

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.Л. Осокин

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Россия

Представлен анализ задач повышения эффективности использования электроэнергии, в том числе, в системах с распределенной генерацией и накопителями электроэнергии. Показан принцип подбора объектов, управление режимом работы которых при аварийных ситуациях в электроэнергетической системе (ЭЭС) минимизирует экономические потери.

На этапе динамического развития теории надежности систем энергетики и ее практических приложений показана необходимость и востребованность регулярных исследований систем электроэнергетического комплекса. Обоснована необходимость сохранения имеющихся возможностей ЭЭС по обеспечению надежного электроснабжения потребителей, поскольку, несмотря на усилия исследователей, вопрос об экономических принципах отбора вариантов развития ЭЭС с учетом экономической оценки надежности остается открытым и требует дальнейшей разработки.

Рассмотрены элементы оснований процесса управления надежностью и эффективностью электроснабжения на ее многоэтапной организации, где показан смысл в периодической адаптации перспективных планов к постоянно уточняемым условиям развития ЭЭС. Проведенные исследования показали зависимость того, что реальные возможности снижения нагрузок потребителей при условии сохранения выпуска продукции на запланированном (договорном) уровне не всегда перекрывают потребности ЭЭС в снижении мощности при отказах основного оборудования и позволяют перейти к их учету при обосновании принятия решений в задачах прогнозирования развития и эксплуатации современных систем электроснабжения. Обоснована необходимость принятия решений, связанных с кибербезопасностью в энергетическом секторе, из-за увеличения количества успешных кибератак злоумышленников. Показана необходимость анализа не только вертикальной иерархии, но и горизонтальных связей, которые, по сути, и формируют энергетический рынок региона.

Ключевые слова: надежность, отказ, решение по управлению режимами, уязвимость, энергетический рынок.

Для цитирования: Осокин В.Л. Проблемы оценки надежности и эффективности в современных системах электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 78-94. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_78

PROBLEMS OF RELIABILITY AND EFFICIENCY ASSESSMENT IN MODERN POWER SUPPLY SYSTEMS

V.L. Osokin

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University

Knyaginino, Russia

Abstract. An analysis of the tasks devoted to improving the efficiency of the use of electricity, including distributed generation and energy storage system is carried out. The selection principle of objects the control of operating mode of which in emergency situations in electric power system (EPS) leads to a minimum of economic losses is shown.

At the stage of dynamic development of reliability theory of energy systems and its practical applications, the necessity and demand for regular researches of electric power complex is shown. The necessity of preserving the existing EPS capabilities to ensure reliable power supply to consumers is justified. Despite the efforts of researchers, the issue of economic principles for selection of EPS development options, taking into account the economic assessment of reliability, remains open and requires further refinement.

The elements of foundation for the process of managing the reliability and efficiency of power supply at its multi-stage organization are considered, which shows the meaning in periodic adaptation of long-term plans to constantly refined conditions for the development of EPS. The conducted researches showed the dependence that the real possibilities of reducing the loads of consumers (provided that the output of products is maintained at planned (contractual) level) do not always overlap the needs of EPS in reducing power in case of failures of main equipment and allow them to be taken into account when justifying decision-making in the tasks of predicting the development and operation of modern power supply systems. The article presents the problems of load management representing the complexity of execution. The necessity of making decisions related to cybersecurity in the energy sector is justified due to increase in number of successful cyberattacks. The necessity of analyzing not only the vertical hierarchy, but also the horizontal links, which, in fact, form the energy market of the region, is shown.

Keywords: energy market, failure, mode control solution, reliability, vulnerability.

For citation: Osokin V.L. “Problems of reliability and efficiency assessment in modern power supply systems”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 78-94, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_78

I. Введение

При выработке технических решений, связанных с прогнозированием, проектированием, развитием и эксплуатацией больших технических систем, к которым, в первую очередь, относятся электроэнергетическая система (ЭЭС) и системы электроснабжения (СЭС) потребителей, приходится

учитывать, что подобные системы незамкнуты и не могут, как правило, проектироваться в целом. Их эксплуатация и развитие происходят с учетом взаимосвязей с другими энергетическими, технологическими, экологическими и социальными системами. При этом проектные решения, решения по их эксплуатации и развитию часто принимаются при недостатке, неоднозначности и неопределенности исходной информации, достоверность и точность которой не удовлетворяет современным требованиям функционирования ЭЭС и СЭС. В таких условиях классические оптимизационные расчеты нецелесообразны, так как в большинстве случаев неэффективны или невозможны. С особой остротой эти проблемы встают в задачах принятия решений с учетом надежности и эффективности работы потребителей электроэнергии.

