru/3ASEca>.

34. *Regulated & Deregulated Energy Markets* // Information Forecast. 2024. URL: <https://clck.ru/3ASEfC>.

35. *Беляев Л. С.* Проблемы электроэнергетического рынка. Новосибирск: Наука, 2009. 296 с.

36. *Smil V.* Distributed generations and megacities // IEEE Power and Energy Magazine. 2019. Vol. 17. No. 2. P. 37 – 41.

37. *Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources.* Power system opportunities and best practices. Paris: IEA, 2022. 116 p.

38. *Global Distributed Energy Generation Market 2023 — 2032* // Custom Market Insights, October 2022. URL: <https://clck.ru/3ASEhc>.

39. *Илюшин П. В.* Развитие распределенных энергетических ресурсов в перспективе до 2050 г. в России: проблемные вопросы и пути их решения // В сб. «15 лет Научно-техническому совету Единой энергетической системы. Перспективы развития энергетики России до 2050 года: проблемы и пути их решения»; отв. ред. Н. Д. Роголев. М.: Изд-во МЭИ, 2022. С. 105 – 130. URL: <https://www.nts-ees.ru/assets/doc/p/monograph-2022-2.pdf>.

40. *Sidorov D.* Toward Zero-Emission Hybrid AC / DC Power Systems with Renewable Energy Sources and Storages: A Case Study from Lake Baikal Region / D. Sidorov, D. Panasetky, N. Tomin, et al. // Energies. 2020. Vol. 13. No. 5. P. 2 – 26.

41. *Microgrids — What Are They and How Do They Work?* // N-Sci Technologies, 08-11-2019. URL: <https://nsci.ca/2019/11/08/microgrids-what-are-they-and-how-do-they-work/>.

42. *Unlocking Smart Grid Opportunities in Emerging Markets and Developing Economies.* Paris: IEA, 2023. 107 p.

43. *Teotia F., Bhakar R.* Local Energy Markets: Concept, Design and Operation // IEEE. Proc. of 2019 19th National Power Systems Conference, IIT Bhubaneswar, December 19 – 21, 2016. 6 p. URL: <http://www.iitk.ac.in/npsc/Papers/NPSC2016/1570294053.pdf>.

44. *Martini P. D.* Operational coordination architecture: New models and approaches // IEEE Power and Energy Magazine. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 29 – 39.

45. *Kristov L.* The bottom-up (r)evolution of the electric power system: The pathway to integrated-decentralized system // IEEE Power and Energy Magazine. 2019. Vol. 17. No. 2. P. 42 – 49.

46. *Наумов В. А., Матисон В. А.* От автоматизированной электроэнергетики к интернету энергии. // Energybase.ru, 30-09-2019. URL: <https://clck.ru/3ASEqG>.

47. *Muhanji S. O., Schoonenberg W. C. H., Farid A. M.* Transforming the grid's architecture. Enterprise control, the energy internet of things, and heterofunctional graph theory // IEEE Power and Energy Magazine. 2019. Vol. 17. No. 5. P. 71 – 81.

DOI: 10.34831/EP.2024.13.86.003

УДК 621.3.051

Системный подход к обеспечению качества электроэнергии при её производстве, передаче, распределении и потреблении

ВОРОТНИЦКИЙ В. Э., доктор техн. наук

АО «НТЦ Россети ФСК ЕЭС», Москва

vve46@yandex.ru

ЛАЗАРЕВ Г. Б., канд. техн. наук

ООО «Инженерный центр «ЭНЭЛ», Москва

КОВЕРНИКОВА Л. И., канд. техн. наук

ИСЭМ СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

ЧЕРНОВ Д. В.

ООО ЧКД ЭЛЕКТРОПРОМ

119435, Москва, Большой Саввинский пер., 11



В. Э. Воротницкий



Г. Б. Лазарев



Л. И. Коверникова



Д. В. Чернов

На основе анализа действующих в России нормативных документов показано, что они требуют доработки в части конкретизации требований к организации взаимодействия, распределению ответственности субъектов электроэнергетики и мотивации их персонала, стимулированию «искажающих» потребителей по внедрению мероприятий в области обеспечения качества электроэнергии (КЭ). Перечислены основные функции участников единого процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, управления режимами работы энергосистем по контролю, анализу, выполнению нормативов и оптимизации КЭ. Приведены примеры влияния КЭ на эффективность электроснабжения потребителей, присоединённых к тяговым подстанциям Восточного полигона холдинга «Российские железные дороги». Рассмотрены современные тенденции и перспективы развития новых технологий производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, которые, с одной стороны, создают дополнительные проблемы и инициируют повышенные требования к КЭ, с другой, — предоставляют новые возможности к системному подходу к обеспечению КЭ. Показано, что только применение системного подхода позволит эффективно решить сложные комплексные задачи технологического развития электроэнергетики России и страны в целом.

Ключевые слова: электроэнергия, производство, передача, распределение, потребление, качество, эффективность.

1. Обеспечение качества электроэнергии — базовая основа технологического развития и энергетической безопасности России

Распоряжением Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р утверждена «Концепция технологического развития на период до 2030 года» (далее — Концепция). Она является основой для разработки (корректировки) и реализации государственных программ (подпрограмм) технологического развития высокотехнологичных отраслей экономики РФ, в том числе электроэнергетики. В Концепции представлены основные понятия и их определения, относящиеся к технологическому инновационному развитию. В частности, дано определе-

ние критических технологий, к которым относятся «отраслевые технологии, критически необходимые для производства важнейших видов высокотехнологичной продукции и создания высокотехнологичных сервисов, имеющих системное значение для функционирования экономики, решения социально-экономических задач и обеспечения обороны страны и безопасности государства» [1].

В Концепции также рассмотрены проблемы технологического развития РФ в текущем десятилетии, сформулированы вызовы, угрозы, этапы, принципы, цели и индикаторы этого развития на период до 2030 года. Одним из её главных принципов является системный подход [2 – 5]. Предполагается, что этот

подход в полной мере должен быть применён при разработке отраслевых программ технологического развития на долгосрочный период, в том числе программ обеспечения качества электроэнергии (КЭ).

Известно, что неудовлетворительное КЭ существует во многих регионах России, отрицательно влияет на надёжность, производительность и экономичность работы различных электроприёмников, в том числе электродвигателей станков и прочего промышленного и сельскохозяйственного оборудования, бытовой техники, на пропускную способность электрических сетей и потери электроэнергии, на точность измерительной техники, систем учёта электроэнергии, правильность работы релейной защиты и автоматики и т. п. Особое значение имеет обеспечение нормативов КЭ для электрооборудования энергоёмких добывающих и транспортных систем нефти и газа, непрерывного производства высокотехнологичной продукции. Поэтому технологии контроля, анализа и обеспечения КЭ в электрических сетях и точках поставки электроэнергии, в соответствии с установленными требованиями, без всякого сомнения, относятся к критическим и являются базовой основой технологического развития и энергетической безопасности России.