Наиболее крупными проблемами управления надежностью в ЭЭС (СЭС), решение которых требует учета как технологических, так и экономических аспектов, являются:

- 1) принятие решений по развитию ЭЭС и СЭС потребителей с учетом фактора надежности;
- 2) принятие решений по управлению работой ЭЭС и СЭС при отказах их элементов в процессе эксплуатации;
- 3) исследование возможностей ЭЭС, СЭС и потребителей в задачах управления режимами электропотребления;
- 4) исследование уязвимостей и проблем кибербезопасности в системах ЭЭС и СЭС;
- 5) оценка критериев экономической эффективности альтернативных вариантов управления режимами при изменении структуры, иерархии, усиления экономической, социальной и политической независимости субъектов энергетического рынка при возможном несовпадении их интересов.

II. Материалы и методы

Исследования по первым двум проблемам проводятся авторскими коллективами и отдельными исследователями уже много лет, однако до сих пор они весьма актуальны. Одна из первых отечественных работ, содержащих экономическую оценку уровня надежности электроснабжения потребителей, появилась в середине 1950-х гг. [1], в ней приведены средние показатели ущерба от нарушений электроснабжения разных отраслей промышленности. После этого опубликованы многочисленные исследования, связанные с экономической оценкой последствий, возникающих при нарушениях электроснабжения, произведенной на основе отбора составляющих последствий с выделением плановых ограничений и внезапных отключений всего или части объектов потребителя [2-6].

Третья проблема во всем мире существовала и развивалась одновременно с первыми двумя, но в энергетике России она стала актуальной в 1990-х гг., когда начались изменения в социально-экономической сфере страны. Однако в связи с ее чрезвычайным значением, связанным с обеспечением всех видов безопасности государства, развитие исследований и внедрение результатов по ней пошло довольно быстрыми темпами. Появился ряд разработок и публикаций [3, 7, 8], где анализируются экономические задачи надежности систем электроснабжения (СЭС) при формировании рыночных отношений.

Четвертая из отмеченных выше проблем появилась относительно недавно и связана с обеспечением кибербезопасности ЭЭС (СЭС). Все возрастающий рост количества компьютеров, развитие информационных технологий, типа облачных систем хранения данных и вычислений, и использование их в управлении режимами генерирующих установок и потребителей приводит к появлению задач не только защиты данных и информации, но и обеспечения безопасности человека и объектов критической инфраструктуры. Возникли такие понятия как киберугроза, кибератака, кибертерроризм, кибервойна.

Пятая проблема связана с переходом к рыночной экономике, имеющей склонность на сегодняшнем этапе жертвовать интересами будущего ради прибыльных, популистских краткосрочных мероприятий, увеличивается опасность рассогласования интересов субъектов рыночных отношений с макроэкономическими и социальными целями всей системы хозяйствования. Поэтому растет роль стратегического планирования экономических эффектов надежного электроснабжения потребителей и прогнозирования состояния ЭЭС, которые должны опираться на комплекс исследований, проводимых на всех уровнях территориальной и временной иерархии. Основная цель – выявление связей систем энергетики, экономики и потребления энергии. При этом особо следует учитывать возможность изменения критериев экономической эффективности альтернативных вариантов управления энергетикой, изменения структуры и иерархии управления, усиления экономической, социальной и политической независимости субъектов энергетического рынка и возможные несовпадения их интересов.

III. Результаты и обсуждение

Развитие систем распределенной генерации (РГ) с включением в их состав возобновляемых источников энергии (ВИЭ), систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), при специфических особенностях собственников, систем коммерческого и технологического учета электроэнергии, контроля, управления, телемеханики, релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) существенно усложнили задачи принятия решений по управлению режимами ЭЭС и СЭС при отказах их элементов и необходимости

изменения структуры и конфигурации схем электроснабжения потребителей [9]. Обеспечение нормируемых показателей надежности требует контроля пропускной способности ЛЭП, ограничения перегрузок, согласования и селективности функционирования устройств РЗ и ПА [10]. Возник новый тип ЭЭС (СЭС), требующих расширения спектра услуг (резервирование, организация ремонтно-эксплуатационного обслуживания, децентрализованного управления режимом) и изменения моделей рынка. В связи с этим, оценка последствий отказов элементов электрооборудования и управления режимами СЭС еще более усложняется, так как становится необходимым учет целого ряда дополнительных факторов и показателей, влияющих на надежность элементов СЭС и источников РГ [11, 12].

В соответствии с постановкой третьей проблемы анализ экономических задач надежности СЭС показал недопустимость рассмотрения ее как замкнутой системы без учета связей с потребителями. Но поскольку адекватно учесть все реальные связи невозможно, важно правильно ввести ряд ограничений – границ рациональности, в пределах которых затухают возмущения, возникающие в ЭЭС. Это вынуждает максимально эквивалентировать и обобщать требования к надежности энергоснабжения потребителей. Но чем выше уровень иерархии решаемой задачи, тем сложнее учесть требования потребителя к надежности, с одной стороны, и тем выше затраты на повышение надежности ЭЭС – с другой.

Одна из широко применяемых во многих исследованиях [2, 6, 7, 13] методик обобщенной оценки ожидаемых потерь потребителя от недостаточного уровня надежности электроснабжения сводилась к допущению, что недополученная при возникновении дефицитов мощности в ЭЭС энергия безвозвратно потеряна и неизбежно ведет к недовыпуску продукции. Плановое хозяйство и жесткое централизованное управление распределением и потреблением энергоресурсов позволяло ориентировочно оценить такие ожидаемые потери, связанные с недополучением электроэнергии. При этом создавалась иллюзия объективности оценки потерь от недостаточного уровня надежности и возможности реализации метода приведенных затрат. При переходе к «активным» СЭС такой подход неэффективен. Системы активного потребления электроэнергии в подавляющем большинстве обладают избыточностью (структурной, нагрузочной, временной, информационной), за счет которой ликвидируется или значительно уменьшается недовыпуск продукции из-за нарушения нормального режима работы и не допускается разрыв внешних производственных связей с поставщиками сырья и потребителями готовой продукции предприятий, участвующих в процессе регулирования энергопотребления [4].

Исследования, проведенные с учетом технологических особенностей промышленных производств разных отраслей промышленности, показали,

что реальные потери (ущерб) конкретных потребителей определяются основными составляющими [14]:

- фактором внезапности нарушения электроснабжения потребителя;
- неуправляемым останом объектов производства вследствие отключения электроприемников;
- непроизводительным расходом энергоресурсов во время наладки технологического процесса после восстановления электроснабжения;
- незапланированными остановами и пуском объектов производства;
- незапланированными ремонтными работами;
- разрушением технологических связей между отключенным и другими объектами производственной системы.

Предложения по использованию агрегированных оценок последствий ненадежного энергоснабжения потребителей заключались в допущении, что состав отключаемых присоединений произволен. Это позволяло ограничиться оценкой лишь математического ожидания ущерба по совокупности питаемых потребителей. Однако объективная оценка указанных потерь по агрегированным на уровне ЭЭС моделям для совокупностей потребителей, практически не представляется возможным. Анализ имевших место аварий, сопровождающихся отключением нагрузки потребителей, и прогнозирование аналогичных ситуаций, показывает, что для недопущения нарушения устойчивости ЭЭС и полной утраты работоспособности достаточно отключать около 20 % суммарной нагрузки системы. Это обеспечивается большим количеством способов, реализация которых определяется выбором состава отключаемых присоединений. Изменение его, при сохранении величины отключаемой мощности, существенно влияет на потери потребителя, которые различаются на порядок и более. Поэтому к ликвидации возможных дефицитов в ЭЭС должна проводиться соответствующая подготовка, что позволит сократить ожидаемые потери до минимума. Разумеется, построение функции минимальных ущербов по всей совокупности потребителей для задач прогнозирования развития ЭЭС на отдаленную перспективу, не могло быть осуществлено. Поэтому и принималось допущение о произвольном составе отключаемой нагрузки.

Второй путь принятия решений при прогнозировании развития ЭЭС с учетом надежности заключается в принятии и использовании нормативных требований. При этом затраты на надежность рассматривались как один из ограничивающих факторов, влияющих на принимаемые решения [15] и максимально приближающиеся к пределу, диктуемому требованиями потребителей. Поскольку создание эффективных моделей для оценки количественных показателей нормативов для каждого потребителя практически нереально, предлагалось использование методов экспертного опроса специ-

алистов, которые в состоянии более или менее объективно судить о возможных и целесообразных значениях требуемых нормативов для совокупности потребителей. Особо отметим, что и на современном этапе вряд ли можно предложить какой-либо другой способ установления нормативных показателей надежности энергоснабжения. Однако необходимо учитывать, что эксперты, привлекаемые для выработки разрабатываемых нормативов, в настоящее время имеют значительно меньшую информированность и компетентность, чем это было ранее, поскольку возросла неопределенность технико-экономического состояния и развития как ЭЭС, так и потребителей. Поэтому разработка методических принципов решения рассматриваемых задач резко усложнилась. Это связано с непрогнозируемым изменением спроса мощности и энергии потребителями и нестационарными режимами работы ВИЭ. Кроме того, ретроспективный анализ энергопотребления в настоящее время не может обеспечить получения достоверных оценок, ожидаемых в ближайшие годы нагрузок. Аналогичная ситуация сложилась и с прогнозированием возможных ущербов как от нарушений электроснабжения, так и от принудительного управления электропотреблением.