Цели статьи: обосновать необходимость системного подхода к решению проблем обеспечения КЭ как части повышения экономической эффективности передачи и распределения электроэнергии; показать новые возможности и пути реализации такого подхода с применением единых математических и информационных моделей электрических сетей и их режимов; предложить первоочередные шаги по нормативно-методическому и правовому обеспечению повышения КЭ в электроэнергетике России.

2. Краткий анализ действующих нормативных документов. Терминология

Качеством электрической энергии в мире, в том числе и в России, начали заниматься много лет назад, особенно в годы, когда электроэнергия стала полноценным товаром. Эта проблема всё больше затрагивает как конечных потребителей электроэнергии, так и электrorаспределительные компании по всему миру. Различным аспектам КЭ посвящены многочисленные диссертации, монографии, статьи в журналах, доклады в трудах конференций. Проводится множество ежегодных совещаний, круглых столов и дискуссий, а тема обеспечения нормативных значений КЭ в точках её поставки потребителям не только остаётся по-прежнему актуальной, но становится всё более острой.

В настоящее время в России действует целый ряд нормативных документов по нормам и методам испытаний на электромагнитную совместимость технических средств и по ограничениям на изменения показателей КЭ [6–11]. В 2014 году введён ГОСТ 32144–2013 по нормам КЭ в электрических сетях общего назначения [12]. В 2017 г. группой ведущих специалистов России в области КЭ выпущен сборник статей под общим названием «Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы, предложения по их решению» [13]. Этот сборник стал первым в постсоветской России со времени принятия закона РФ «Об электроэнергетике», в котором рассмотрено состояние КЭ на момент его подготовки; представлен анализ законодательно-правовой и нормативно-технической базы и опыта управления КЭ в России; даны предложения по решению имеющихся проблем. Подготовка таких сборников остаётся актуальной и сегодня.

В последние годы введено несколько законодательно-правовых и нормативно-технических документов, направленных на активизацию работ в области обеспечения КЭ. В частности, в 2021 году принято Постановление Правительства № 2425 [14], в котором указано, что электрическая энергия, подлежит обязательной сертификации на соответствие требованиям, установленным в [12].

В 2022 г. вышел приказ Минэнерго России от 18.08.2022 г. № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии» [15]. В этих Правилах, в разделе «Общие требования к организации и осуществлению эксплуатации электроустановок потребителей» указано:

– на ответственного за электрохозяйство (потребителя) должны быть возложены полномочия (наряду с целым рядом других) по «обеспечению не реже одного раза в 2 года контроля значений показателей качества электрической энергии, обусловленных работой электроустановок, в том числе путем проведения замеров таких показателей» (п. 9);

– «работа электроустановок с нелинейной, несимметричной и резкопеременной нагрузкой (в том числе дугowych электропечей, выпрямительных и сварочных установок), приводящих к нарушению требований к качеству электрической энергии в точках присоединения электроустановок к электрической сети сетевой организации, без компенсирующих устройств не допускается» (п. 22).

Из этих пунктов приказа и Правил фактически следует, что потребитель сам должен и контролировать, и обеспечивать у себя КЭ.

В том же году Комитет Государственной Думы по энергетике предложил внести изменения в Федеральный закон «Об электроэнергетике», касающиеся установления требований к качеству электрической энергии и обязанностей субъектов электроэнергетики и потребителей по их соблюдению [16]. Закон о внесении этих изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» был принят и начал действовать с 1 января 2023 года [17]. Во исполнение этого закона Минэнерго России выпустило Приказ от 28.08.2023 г. № 690 «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии» [18]. С момента вступления в действие этого приказа, изложенные в нём требования становятся не рекомендательными, а обязательными. В приказе со ссылками на основные действующие в России нормативные документы в области КЭ установлены:

– термины и определения по всем показателям качества электроэнергии (ПКЭ), к которым относятся отклонение частоты; отклонение напряжения; колебания напряжения и фликер; одиночные быстрые изменения напряжения; несинусоидальные напряжения; несимметрия напряжения в трёхфазных системах; прерывания напряжения; провалы напряжения; перенапряжения; импульсные напряжения;

– нормативные требования к допустимым значениям по всем ПКЭ;

– зоны ответственности субъектов электроэнергетики и потребителей за выполнение установленных нормативных требований к ПКЭ.

В приказе № 690, как и в других нормативных документах, отсутствует определение главного термина — «качество электроэнергии». Следует признать, что и за рубежом тоже нет единого определения этого термина. Судя по приведённому выше перечню ПКЭ, данный термин можно было бы определить как степень соответствия ПКЭ их нормативным значениям. Качество электроэнергии должно одновременно рассматриваться в виде совокупности её свойств, заданных нормируемыми ПКЭ, как товара, и в виде тех же свойств, оказывающих воздействие на надёжность и экономичность работы электрооборудования, участвующего в процессе производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

С учётом таких особенностей, качество электроэнергии, с одной стороны, должно учитываться в договорах оказания услуг купли-продажи (поставки) электроэнергии (мощности) и услуг по передаче электроэнергии, с другой, при разработке и выборе технических решений по развитию, строительству, реконструкции, модернизации, техпере-

вооружению объектов электроэнергетики, в том числе электрических сетей и систем электроснабжения потребителей электроэнергии, а также в процессе эксплуатации этих объектов и оперативного управления ими.

Что касается распределения обязанностей и зон ответственности по обеспечению КЭ, складывается впечатление, что в обоих упомянутых приказах сделана попытка переложить эту ответственность на потребителей электроэнергии. В частности, согласно приказу № 690, «сетевая организация должна обеспечивать выполнение норм качества электрической энергии в части отклонений напряжения за исключением случаев, когда отклонение от указанных норм обусловлено работой энергопринимающих устройств потребителей». Поскольку отклонение напряжения в точках поставки электроэнергии всегда обусловлено работой энергопринимающих устройств, потребители всегда должны будут обеспечивать нормы ПКЭ.

Справедливости ради, можно отметить, что ответственность за обеспечение норм КЭ в части несимметрии напряжений в трёхфазных системах напряжением ниже 1 кВ полностью возложена на сетевые организации. Однако при этом неясно, в чём эта ответственность состоит, какими средствами обеспечивается и как возмещается ущерб потребителям, если она нарушается.

Размытость, неконкретность и декларативность отдельных требований и положений некоторых нормативных документов в части распределения ответственности, отсутствие действенных стимулов для повышения КЭ, а также методов оценки экономических эффектов от повышения и ущерба от низкого КЭ не способствуют снижению накопившихся многолетних проблем с качеством электроэнергии в стране и её регионах. Это, в свою очередь, приводит к значительным ущербам у потребителей электроэнергии, которые, как известно, за всё платят, в том числе и за неудовлетворительное качество услуг по поставке электроэнергии. Многочисленные обращения потребителей в суды разных уровней с исками по возмещению ущерба от нарушений КЭ или остаются без удовлетворения, или требуют многолетних судебных разбирательств.