На основании изложенного становится очевидным, что необходимо удержаться на имеющихся возможностях ЭЭС по обеспечению надежного электроснабжения потребителей. Поэтому, несмотря на усилия исследователей, вопрос об экономических принципах отбора вариантов развития ЭЭС с учетом экономической оценки надежности пока остается открытым. Реализация процесса управления надежностью и эффективностью электроснабжения должна основываться на его многоэтапной организации. Смысл ее состоит в периодической адаптации перспективных планов к постоянно уточняемым условиям развития ЭЭС (СЭС). Таким образом, все предлагаемые мероприятия по перспективам развития ЭЭС должны многократно фильтроваться с точки зрения влияния на изменение показателей ее надежности и эффективности в ближайшей и отдаленной перспективе, пересматриваться по составу и корректироваться по срокам реализации по мере уточнения условий их осуществления [16].

Другая задача связана с возможным нарушением баланса между генерируемой и потребляемой мощностью при отказах элементов и объектов ЭЭС. Известно, что задержка с восстановлением соответствия выработки и потребления мощности приводит к нарушению устойчивости, возможному каскадному развитию аварии, т.е. «развалу» системы и, как следствие, полному нарушению нормального хода технологического процесса и жизнедеятельности всей совокупности питаемых потребителей. Единственный путь избежать столь катастрофических последствий – отключить часть нагрузок и (или) выделить часть генерирующих источников. Поэтому обоснован-

ность создания и использования АВР, АПВ [10], САОН, АЧР, графиков отключений и ограничений в ЭЭС [17] не вызывает сомнения. Естественно также стремление оперативных служб ЭЭС решать задачи отключения присоединений наиболее удобным способом, т. е. отключением минимального числа наиболее доступных присоединений. Разумеется, это может приводить к глубокому разрушению систем потребления вплоть до возникновения опасности жизнеобеспечения, что, естественно, должно быть оценено в какой-либо количественной форме. Однако, как в директивных указаниях [18], так и в ряде литературных источников отмечается, что выбор отключаемых присоединений должен обеспечивать минимальный ущерб. Потребителям предлагается выявлять электроприемники, которые необходимы для завершения технологического процесса (технологическая броня), и электроприемники, внезапное отключение которых может сопровождаться катастрофическими последствиями (аварийная броня). При этом считается вполне допустимым отключение всей нагрузки потребителя, за исключением аварийной, а в критических ситуациях – и технологической брони. Вместе с тем, проведенными исследованиями [17, 19] установлено, что и в задачах сохранения живучести ЭЭС при крупных системных авариях, связанных с отключением большого количества потребителей возможны рациональные решения, принятие которых позволяет минимизировать возможные технико-экономические последствия. Одним из условий допустимости ожидаемых или возможных вариантов отключения потребителей должна быть минимизация вероятности разрыва внешних производственно-технологических связей.

Для объективной оценки последствий нарушений энергоснабжения наиболее часто требуются сведения о последствиях частичных нарушений электроснабжения потребителей, а также о влиянии нарушений электроснабжения на работу участков производства, связанных с отключенным единством технологического процесса. Такие методики были представлены рядом исследователей [2, 13, 14, 17]. Разработка их велась в двух направлениях:

- моделирование последствий для конкретных видов производства и отдельных отраслей промышленности;
- создание универсальных моделей общих закономерностей влияния нарушений электроснабжения на ход производственного процесса потребителей.

При этом принятие решений по управлению энергопотреблением сопровождается появлением возможности повысить достоверность прогнозируемых показателей за счет увеличения объема используемой информации что обеспечивает большую уверенность в правомерности принимаемых ре-

шений по ликвидации дефицитов в ЭЭС за счет ограниченной группы различных потребителей. Для определения экономических последствий нарушений электроснабжения необходимо построение экономико-математических моделей срыва производственного процесса с учетом влияния вероятностных факторов и неполноты исходной информации на конечный результат расчета – величину ожидаемого ущерба. Проблема исследования ущерба формулируется как:

- задача априорного анализа, которая заключается в оценке ожидаемых последствий нарушения электроснабжения и их составляющих;
- задача синтеза, заключающаяся в минимизации ущерба за счет правильной организации работы потребителя и энергоснабжающей организации.

Результаты проведенных исследований показали, что реальные возможности снижения нагрузок потребителей, при условии сохранения выпуска продукции на запланированном (договорном) уровне, во многих случаях перекрывают потребности ЭЭС в снижении мощности при отказах основного оборудования и позволяют перейти к их учету при обосновании принятия решений в задачах прогнозирования развития и эксплуатации современных СЭС. Естественно, что разрешение поставленных проблем управления нагрузкой представляет большие трудности из-за недостатка исходной информации о параметрах, входящих в расчетные выражения для вычисления составляющих и суммарной величины ожидаемого ущерба [3, 7, 14]. Это связано с многообразием и особенностями технологических процессов производства, пренебрежением к метрологическому обеспечению. Поэтому технологическая и экономико-математическая сложность и практическое отсутствие заинтересованности в управлении электропотреблением как энергоснабжающей, так и потребляющих систем, пока не создают условий для ее успешного решения.

Определенные сложности связаны с несогласованностью интересов ЭЭС и потребителей. Поскольку основные потери несет потребитель, у ЭЭС не было прямой заинтересованности в их снижении. Кроме того, руководство ЭЭС опасалось, что выявление сведений об ущербах приведет к требованиям потребителей максимально возместить их потери [20]. Руководство систем, потребляющих энергию, также не было заинтересовано в выявлении экономических и технических возможностей снижения потребляемой мощности. По их мнению, решение этой задачи позволяло диспетчерским службам ЭЭС более часто, более длительно и более глубоко отключать нагрузку потребителя. Поскольку возникновение рассматриваемых видов ущерба происходит по вине ЭЭС, потребитель не испытывал острой необходимости в его сокращении. Оплата труда как в ЭЭС, так и у потребителей с возникающим ущербом не увязывалась. И хотя работы, направленные на

выработку решений по ликвидации возможных дефицитов мощности в ЭЭС велись в ряде научных коллективов [2, 3, 6, 14, 21], их практическая реализация была недопустимо низкой. Она тормозилась отсутствием гарантий со стороны ЭЭС на показатели надежности энергоснабжения, при этом потребитель не мог предъявить практически никаких претензий, а ЭЭС вправе была принимать любые решения, ущемляющие потребителей. Расширение хозяйственной самостоятельности предприятий, развитие систем РГ с учетом ВИЭ и СНЭЭ обусловило необходимость создания эффективных систем технико-экономической поддержки решений по обеспечению их надежного функционирования. Полномасштабное использование регулировочной способности потребителей требует изменения существующей системы взаимоотношений между энергопредприятием-поставщиком и предприятием-потребителем энергии на основе рыночных отношений. Степень участия потребителей в управлении режимом электропотребления должна задаваться не директивно, а приниматься добровольно, самими потребителями, на основе анализа их технической возможности и сравнения увеличения издержек производства при регулировании с экономическими льготами, предлагаемыми ЭЭС [22].

На основании формулировки четвертой проблемы очевидно, что системообразующая отрасль экономики и жизнеобеспечивающая роль электроэнергетики, развитие цифровых технологий, интеллектуальных сетей (*Smart Grid*) и устройств делают энергетику привлекательной мишенью для атак со стороны террористов, хакеров и других злоумышленников. На данном этапе развития ЭЭЭ (СЭС) компьютерные технологии контроля, управления, измерений и передачи данных, используемые для мониторинга режимов и управления ими, хотя и имеют целый ряд преимуществ перед традиционными технологиями, увеличивают и их уязвимость при кибератаках.

Решение проблем, связанных с кибербезопасностью в энергетическом секторе, важно не только для энергетической безопасности, но и для стабильного состояния экономики страны, так как количество успешных кибератак злоумышленников год от года возрастает [23]. Киберугрозы стали одним из приоритетов при решении задач проектирования и эксплуатации как ЭЭС (СЭС), в том числе, систем РГ, т. е. на всех иерархических и территориальных уровнях их функционирования. Переход к современным ИЭС ААС создает условия создания и развития систем РГ с относительно большим количеством, различающихся по номенклатуре, мощности и параметрам ВИЭ и СНЭЭ. Этот процесс сопровождается широким внедрением микропроцессорных систем защиты, управления, контроля и связи в электрических сетях разных иерархических и территориальных уровней; ожидается рост киберугроз для объектов электроэнергетики – «мишеней» воз-

возможных кибератак. Очевидно, что энергетический сектор должен, по возможности, оценить уязвимости и киберриски по всей цепи электроснабжения, улучшая защиту объектов ЭЭС (СЭС) и предотвращая возможность каскадного развития аварийной ситуации, вызванной преднамеренным сбоем в одном из элементов.

Таким образом, построение эффективной системы обеспечения кибербезопасности – сложный, многоступенчатый и достаточно длительный процесс, связанный с выявлением «критических точек» как в технологических системах производства, передачи и распределения электроэнергии, так в инфраструктуре энергообъекта. В разработке систем обеспечения кибербезопасности и выборе средств защиты элементов, объектов и подсистем электроэнергетики должно быть учтено, что основным активом защищаемого объекта является не только информация, но и технологический процесс потребителя. И речь при этом идет даже не столько о защите от утечек информации, сколько о защите от нарушений (срывов) технологического процесса при возможной реализации киберугроз.

На основании изложенного очевидно, что научно-исследовательские и проектные организации, энергетические компании и потребители должны постоянно контролировать состояние энергообъекта, разрабатывая и внедряя элементы безопасности, так как кибератаки представляют угрозу, соизмеримую с техногенными катастрофами (наводнениями, пожарами, внезапными полными погашениями потребителей, экстремальными погодными условиями). Разработка и принятие общих и индивидуальных нормативов кибербезопасности может помочь локализовать ключевые области управления киберрисками и выявить системы и их элементы, которые должны быть защищены любой ценой.