Более подробно основные недостатки нормативно-правовых документов в области обеспечения КЭ рассмотрены в [13, 19].

3. Функции участников процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии по управлению режимами работы энергосистем и обеспечению КЭ

Обеспечение нормативов КЭ в точках поставки её потребителям должно быть результатом тесного взаимодействия и эффективной работы всех субъектов электроэнергетики от производителей до потребителей электроэнергии. С этой целью каждый из субъектов должен выполнять свою часть возложенных на него функций, которые должны быть объединены в общую систему управления повышением экономической и энергетической эффективности электроэнергетики России. Далее перечислены лишь основные из этих функций для каждого из субъектов.

Электрические станции, участвующие в централизованном производстве электроэнергии:

- обеспечение выдачи в электрические сети заданных значений активной мощности для обеспечения баланса электроэнергии и поддержания нормативных отклонений частоты в ЕЭС;

- обеспечение выдачи в электрические сети заданных уровней реактивной мощности и уровней напряжения на шинах станций для поддержания в узлах электрических сетей и в точках поставки оптовым покупателям электроэнергии нормативных отклонений напряжения;

- обеспечение допустимых значений несинусоидальных напряжений на шинах электростанций, генерируемых электронными силовыми устройствами частотных регулируемых электроприводов и нелинейными элементами собственных нужд станций;

- оперативный мониторинг и анализ показателей КЭ в контрольных точках на шинах станций и точках поставки электроэнергии потребителям, присоединённым к этим шинам.

Магистральные электрические сети напряжением 220 кВ и выше:

- участие в формировании и финансировании схем и программ по оптимальному развитию электрических сетей, по установке регулирующих, компенсирующих, фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств на подстанциях;

- внедрение и эксплуатация компенсирующих и регулирующих устройств в соответствии с действующими нормативными требованиями, оптимизация режимов работы электрических сетей с целью повышения надёжности их работы, снижения потерь и обеспечения КЭ;

- совершенствование и развитие системы оперативного контроля, сбора и анализа информации о надёжности работы сетей, пропускной способности, технических потерях в них и ПКЭ в точ-

ках поставки электроэнергии оптовым покупателям электроэнергии.

Распределительные электрические сети напряжением 0,4 – 110 кВ:

Основные функции по обеспечению КЭ в распределительных электрических сетях практически те же, что и в магистральных. Однако их исполнение должно осуществляться с учётом следующих особенностей:

- моральный и физический износ превышает 70 % и продолжает увеличиваться, в связи с чем снижается надёжность их работы, растут частота и длительность перерывов электроснабжения потребителей и потери в сетях, снижается КЭ. Для решения этих проблем настоятельно необходимы их модернизация, реконструкция и техническое перевооружение;

- в отличие от магистральных сетей, для которых под руководством АО «СО ЕЭС» решён вопрос централизованной периодической разработки и корректировки систем и программ развития по стране в целом и регионам, в распределительных электрических сетях задачи их оптимального развития возложены на субъекты РФ, где, как правило, отсутствует соответствующий квалифицированный персонал. Институт «Сельэнергопроект», который много лет успешно решал такие задачи, имел в регионах страны свои отделения, уникальных специалистов по проектированию развития распределительных электрических сетей, ликвидирован. Также прекратил существование институт «Гипрокоммунэнерго», который занимался проектированием развития городских распределительных электрических сетей;

- в распределительных электрических сетях насчитываются миллионы точек контроля, учёта и поставки электроэнергии потребителям различных категорий, у которых достаточно сложные взаимоотношения с так называемыми «гарантирующими поставщиками» электроэнергии — энергосбытами, ничего не гарантирующими, в том числе и выполнение нормативов КЭ, но заключающими с потребителями договора энергоснабжения и получающими оплату за свои услуги по этим договорам;

- должны быть разработаны отечественные программно-аппаратные комплексы, способные обрабатывать и обобщать поступающую с точек учёта и контроля мощности и электроэнергии информация для принятия решений;

- имеющиеся в распределительных электрических сетях средства для повышения КЭ должны быть простыми в эксплуатации и окупаемыми по затратам и эффектам. Утверждённые методики расчёта затрат и эффектов в настоящее время отсутствуют;

- распределительные электрические сети постепенно превращаются в объекты с многосторонним питанием

и активными потребителями, имеющими свои распределённые и возобновляемые источники, в том числе накопители электроэнергии, предъявляющие дополнительные требования к управлению надёжностью, качеством и потерям электроэнергии (см. разд. 5).

Потребители электроэнергии:

- контроль и анализ КЭ в точках поставки электроэнергии;
- обеспечение допустимых ПКЭ во внутренних системах электроснабжения, обеспечение надёжной и экономической работы электрооборудования, находящегося в ведении и собственности потребителя;
- установка и эксплуатация регулирующих, компенсирующих, фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств с целью предотвращения отрицательного влияния работы «искажающих» электроприёмников на КЭ на шинах питающих подстанций магистральных и распределительных сетей.

Системный оператор АО «СО ЕЭС»:

- оперативно-диспетчерское управление нормальными, ремонтными, аварийными и послеаварийными режимами работы ЕЭС России;
- руководство и координация работ по созданию единой информационной модели (СІМ-модели) электрических сетей страны;
- прогнозирование электропотребления и режимов работы ЕЭС, руководство разработкой и корректировкой систем и программ развития магистральных электрических сетей;
- оптимизация режимов ЕЭС России по активной, реактивной мощности и уровням напряжения в узлах магистральных электрических сетей.

Минэнерго России:

- совершенствование и развитие нормативно-правовой базы по обеспечению КЭ в стране, в первую очередь, у потребителей электроэнергии, присоединённых как к магистральным, так и к распределительным сетям;
- координация деятельности всех участников, чёткое распределение обязанностей между ними, материальной ответственности и материальных стимулов за обеспечение КЭ;
- координация и финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок по прорывным направлениям обеспечения надёжности, КЭ и повышения экономической эффективности производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии;
- анализ, обобщение и распространение через «Российское энергетическое агентство» лучших отечественных и зарубежных практик обеспечения КЭ;
- координация, финансирование разработки, утверждение и контроль исполнения программы технологического развития отрасли на период 2030 – 2050 годы, в том числе по обес-

печению КЭ как критической технологии инновационного технологического развития страны в целом.

Очевидно, что приведённый краткий перечень функций участников по контролю, анализу и обеспечению КЭ требует уточнения, детализации и конкретизации. Особенно, если мы хотим установить не формальные, а действительные зоны ответственности субъектов электроэнергетики и потребителей за выполнение установленных нормативных требований к КЭ. Но даже и в таком предварительном объёме данный перечень свидетельствует о сложности, сложности и многоэтапности рассматриваемой задачи, эффективное решение которой требует системного подхода.