Постановка пятой проблемы приводит к необходимости анализа не только вертикальной иерархии, но и горизонтальных связей, которые, по сути, и формируют энергетический рынок региона, включающий:

- выработку законодательных актов, регулирующих и ограничивающих действие рыночных механизмов (нормативы, цены, антимонопольные меры);
- экономическое воздействие на производителей и потребителей энергии (тарифы, налоги, кредиты, дотирование).

Рыночная экономика в энергетике выдвигает ряд задач, связанных с совершенствованием учета экономических аспектов надежности. Соответственно, определен круг задач, требующих объективных оценок последствий возможных изменений режимов электроснабжения и энергопотребления, включающих:

- разработку условий договорных отношений производителей, продавцов и потребителей энергии;

- поиск путей и методов энергосбережения на всех уровнях производства, распределения, преобразования и потребления энергии;
- разработку условий заключения договоров со страховыми компаниями и обоснований величин страховых взносов;
- разработку территориально дифференцированных по уровням напряжения, надежности, сезонам года, дням недели и времени суток тарифов;
- выбор источника электроснабжения в условиях рынка электроэнергии (мощности) и создаваемых региональных энергетических рынков;
- обоснование использования ВИЭ;
- учет использования систем РГ;
- разработку организационно-технических мероприятий по управлению киберрисками в целях обеспечения кибербезопасности элементов ЭЭС (СЭС);
- разработку организационно-технологических мер по изменению режимов энергопотребления;
- справедливое распределение прибыли между субъектами управления нагрузкой, возникающей при изменении режимов энергопотребления.

По мере развития энергетического рынка становится невозможным принуждение потребителей к поддержанию необходимых ЭЭС режимов энергоиспользования. Для этого (за исключением критических ситуаций) должны использоваться только экономические методы, стимулирующие потребителей к участию в повышении как уровня надежности ЭЭС, так и своего собственного. Один из таких стимулов – разработка системы льгот по оплате потребляемой энергии потребителям, согласным на отключение (ограничение) нагрузки при возникновении дефицитов мощности в ЭЭС. Аналогичная система льгот предлагается при добровольном снижении заявленного максимума. При выработке шкалы тарифных скидок и надбавок, предоставляемых ЭЭС потребителям возможны два направления:

- плата за электроэнергию возрастает с ростом требований потребителя к надежности его энергоснабжения;
- плата снижается, если потребитель при заключении договора дает согласие на управление нагрузкой в заранее оговоренных пределах.

Следовательно, можно идти либо от минимальной надежности для всех потребителей, повышая тарифную ставку при повышении требований потребителя, либо – от существующей, снижая ставку, если потребитель согласен на дополнительное принудительное регулирование нагрузки со стороны ЭЭС [14]. Модели повышения эффективности ЭЭС составляют задачи ценообразования на рынке энергии и мощности. Они должны учитывать варьируемую во времени суток цену спроса – предложения на энергию и мощность, для чего необходимо моделирование в реальном времени процессов,

протекающих в ЭЭС и у потребителя, учитывающих все экономически значимые особенности поставщиков электроэнергии на оптовый рынок, возможности сети, требования потребителей. Особо отметим, что решение задачи управления электропотреблением в нормальных и аварийных режимах ЭЭС включает выяснение величины ожидаемого экономического эффекта и выработку решений о распределении его между ЭЭС и потребителями. При этом прибыль потребителей от изменения режимов должна не только покрывать потери (ущерб), но и создавать стимулирующие условия для оперативного персонала, непосредственно занятого в изменении режимов энергоиспользования.

Широкое применение выдвинутых предложений возможно лишь при максимально глубококом исследовании возможностей потребителя по управлению нагрузкой. Если ЭЭС определит условия по обеспечению тех или иных показателей надежности, потребитель осуществит проверку их выполнения с технико-экономической оценкой последствий их реализации. Анализ предельных параметров и состояний производств позволяет выработать требования к надежности внешнего энергоснабжения с учетом длительности режима регулирования, периодичности, глубины ограничения. Это основа согласованного графика нагрузки с одновременной минимизацией последствий изменения нормального режима энергопотребления. Знание технологических особенностей производственных систем и условий функционирования ЭЭС (СЭС) позволит находить взаимосогласованные варианты решений, удовлетворяющие и ЭЭС и потребителей.

Естественно, что решать такие задачи возможно лишь при наличии информации о технико-экономических последствиях, связанных с управлением объектами энергетики в нормальных, аварийных и послеаварийных условиях эксплуатации, наличия базы данных показателей энергоиспользования, соответствующих различным режимам работы производства, формируемых на единой методической основе [14]. Это позволяет приступить к решению следующих задач:

- формирования состава показателей контроля и управления режимами энергопотребления;
- разработки процедур сбора, установления источников и способов получения информации;
- разработки способов обработки, форм и средств представления, методов использования;
- переноса имеющейся информации на объекты-аналоги;
- уточнения исходной информации по мере реализации мероприятий по управлению режимами энергоиспользования;
- расчета ожидаемых и (или) фактических последствий введения режимов управления нагрузкой;

- обеспечения максимальной кибербезопасности объектов ЭЭС (СЭС);
- прогнозирования показателей по ожидаемым последствиям реализаций управления режимами энергопотребления.

Наличие подобной базы данных подготовит условия для заключения с каждым потребителем трехстороннего договора с участием производителя и оператора регионального рынка.

IV. Заключение

В рамках комплексных задач создания, размещения и использования мощностей в системах энергетики, прежде чем говорить о необходимости введения дополнительных генерирующих мощностей, необходимо решить задачу рационального использования имеющихся, включая РГ, СНЭЭ и резервы потребителей энергии. Совместное и рациональное использование избыточности ЭЭС и потребителей основано на рациональном подборе таких объектов, управление режимом работы которых при аварийных ситуациях в ЭЭС приводит к минимуму экономических потерь.

В настоящее время интерес к регулярным исследованиям систем электроэнергетического комплекса чрезвычайно велик и еще более значим, чем в 1970-1980-х гг. – на этапе динамического развития теории надежности систем энергетики и ее практических приложений. Следовательно, изменения в организационных формах управления энергетикой должны учитываться как в методических, так и в практических разработках, направленных на принятие рациональных решений в области управления развитием и эксплуатацией ЭЭС и СЭС потребителей.

Выявление, оценка и обоснование предельных величин отключаемых мощностей и параметров технологических процессов позволит так априорно планировать возможные отключения нагрузки, что они не отразятся (или минимально отразятся) на результатах работы потребителя.

Возникла настоятельная необходимость исследования системных проблем, связанных с оценкой последствий агрессивных кибератак и оптимизацией киберрисков по всей цепи от производителя электроэнергии до ее потребителя. Это позволит предотвратить (минимизировать) возможность каскадного развития последствий кибератак, повысить информированность технологического и оперативно-диспетчерского персонала энергообъектов, создать эффективные стратегии и выработать критерии киберустойчивости.

Реализация предлагаемых правил принятия решений для конкретных потребителей позволит обоснованно установить договорные значения максимумов мощности и управлять фактической нагрузкой, а также устанавливать допустимую и целесообразную степень участия потребителей в разгрузке ЭЭС при возникновении в ней аварийных ситуаций и при прохождении суточных и сезонных максимумов.

Поступила в редакцию 24.10.2022

Received 24.10.2022

Библиографический список

- [1] Афонин Н.С. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.: Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. – 296 с.
- [2] Михайлов В.В. Тарифы и режимы электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 214 с.
- [3] Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. М.: МЭИ, 2010. – 188 с.
- [4] Червонный Е.М., Папков Б.В. Влияние отказов в энергосистеме на состоянии промышленных объектов // Надежность и Контроль Качества. 1992. № 11. С. 29-37.
- [5] Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю. Модели оценки показателей балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2014. – 207 с.
- [6] Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1988. – 151 с.
- [7] Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы. Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
- [8] Папков Б.В. Электроэнергетический рынок и тарифы. Н.Новгород: НГТУ, 2002. – 252 с.
- [9] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11 (90). С. 123-136.
- [10] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.
- [11] Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети // Библиотечка электротехника. 2020. № 8 (260). С. 1-116.
- [12] Илюшин П.В., Ковалев С.П., Куликов А.Л., Небера А.А., Непша Ф.С. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы // Библиотечка Электротехника. 2021. № 8 (272). С. 1-116.
- [13] Чокин Ш.Ч., Лойтер Э.Э. Управление нагрузкой электроэнергосистем. Алма-Ата: Наука, 1985. – 288 с.
- [14] Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. М.: Юрайт, 2019. – 470 с.
- [15] Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.
- [16] Кучеров Ю.Н. [и др.]. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. М.: ООО ИД «Энергия», 2013. – 304 с.
- [17] Воропай Н.И. Надежность систем энергетики: Достижения. Проблемы. Перспективы. Новосибирск: Наука, 1999. – 433 с.
- [18] Копытов Ю.В., Крылова Н.А. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 68-77.

- [19] Антонов Г.Н., Черкасов Г.Н., Криворучский Л.Д. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 285 с.
- [20] Папков Б.В., Савельев В.А. Об анализе последствий от нарушений электроснабжения // Вестник ИГЭУ. 2016. № 3. С. 46-50. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.046-050
- [21] Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
- [22] Шарьгин М.В. Оценка последствий отключений потребителей электроэнергии. Методы и модели. Н.Новгород: НГТУ, 2014. – 201 с.
- [23] Папков Б.В., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Проблемы кибербезопасности электроэнергетики // Библиотечка Электротехника. 2017. № 9 (225). С. 1-96.