4. Влияние качества электроэнергии на эффективность электроснабжения

Многолетний опыт исследований в области влияния качества электроэнергии на надёжность и экономичность электрических сетей и электроприёмников потребителей показал, что отклонения ПКЭ от нормативных значений приводят:

- к увеличению потерь активной и реактивной мощности в воздушных и кабельных линиях передачи электроэнергии, силовых трансформаторах, электродвигателях и другом электрооборудовании;
- сокращению сроков службы электрооборудования из-за дополнительных нагревов и кратковременных сбоев в работе;
- нарушению нормальной работы: систем электроосвещения, электроприводов систем вентиляции, насосов систем тепло- и водоснабжения, транспорта нефти и газа, точной механики и робототехники, вычислительной и информационной техники, систем связи, автоматики, измерения и учёта электроэнергии и т. п.;
- росту капиталовложений в системы электроснабжения на обеспечение КЭ;
- нанесению дополнительного ущерба окружающей среде.

Существующие в настоящее время количественные оценки ущербов от низкого КЭ по перечисленным составляющим носят, как правило, частный характер, требуют уточнения и обобщения в связи с отсутствием достоверной информации и систематической работы в отрасли по оперативному мониторингу, контролю и анализу ПКЭ в узлах электрических сетей и точках поставки электроэнергии. В советский период такая работа, хоть и в неполном объёме, проводилась «Госэнергонадзором» и его подразделениями, а также Фирмой ОРГРЭС. В ходе реформирования отечественной электроэнергетики эти организации были ликвидированы,

а равнозначные им структурные подразделения не созданы.

Вместе с тем, даже выборочные работы по анализу КЭ, выполненные различными организациями в разные годы, убедительно подтверждают наличие множества нерешённых проблем, число которых продолжает нарастать.

Одним из характерных примеров нормативно-правовой неурегулированности взаимоотношений потребителей и электроснабжающих организаций в части обеспечения КЭ может служить выход из строя в апреле 2017 года из-за низкого качества электрической энергии асинхронного двигателя шаровой мельницы на золотоизвлекательной фабрике акционерного общества (АО) «Рудник Александровский» в Могочинском районе Забайкальского края [20]. В письме директора АО «Читаэнерго-сбыт» в управление Федеральной антимонопольной службы по Забайкальскому краю от 23.11.2015 г., представленном в материалах дела Арбитражного суда Забайкальского края по иску АО «Рудник Александровский» к АО «Читаэнерго-сбыт» и к ПАО «МРСК Сибири», приводятся жалобы на низкое качество электрической энергии, поступившие в АО «Читаэнерго-сбыт» в 2014 и 2015 годах от жителей города Могоча, посёлка Усть-Карска, ОАО «Прииск Усть-Кара», ООО «Тепловодоканал» и др. В 2023 году после более пяти лет разбирательств в различных судах Верховный суд РФ вынес решение об удовлетворении требований АО «Рудник Александровский» [21].

В настоящее время идёт активное обсуждение проблем, связанных с созданием Восточного полигона железных дорог на основе Транссиба и БАМа для увеличения объёма грузоперевозок. Восточный полигон пройдёт через восемь регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Масса перевезённого груза на Восточном полигоне увеличивается ежегодно на 5 % [22]. В настоящее время железная дорога в этих регионах работает с тяжёлым движением поездов массой 7100 тонн в режиме «виртуальной сцепки», когда расстояние между поездами не превышает четырёх километров. Это резко увеличивает нагрузку в электрических сетях и создаёт проблемы с КЭ, дополнительные к тем, которые уже наблюдались в течение последних 25 лет.

В 1996 – 2001 годах некоторыми организациями были выполнены измерения несинусоидальности напряжения в узлах присоединения тяговых подстанций Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) к питающей сети 110 – 220 кВ [23]. Измерения проводились на трёх участках ВСЖД суммарной протяжённостью 1600 км. На участке Лена – Таксимо нормативные значения суммарного коэффициента гармоник напряжения (K_G) для 95 % времени из-

мерений были превышены на всех тяговых подстанциях, на участке Слюдянка – Петровский Завод — на четырёх подстанциях, на участке Тайшет – Зима — на всех подстанциях. Некоторые результаты измерений, показывающие влияние тяговой нагрузки на КЭ приведены в табл. 1. Суммарный коэффициент гармоник K_U и коэффициент n -й гармонической составляющей ($K_{U(n)}$), превышающие нормативные значения, выделены жирным шрифтом.

Было бы полезно сравнить приведённые цифры с показателями качества электрической энергии в настоящее время и спрогнозировать состояние качества электрической энергии в будущем, чтобы разработать план для его поддержания на нормативном уровне. К сожалению, пока заказ на подобное рода исследования отсутствует.

Известно, что кроме несинусоидальности тяговые нагрузки железной дороги вызывают несимметрию и колебания напряжения. На заседаниях «Штаба по обеспечению безопасности электроснабжения на территории Забайкальского края» неоднократно рассматривали вопрос негативного влияния несимметрии напряжений, распространяющейся по всей электрической сети, на надёжность работы генерирующего оборудования, в первую очередь Харанорской ГРЭС. Несимметрия напряжений в электрической сети, к которой она подключена, приводит к отключению энергоблоков станции устройствами релейной защиты от токов обратной последовательности, а также к отключению нагрузки потребителей действием устройств противоаварийной автоматики.

Несимметрия напряжения в электрических сетях, питающих электрифицированную тяговую нагрузку, оказывает отрицательное влияние и на режимы работы асинхронных двигателей в системах электроснабжения нефтеперекачивающих предприятий. В частности, наблюдаются регулярные отключения

этих электродвигателей в связи со срабатыванием датчиков, реагирующих на вибрацию в подшипниках и смещение оси ротора [24], что приводит к снижению объёмов перекачки нефти и к финансовым убыткам компании «Транснефть». Компания обращалась в ОАО «РЖД» и ПАО «Россети» для решения проблемы обеспечения качества электрической энергии. ОАО «РЖД» предложил «Транснефти» оценить влияние на качество электрической энергии реактивной нагрузки нефтеперекачивающей станции. В ПАО «Россети», сославшись на действующее законодательство, посоветовали «Транснефти», как «чувствительному потребителю», установить оборудование для снижения влияния искажений на работу своих электроустановок.

Вопрос поставки качественной электрической энергии обсуждался в Минэнерго России, где заявили, что отклонения качества электрической энергии возникают при аварийных и ремонтных работах. «Системный оператор» сообщил, что под контролем Минэнерго России в ближайшие один-два года будут проведены мероприятия по повышению надёжности поставки электрической энергии. В результате этих разбирательств компания «Транснефть» осталась один на один со своими проблемами. Хотя в данном случае, их эффективное решение было бы возможным только при согласованном и заинтересованном участии всех сторон: потребителя, ПАО «Россети», АО «СО ЕЭС» с Минэнерго России во главе. Но учитывая отмеченные выше недостатки нормативной базы по КЭ, такое согласованное взаимодействие сегодня практически невозможно.

Ярким подтверждением необходимости применения системного подхода к обеспечению КЭ при её передаче и распределении является выполненная в 2018 – 2019 годах работа на основе натурных измерений токов и напряжений на ряде подстанций, направленная на

повышение надёжности и качества электроснабжения объектов ОАО «РЖД» участка 220 кВ Петровск Забайкальская — Сквородино [25]. Цель работы была связана с решением упомянутых выше проблем пониженного напряжения на шинах тяговых подстанций, несинусоидальности и несимметрии напряжения, оказывающих негативное влияние на релейную защиту и электрооборудование нефте- и газоперекачивающих станций и приводящих к частым отключениям синхронных двигателей компрессорных станций газопроводов и насосных станций нефтепроводов.

Результаты выполненных расчётов и инструментальных измерений показателей КЭ, свидетельствуют, что на шинах высокого напряжения тяговых подстанций Транссиба имели место значительные нарушения симметрии и синусоидальности напряжений. Средние за сутки значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности регулярно достигали 3 – 4 %, а максимальные — 9 %; суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения составляли 25 %, что превышает нормативные значения, установленные в [6].

Анализ результатов расчётов показателей несимметрии и отклонения напряжения в трёхфазной модели сети, выполненных в режимах зимнего и летнего максимума нагрузки на 2018 и 2023 годы при различных вариантах работы вставки постоянного тока на подстанции Могоча, позволил заключить следующее:

- основными факторами, влияющими на показатели несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 220 кВ подстанций, являются распределение тяговой (несимметричной) нагрузки вдоль подстанций транзита и удалённость подстанции от источников симметричного напряжения, которую можно оценить по величине мощности (тока) короткого замыкания на шинах 220 кВ подстанции. Влияние на отклонение напряжения на шинах 220 кВ определяется суммарным уровнем нагрузки в энергосистеме и удалённостью подстанции от источников напряжения;

- в качестве мероприятий для нормализации показателей несимметрии и отклонения напряжения в работе были рассмотрены включение вставки постоянного тока на подстанции Могоча; развитие электрических сетей и генерирующих мощностей в Забайкальской энергосистеме: сооружение двухцепных воздушных линий 220 кВ Холбон – Зилово – Могоча и Могоча – Ерофей Павлович – Сквородино и включение третьего блока на Харанорской ГРЭС; установка симметрирующих устройств — высокотехнологичных устройств компенсации реактивной мощ-

Таблица 1

Подстанция (дата измерения)	Нормативные и измеренные K_U и $K_{U(n)}$							
	K_U , %	$K_{U(n)}$, %						
		3	5	7	11	13	17	19
Таксимо (28.10.1996)	3,29	2,49	2,57	0,48	0,47	0,93	0,00	0,00
Северобайкальск (22.07.1998)	3,73	2,29	2,63	1,09	0,74	0,63	0,36	0,17
Уоян (23.07.1998)	3,39	2,45	2,46	0,49	0,87	0,39	0,29	0,31
Улькан (26.07.1998)	3,28	1,74	2,39	0,95	0,47	0,81	0,21	0,24
Мысовая (14.10.1999)	2,54	1,00	2,32	0,76	0,76	0,72	0,33	0,27
Новоильинский (14.11.1999)	2,86	2,00	2,07	0,82	1,05	0,49	0,24	0,26
Тайшет (31.05.2001)	2,12	1,21	1,58	0,73	1,40	0,77	0,22	0,17
Замзор (07.04.2001)	6,13	2,33	4,14	3,15	2,66	1,92	0,72	0,65
Нижнеудинск (10.04.2001)	5,41	2,26	2,56	2,63	4,44	1,29	0,35	0,39
Харик (13.04.2001)	3,04	1,22	1,70	2,08	0,93	1,25	0,66	0,48
Нормативные значения	2,00	1,50	1,50	1,00	1,00	0,70	0,50	0,40

ности на различных подстанциях на участке Холбон – Сквородино;

– развитие генерирующих мощностей и электрических сетей в Забайкальской энергосистеме, необходимое по условиям длительно допустимых токовых нагрузок элементов сети и условиям устойчивости, хотя и оказывает определённое положительное влияние, но не позволяет полностью решить проблему КЭ на участке Петровск-Забайкальский – Сквородино;

– для нормализации показателей несимметрии напряжения необходима установка на нескольких подстанциях симметрирующих устройств, представляющих собой пофазно-регулируемые индуктивно-ёмкостные элементы на напряжении за трансформатором.

В настоящее время при наличии утверждённых схем и программ развития энергорайонов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, перечисленные технические решения требуют безусловного уточнения. Для их последующей практической реализации необходимы совместные усилия потребителей электроэнергии, генерирующих источников, ПАО «Россети», ОАО «РЖД» с участием АО «СО ЕЭС» при общей координации Минэнерго России. Результатами такой координации должны быть определение перспективных вариантов усиления питающей электрической сети, разработка нормативных документов, стимулирующих повышение качества электроэнергии, и внедрение высокотехнологичных и энергоэффективных устройств компенсации реактивной мощности.

Примеров неудовлетворительного КЭ в стране и связанных с этим проблем, можно привести бесчисленное множество. Более подробно с ними можно ознакомиться, в частности, в [13, 24 – 29]. Все примеры с очевидностью подтверждают, что обеспечение качества электроэнергии — важнейшая государственная задача, требующая системного решения с организацией эффективного взаимодействия всех участников процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. При этом сегодня наибольшее внимание должно быть уделено КЭ на критически важных направлениях технологического развития страны, а также на уровне распределительных сетевых компаний и бытовых потребителей, где проблемы с надёжностью и качеством электроснабжения особенно острые и касаются миллионов граждан России.

5. Современные тенденции и вызовы функционирования и развития энергосистем и электрических сетей. Новые технологии и техника — новые возможности повышения эффективности передачи и распределения электроэнергии

В силу циклического развития технического прогресса мировая электроэнергетика, в том числе и Россия, находится на стадии перехода к шестому технологическому укладу, к новым технологиям производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Этот переход осуществляется по направлениям декарбонизации, децентрализации и цифровой трансформации систем электроснабжения, с активным вовлечением потребителей в управление режимами энергосистем. Все три направления имеют как весьма желательные и уже подтверждённые положительные эффекты, так и многие значительные риски и возможные негативные последствия, о которых необходимо знать, уметь их прогнозировать и предотвращать. В первую очередь, это относится к децентрализации и цифровой трансформации электроэнергетики.

Децентрализация вызвана объективным стремлением потребителей уменьшить зависимость надёжности электроснабжения и тарифов на электроэнергию от её централизованной передачи по электрическим сетям. Для этого всё шире используются распределённая генерация (РГ), возобновляемые источники энергии (ВИЭ), накопители электроэнергии. Мировой рынок РГ растёт активными темпами 6–9% в год. Их внедрение из политической постепенно превращается в технико-экономическую задачу. Стоимость выработки 1 кВт·ч электроэнергии на солнечных и ветряных электростанциях в мире постоянно снижается [5].

С расширением объёмов внедрения объектов РГ и ВИЭ появляются новые объекты управления, такие как виртуальные электростанции, активные потребители, агрегаторы, накопители электроэнергии, гибридные системы, локальные миниэнергосистемы, микросети, микрогенерация и т. п. Всё это требует новых подходов к комплексному совместному управлению режимами их работы, в том числе к повышенному вниманию к КЭ.

Увеличение доли РГ и погодозависимых ВИЭ в общей структуре генерирующих источников приводит к росту неравномерности как выработки, так и потребления электроэнергии. Особенно остро такая проблема ощущается в изолированных, островных энергосистемах, получающих всё большее развитие в удалённых районах страны. Это значительно усложняет управление режимами работы энергосистем, множеством разнородных объектов РГ

и с использованием ВИЭ, обеспечением балансов мощности между производством и потреблением, надёжностью и качеством электроснабжения потребителей в нормальных и аварийных режимах. С этими проблемами уже напрямую столкнулся ряд зарубежных стран, у которых доля РГ и объектов на основе ВИЭ уже составляет 40 и более процентов суммарной установленной мощности электростанций. Вследствие влияния погодных условий возникают недопустимые колебания напряжения и частоты, вызывающие аварийные отключения. При подключении объектов РГ и с использованием ВИЭ на параллельную работу с традиционной генерацией требуется создание принципиально новых систем автоматического управления режимами энергосистем и электрических сетей и применение современных оперативных программно-аппаратных комплексов [30]. Требуется также значительно большее участие в обеспечении баланса мощности пиковых и полупиковых электрических станций, в частности гидроаккумулирующих электростанций, маневренных газотурбинных и газопоршневых станций, накопителей электроэнергии. Всё это удорожает применяемые технические решения, отрицательно влияет на тарифы для конечных потребителей электроэнергии.

Учитывая все перечисленные сложности так называемого «энергетического перехода», к его практической реализации в каждой конкретной стране следует подходить не как к очередной технологической, экологической и политической моде, а взвешенно, на основе тщательного технико-экономического анализа и учёта её природных и экономических особенностей. Такой взвешенный подход на период до 2035 г. принят в настоящее время в России, где пока достаточно мощностей централизованного энергоснабжения и энергоресурсов для их устойчивой работы, сравнительно высока доля гидроэлектростанций и атомных электростанций. В то же время, учитывая мировые тренды на замещение углеводородной энергетики на зелёную, страна должна всё более активно двигаться и в этом направлении.

Решение многочисленных проблем, связанных с необходимостью обеспечения современных требований к надёжности, качеству и экономичности электроснабжения потребителей в новых условиях, потребовало разработки и создания новой стратегии развития энергетики, управления режимами энергосистем и сетей. В результате проведённого в ряде стран в начале XXI века глубокого и всестороннего анализа был выбран путь инновационного развития, основанный на применении цифровых технологий (цифровизации) в энергетике.

Планируется, что цифровая «интеллектуальная» электрическая сеть с использованием единого профиля информационной модели и интеллектуального учёта электроэнергии будет обеспечивать решение информационно увязанного комплекса технологических задач, включающего оперативный анализ и расчёт установившихся режимов, потерь мощности и электроэнергии в распределительной сети, оперативный мониторинг качества электроэнергии, технического состояния и автоматический расчёт показателей надёжности, выявление дефектов в сети, дистанционное управление оперативными переключениями в нормальном и аварийном режимах, в том числе из диспетчерских центров субъекта оперативно-диспетчерского управления, автоматическое регулирование напряжения в соответствии с заданными субъектом оперативно-диспетчерского управления графиками, автоматизированное снижение и восстановление нагрузки, в том числе по командам субъекта оперативно-диспетчерского управления, перераспределение нагрузки путём реконфигурации распределительной сети, сглаживание «пиков» нагрузки и соответствующее снижение технических потерь в распределительной сети, управление устранением неисправностей, самодиагностика и самовосстановление после сбоев в работе отдельных элементов, оптимальное управление распределённой малой генерацией и т. п.

Цифровое управление должно обеспечивать формирование единой цифровой информационной среды для оптимизации корпоративных процессов электросетевых компаний. В результате такая среда на практике поможет превратить энергетические системы в энергоинформационные и позволит обеспечить системный подход к управлению её функционированием и развитием, автоматизированное и автоматическое управление технологическими и бизнес-процессами, повышение их энергетической эффективности, в том числе КЭ [5, 25, 28].

С появлением новой техники и технологий, новых математических методов и алгоритмов искусственного интеллекта, многокритериальной и многофакторной оптимизации, новых программно-технических комплексов, построенных на этих методах, алгоритмах и на единых информационных моделях, появляется возможность применения комплексного подхода к повышению эффективности режимов энергосистем, электрических сетей, их функционирования и развития, в том числе к повышению КЭ. Практика показала, что результат этого повышения в условиях эксплуатации в значительной степени зависит от оперативности, точности и объективности исходной информации

о схемных и режимных параметрах, о техническом состоянии электрических сетей, балансах, качестве и потерях электроэнергии, частоте и длительности перерывов электроснабжения. Для оптимизации развития энергосистем и сетей решающее значение имеет точность прогнозирования электропотребления на среднесрочную и долгосрочную перспективу. Надёжными и достоверными источниками и средствами обработки этой информации, её использования для управления и прогнозирования, наряду с традиционными средствами телеизмерения, становятся системы интеллектуального учёта электроэнергии, программируемые логические контроллеры, синхронизированные векторные измерения, системы оперативного мониторинга надёжности и качества электроснабжения.

Новые технические средства и системы силовой электроники позволяют на более высоком уровне создавать быстродействующие статические активные-адаптивные устройства симметрирования режимов, фильтрации гармоник, компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в магистральных и распределительных электрических сетях. Применение таких быстродействующих средств и систем в сочетании с алгоритмами их интеллектуального управления становится особенно эффективным при росте объёмов внедрения объектов на основе ВИЭ, которые наблюдаются в большинстве промышленно развитых стран мира. Вместе с тем, остаются актуальными и традиционные средства компенсации реактивной мощности, в том числе конденсаторные батареи и синхронные компенсаторы. Выбор оптимальных типов таких средств, их мощности и мест установки, оптимизация развития энергосистем и электрических сетей должны основываться на современных методах сравнительного технико-экономического расчёта и анализа, в первую очередь на учёте комплексного эффекта их применения за весь жизненный цикл вновь вводимого оборудования.

В то же время цифровые технологии, как и «энергопереход», несут в себе большое число рисков. Первый из них — возможность кибератак на интеллектуальные цифровые системы управления и электрические сети, высокая вероятность создания преднамеренных системных аварий в условиях значительной доли импортного программного обеспечения, элементной базы силовой электроники, релейной защиты и автоматики.

Более подробно риски и возможные негативные влияния на КЭ рассмотрены в [31], где, в частности, отмечено, что «интеллектуальные электрические сети усиливают негативное влияние на показатели КЭ, при этом ожидается резкое

увеличение доли интергармоник в спектре тока и напряжения. Ещё одна особенность — изменение виновника ухудшения КЭ в течение суток. Как потребитель, так и генерация в течение суток могут изменять свой статус с источника искажения КЭ на потребителя гармоник и интергармоник, токов обратной и нулевой последовательности. Следовательно, по мере развития интеллектуальной сети должны возрастать требования к нормативной базе по качеству электроэнергии, к контролю КЭ. В настоящее время отсутствует координация работ по разработке и развитию интеллектуальных электрических сетей и нормированию показателей электрической энергии. Новые свойства, присущие интеллектуальным активным-адаптивным сетям, существенно ухудшают качество электрической энергии. Нормирование качества электроэнергии, как в РФ, так и за рубежом, не приспособлено к интеллектуальным электрическим сетям. Затронутые в цитате проблемы заслуживают отдельного глубокого обсуждения и решения и не являются предметом настоящей статьи.

Представляется важным, что в новых условиях подсистема управления КЭ может и должна быть частью комплексной системы повышения энергетической и экономической эффективности производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, включающей в себя обеспечение надёжности и качества электроснабжения потребителей, пропускной способности и доступности электрических сетей, снижения потерь при транспорте электроэнергии до технико-экономически обоснованного уровня.

6. Обеспечение нормированной мощности короткого замыкания — ключ к решению проблемы неудовлетворительного качества электроэнергии при слабых связях потребителей с энергосистемой

Одним из важнейших индикаторов стабильности электрической сети, определяющим надёжность и эффективность её функционирования, критерием установки определённых типов корректирующих компенсирующих устройств для обеспечения КЭ, является мощность короткого замыкания (МКЗ). Усиление электрических сетей и обеспечение нормативных ПКЭ определяется требуемым значением МКЗ на шинах присоединения искажающих нагрузок. Нормированное значение МКЗ, рекомендуемое для сетей разного класса напряжения, до настоящего времени не регламентировано. В 1980-х годах предлагалось нормировать МКЗ в сетях 6 – 35 кВ в пределах 150 – 1500 МВА, в сетях 110 – 220 кВ в пределах 5000 – 10 000 МВА. Такие рекомендации давались в тот период при выборе мест технологического присоединения

мощных нелинейных нагрузок. Представляется целесообразным для мотивации электросетевых компаний разработать рекомендации по нормированию значений МКЗ и ввести системную услугу по их поддержанию для электрических сетей 6 – 35 кВ и 110 – 220 кВ со слабыми связями с энергосистемой, а также питающих нелинейные и резкопеременные нагрузки. Решение вопроса особенно актуально в настоящее время в восточных регионах РФ, где основная магистральная электрическая сеть непосредственно связана с тяговыми подстанциями Транссиба [28, 32].

7. Предложения по совершенствованию и развитию нормативно-правовой базы

Для стимулирования обеспечения нормативных значений показателей КЭ необходимо разработать и ввести в действие целый ряд нормативных документов, удовлетворяющих современным требованиям, в том числе:

- правила присоединения «искажающих» потребителей к сети общего пользования по условиям влияния на КЭ и режима потребления реактивной мощности;

- правила применения и шкала скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за качество электроэнергии и компенсацию реактивной мощности [33, 34];

- методика определения долевого вклада «искажающих» потребителей в суммарное нарушение КЭ, размера и стоимости возмещения убытков от низкого КЭ на рынках электроэнергии;

- технический регламент «Требования к качеству электрической энергии» с формами и правилами подтверждения соответствия этим требованиям в точках поставки электроэнергии;

- правила и порядок оперативного мониторинга показателей КЭ на границах между сетевыми компаниями и потребителями (в первую очередь, в узлах присоединения к магистральным электрическим сетям оптовых потребителей электроэнергии с мощными искажающими нагрузками, в частности, тяговых подстанций ОАО «РЖД»);

- отраслевой стандарт «Методика оценки системного экономического эффекта от установки и применения управляемых средств компенсации реактивной мощности различных типов в магистральных и распределительных электрических сетях»;

- отраслевой стандарт «Методика оценки влияния батарей статических конденсаторов на уровни гармонических составляющих токов и напряжений при присоединении к магистральным и распределительным электрическим сетям, питающим мощные нелинейные нагрузки»;

- рекомендации по нормированию значений МКЗ и порядку оказания сис-

темных услуг по их поддержанию для электрических сетей 6 – 35 кВ и 110 – 220 кВ со слабыми связями с энергосистемой, а также питающих нелинейные и резкопеременные нагрузки.

Разработка и внедрение перечисленных нормативных документов и мероприятий должны быть включены в программу технологического развития Минэнерго России и ПАО «Россети» на период до 2030 года и взаимосвязаны с программами «энергоперехода» и цифровой трансформации отечественной электроэнергетики.

Выводы

1. Комплексное решение задач обеспечения качества электроэнергии, надёжности и экономичности электроснабжения, недискриминационного доступа к электрическим сетям — приоритетное направление энергетической стратегии и технологического развития России на долгосрочную перспективу, носит межотраслевой системный характер и является основой обеспечения энергетической, экономической и национальной безопасности страны.

2. Действующая в России нормативная база не в полной мере соответствует обеспечению нормативов качества электроэнергии, требует доработки и конкретизации в части чёткого распределения ответственности за обеспечение качества электроэнергии, тесного взаимодействия между всеми участниками процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

3. Совершенствование и развитие системы управления качеством электроэнергии должны быть частью программы технологического развития электроэнергетики России на период до 2030 года, направленной на повышение энергетической и экономической эффективности отрасли и страны в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция технологического развития России до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р. URL: <https://clck.ru/3ASWo7>.

2. Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. — М.: Наука, 1979. — 456 с.

3. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А. А. Макарова и Н. И. Воропая. — М.: ИНЭИ РАН, 2018. — 309 с.

4. Волков Э. П. Системные задачи функционирования и развития новой электроэнергетики России // Энергетик. 2022. № 4. С. 4 – 8.

5. Воротицкий В. Э. О системном подходе к повышению энергетической и экономической эффективности электрических сетей нового технологического уклада // Энергетик. 2022. № 4. С. 14 – 19.

6. ГОСТ 30804.3.12–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2020. — 22 с.

7. ГОСТ 30804.3.3–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2020. — 22 с.

8. ГОСТ 30804.3.11–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения при определенных условиях. Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2018. — 14 с.

9. ГОСТ Р 51317.3.4–2006 (МЭК 61000-3-4–1998). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2007. — 38 с.

10. ГОСТ 30804.3.2–2013 (IEC 61000-3-2:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2020. — 26 с.

11. ГОСТ 30804.4.7–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. — М.: Стандартинформ, 2013. — 34 с.

12. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.

13. Коверникова Л. И. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л. И. Коверникова, В. В. Суднова, Р. Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н. И. Воропай. — Новосибирск: Наука, 2017. — 219 с.

14. Постановление Правительства РФ от 23.12.2021 № 2425 «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подлежащей декларированию соответствия, внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 31 декабря

2020 г. № 2467 и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». URL: <https://clck.ru/3ASWv8>.

15. Приказ Минэнерго России от 18.08.2022 г. № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии». URL: <https://clck.ru/3ASWtF>.

16. Решение Комитета Государственной Думы по энергетике № 3.25 – 5 / 22 от 06 апреля 2022 г. URL: <https://clck.ru/3ASWvQ>.

17. Федеральный закон «Об электроэнергетике» с изменениями на 14 февраля 2024 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901856089>.

18. Приказ от 28.08.2023 г. № 690 «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии». URL: <https://clck.ru/3ASWxH>.

19. Никифоров В. В. Качество электроэнергии. Нормативно-техническое обеспечение и правовое регулирование. Современное состояние и проблемы // Neftgaz. RU. 2015. № 9. URL: <https://clck.ru/3ASWyE>.

20. Zapanov O. V., Kovernikova L. I. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine». E3S Web Conf. ENERGY-21 — Sustainable Development & Smart Management. Vol. 209. 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202020907012.

21. Электронные копии судебных актов по Руднику «Александровский» в Арбитражном суде города Чита. URL: <https://kad.arbitr.ru/Card/c3ae7f7e-476a-4066-a5b2-c300ef5caf56>.

22. Встреча с главой РЖД Олегом Белозёровым. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/73259>.

23. Гладких С. П. Вышшие гармоники в узлах присоединения тяговых подстанций (на примере Восточно-Сибирской железной дороги) / С. П. Гладких, Л. И. Коверникова, А. В. Костин, Н. И. Молин, С. С. Смирнов. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, Препринт № 3. 2002. — 59 с.

24. Силаев М. А., Тульский В. Н., Карташев И. И. Влияние быстрых изменений несимметрии напряжений на вибрационные характеристики асинхронных двигателей // Электротехника. 2014. № 6. С. 43 – 50.

25. Воротицкий В. Э., Лазарев Г. Б., Любарский Д. Р. Системный подход к обеспечению качества электроэнергии при ее передаче и распределении // В сб. тез. докл. IV Междунар. конф. «Системные исследования в энергетике», 2023. С. 214 – 216.

26. Епифанцев С. Н. Качество электроэнергии: современные требования и их обеспечение в электрических сетях железных дорог / С. Н. Епифанцев, И. В. Железенок, В. А. Овсейчук, Г. Г. Трофимов, С. В. Шимко; под ред. Г. П. Кутového. — М.: Эко-Пресс, 2014. — 264 с.

27. Аксенов В. В., Демин А. И., Чуприков В. С. Обеспечение качества электроэнергии в энергосистемах, примыкающих к Транссибу и БАМу. Опыт разработки и внедрения компенсирующих устройств // Энергетик. 2023. № 3. С. 14 – 22.

28. Воротицкий В. Э. Организация комплексного процесса управления качеством электроэнергии — приоритетная

задача энергетической стратегии развития России / В. Э. Воротицкий, Ю. А. Дементьев, Г. Б. Лазарев, Ю. Г. Шакарян // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 4(43). С. 8 – 19.

29. Карташев И. И. Управление качеством электроэнергии: учеб. пособие для вузов / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 354 с.

30. Илюшин П. В., Куликов А. Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. — Н. Новгород: Нижегородский ин-т упр. — фил. Российской акад. нар. хоз-ва и гос. службы при Президенте РФ, 2019. — 364 с.

31. Савина Н. В., Бодруг Н. С. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы //

Проблемы энергетики. 2016. № 5 – 6. С. 19 – 26.

32. Шакарян Ю. Г. Обеспечение нормированной мощности короткого замыкания — ключ к решению проблемы неудовлетворительного качества электроэнергии при слабых связях потребителей с энергосистемой / Ю. Г. Шакарян, Г. Б. Лазарев, П. В. Сокур, Ю. А. Дементьев // Энергия единой сети. 2019. № 6(49). С. 37 – 54.

33. Железко Ю. С. О совершенствовании нормативных документов, определяющих отношения энергоснабжающих организаций и потребителей в части качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности // Промышленная энергетика. 2002. № 6. С. 23 – 27.

34. Железко Ю. С. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии // Промышленная энергетика. 1991. № 8. С. 49 – 51.



О. В. Дёмина



С. Н. Найден

DOI: 10.34831/EP.2024.49.66.004

УДК 621.31:338.2:332.1

Трансформация институциональных условий на рынках электрической и тепловой энергии Дальнего Востока

ДЁМИНА О. В. канд. экон. наук; demina@ecrin.ru

НАЙДЕН С. Н., доктор экон. наук; nayden@ecrin.ru

Институт экономических исследований ДВО РАН

680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153

Описаны институциональные трансформации, определяющие условия функционирования рынков электрической и тепловой энергии на Дальнем Востоке в 1990 – 2023 г. Можно выделить следующие источники трансформаций условий функционирования рынков электрической и тепловой энергии: радикальная экономическая реформа, реформа рынка коммунальных услуг, реформа российской электроэнергетики, введение преференциальных режимов ведения экономической деятельности на территории Дальнего Востока и реформа рынка тепловой энергии. Общность институциональных условий позволяет выделить четыре периода функционирования рынков: дореформенный (1980 – 1991 гг.), экономической реформы (1992 – 1999 гг.), реформы рынка электроэнергии (2000 – 2011 гг.) и реформы рынка тепла и экономических институтов на Дальнем Востоке (2012 – 2022 гг.). Показано, что развитие рынков электрической и тепловой энергии осуществлялось в условиях разбалансированности спроса и предложения. Особенности формирования систем электро- и теплоснабжения Дальнего Востока в дореформенный период определили высокий уровень издержек энергоснабжения. В результате радикальной экономической реформы было прекращено масштабное государственное субсидирование, что привело к резкому удорожанию электрической и тепловой энергии для дальневосточных потребителей, кризису неплатежей и проблемам с финансированием. В ходе реформы рынка электроэнергии осуществлялась консолидация активов в электро- и теплоэнергетике Дальнего Востока, были сформированы отдельные сегменты рынка: неценовая зона оптового рынка и розничные рынки изолированных энергосистем. В период реформы рынка тепловой энергии и экономических институтов на Дальнем Востоке осуществляется модернизация генерирующей и сетевой инфраструктуры, обусловленная применением множества преференциальных режимов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: рынок электрической энергии, рынок тепловой энергии, институциональные трансформации, модель рынка, ценовые и неценовые зоны, Дальний Восток России.