References

- [1] N.S. Afonin, *Nadyozhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [Reliability of power supply of industrial enterprises]*. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1958 (in Russian).
- [2] V.V. Mikhailov, *Tarifny i rezhimy elektropotrebleniya [Tariffs and power consumption modes]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [3] V.A. Nepomnyaschiy, *Ekonomicheskie poteri ot narushenij elektrosnabzheniya potrebitel'ev [Economic losses from power supply failures of consumers]*. Moscow: MPEI, 2010 (in Russian).
- [4] E.M. Chervonnoy and B.V. Papkov, “Vliyaniye otказov v energosisteme na sostoyaniye promyshlennykh ob"ektov [Impact of failures in the power system on the state of industrial facilities]”, *Nadezhnost' i kontrol' kachestva [Reliability and quality control]*, no. 11, pp. 29-37, 1992 (in Russian).
- [5] Yu.Ya. Chukreev and M.Yu. Chukreev, *Models for assessing balance reliability indicators in managing the development of electric power systems [Models for assessing balance reliability indicators in managing the development of electric power systems]*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014 (in Russian).
- [6] V.I. Edelman, *Nadyozhnost' tekhnicheskikh sistem: ekonomicheskaya ocenka [Reliability of technical systems: economic assessment]*. Moscow: Economics, 1988 (in Russian).
- [7] V.G. Kitushin, *Nadyozhnost' energeticheskikh sistem. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy [Reliability of energy systems. Part 1. Theoretical foundations]*. Novosibirsk: NSTU, 2003 (in Russian).
- [8] B.V. Papkov, *Elektroenergeticheskij rynek i tarify [Electric power market and tariffs]*. N. Novgorod: NNSTU, 2002 (in Russian).
- [9] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and B.V. Papkov, “The problems and peculiarities of distributed electricity”, *Bulletin NGIEI*, no. 11 (90), pp. 123-136, 2018.
- [10] P.V. Ilyushin and A.L. Kulikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami energorajonov s raspredelyonnoy generaciej [Automation of control of normal and emergency modes of power energy districts with distributed generation]*. N. Novgorod: NRU RANEPa, 2019 (in Russian).

- [11] P.V. Ilyushin, “Prospects for application and problematic issues of integration of distributed energy sources into electrical networks”, *Library of Electrician*, no. 8 (260), pp. 1-116, 2020.
- [12] P.V. Ilyushin, S.P. Kovalev, A.L. Kulikov, A.A. Nebera and F.S. Nepsha, “Smart control of distributed energy resources on the basis of the digital platform”, *Library of Electrician*, no. 8 (272), pp. 1-116, 2021.
- [13] Sh.Ch. Chokin and E.E. Loiter, *Upravlenie nagruzkoy elektroenergosistem [Power system loads management]*. Alma-Ata: Science, 1985 (in Russian).
- [14] B.V. Papkov, and A.L. Kulikov, *Teoriya sistem i sistemnyj analiz dlya elektroenergetikov [Systems theory and systems analysis for electric power industry]*. Moscow: Urait, 2019 (in Russian).
- [15] Yu.N. Rudenko and I.A. Ushakov, *Nadezhnost' sistem energetiki [Reliability of energy systems]*. Novosibirsk: Science. Sib. Department, 1989 (in Russian).
- [16] Yu.N. Kucherov et al., *Koncepciya obespecheniya nadyozhnosti v elektroenergetike [The concept of ensuring reliability in electric power industry]*. Moscow: LLC Publishing House “Energy”, 2013 (in Russian).
- [17] N.I. Voropay, *Nadyozhnost' sistem energetiki: Dostizheniya. Problemy. Perspektivy [Reliability of energy systems: achievements, problems, prospects]*. Novosibirsk: Science, 1999 (in Russian).
- [18] Yu.V. Kopytov and N.A. Krylova, *Instruktivnye materialy Glavgosenergonadzora [Guidance materials of Glavgosenergonadzor]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986, pp. 68-77 (in Russian).
- [19] G.N. Antonov, G.N. Cherkasov and L.D. Krivorutsky, *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]*. Novosibirsk: Science, Sib. Department, 1990 (in Russian).
- [20] B.V. Papkov and V.A. Savelyev, “Analysis of power supply interruption consequences”, *Vestnik IGEU*, no. 3, pp. 46-50, 2016. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.046-050
- [21] V.G. Kitushin, *Nadezhnost' energeticheskikh sistem [Reliability of energy systems]*. Novosibirsk: NGTU, 2003 (in Russian).
- [22] M.V. Sharygin, *Ocenka posledstviy otklyuchenij potrebitelej elektroenergii. Metody i modeli [Assessment of the consequences of electricity blackouts of consumers. Methods and models]*. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2014 (in Russian).
- [23] B.V. Papkov, A.L. Kulikov and V.L. Osokin, “Problemy kiberbezopasnosti elektroenergetiki [Problems of cybersecurity of electric power industry]”, *Library of Electrician*, no. 9 (225), pp. 1-96, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

Vladimir L. Osokin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation