

УДК 621.31.019.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

© 2011 г.

М.В. Шарыгин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

sharygin.m.v@gmail.com

Поступила в редакцию 26.09.2011

Управление нагрузкой потребителей электрической энергии является единственным надёжным средством предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций в электроэнергетической системе, связанных с дефицитом электрической мощности. Предлагается новый подход к практически реализуемому рациональному выбору вариантов управляющего воздействия на потребителей на основе универсального моделирования производственных систем.

Ключевые слова: электроэнергетика, потребители электроэнергии, отключение нагрузки, оптимальное управление.

При эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) могут происходить аварии, приводящие к дефициту активной мощности, нарушению устойчивости, асинхронному режиму и перегрузке оборудования по току. Отключение нагрузки (противоаварийное управление нагрузкой) есть очень простое, надёжное и порой единственное доступное средство предотвращения и ликвидации подобных аварийных ситуаций в ЭЭС.

Отключение нагрузки используется на разных уровнях территориальной и временной иерархии (рис. 1). Чем выше уровень, на котором возникает аварийная ситуация, тем большая ответственность возлагается на противоаварийные мероприятия.

Управление нагрузкой в таких случаях необходимо [1]. Отключение (ограничение) потребителей для ликвидации или предупреждения аварий в ЭЭС производится при помощи:

- графиков ограничения потребления, в соответствии с которыми потребители заранее уведомляются о необходимости ограничить потребление электрической энергии (мощности) и самостоятельно выполняют мероприятия, обеспечивающие снижение потребления;
- графиков временного отключения потребления, в соответствии с которыми без предварительного уведомления сетевой организацией или системным оператором производятся отключения линий электропередачи;
- противоаварийной автоматики (ПА) ЭЭС, действующей на отключение выключателей.

Уже на стадии разработки графиков и расчёта ПА возникает вопрос: каких именно потре-

бителей и какие присоединения отключать? Ведь отключать нагрузку нужно только в объёме, чуть большем дефицита мощности, и значительная часть потребителей может не прерывать нормальную работу. Получается, что некоторые потребители должны выступить в роли «жертвы», ведь отключение наносит им ущерб, а возмещение ущерба в полном объёме не предусмотрено [1–3].

Итак, управление нагрузкой должно быть эффективным, то есть осуществляться с минимально возможными потерями для субъектов электроэнергетики.

Поскольку ни сетевая организация, ни субъекты оперативно-диспетчерского управления не несут ответственности за нанесённый потребителям ущерб при реализации противоаварийных мероприятий, для предотвращения опасных последствий и сокращения возможного ущерба каждому потребителю устанавливается технологическая и аварийная броня электроснабжения (АТБ).

Однако опыт показал, что аварийная и технологическая броня не защищает потребителя в полной мере [2, 4]. Броня не учитывает всех реальных процессов, происходящих в производственной системе отключенного потребителя, и принципиально не может служить основанием для сокращения ущерба. Поэтому броня в современном понимании неспособна защитить потребителя от срыва выпуска продукции и даже производственных аварий. При противоаварийном управлении нагрузкой действующие методы защиты потребителей от необоснованно высоких ущербов неэффективны и во многих случаях фактически не работают.

	Долгосрочное планирование режима (прогноз год – месяц)	Краткосрочное планирование режима (прогноз неделя – сутки)	Оперативное управление режимом (прогноз час – текущее время)	Автоматическое управление режимом (текущее время)
Уровень ЕЭС (Единой энергосистемы)	Устранение причины нарушения нормального режима	1) Устранение причины нарушения нормального режима 2) Привлечение резервов мощности 3) Применение графиков ограничения потребления мощности 4) Другие мероприятия	1) Устранение причины нарушения нормального режима 2) Привлечение резервов мощности 3) Применение графиков временного отключения мощности 4) Другие мероприятия	Действие противоаварийной автоматики, в том числе и на отключение нагрузки
Уровень питающей сети (750-110 кВ)				
Уровень распределительной сети (220-6 кВ и выше)				
Уровень электроснабжения отдельного потребителя (220-0,4 кВ)	Аварийная ситуация предотвращается или ликвидируется самостоятельно потребителем			

Рис. 1. Мероприятия по ликвидации или предотвращению аварийных ситуаций разных уровней

Чтобы не допустить отключения своего производства, подавляющее большинство потребителей относит к технологической брони почти всю договорную мощность. Установленные правила выделения технологической брони позволяют это сделать. Это, а также другие, менее законные, способы приводят к неотключаемости потребителей, следовательно, противоаварийные мероприятия лишаются силы и становятся фикцией [2]. При существующей тенденции роста аварийности подобное небрежное отношение к противоаварийным мероприятиям может обернуться колоссальными убытками для всех субъектов электроэнергетики.

Исследование проблемы управления нагрузкой для ликвидации аварийных ситуаций в ЭЭС [2–4] позволило установить, что сократить ущерб потребителей возможно только в случае аварийных ситуаций, возникающих на уровне оперативного управления, и главным образом в распределительных сетях.

Широкое внедрение результатов теоретических работ по оптимизации отключений невозможно из-за наличия ряда недостатков [4, 5]. Все решения основывались на поиске математически точного оптимального варианта управления нагрузкой по минимуму ожидаемого экономического ущерба. Поэтому, во-первых, большинство работ не являются универсальными и могут быть использованы только на отдельных промышленных предприятиях. Во-вторых, если работы универсальны, предложенные методы управления нагрузкой требуют

наличия единой автоматизированной системы управления, контроля, учета технологических параметров промышленных потребителей и энергосистемы. Однако такая система на сегодняшний день отсутствует. В-третьих, последствия управления нагрузкой не всегда поддаются экономической оценке.

В [4, 6] предложен новый подход к практическому решению вопроса управления нагрузкой энергосистемы для ликвидации дефицитов мощности: необходимо отказаться от поиска экономически строгооптимального решения и перейти к поиску технически осуществимого рационального решения. Рациональным предложено считать решение, отвечающее трём требованиям:

1) Вариант управления нагрузкой должен быть практически исполним (в качестве единственной доступной формы управляющего воздействия на j -го потребителя принимается однократное погашение у него некоторого i -го набора присоединений);

2) При реализации варианта управления ожидаемые потери потребителей должны быть близки к минимально возможным (требование выгоды);

3) По каждому потребителю вариант должен легко рассчитываться для любой конкретной дефицитной ситуации (требование доступности поиска).

Для одновременного выполнения перечисленных требований необходим новый критерий выбора варианта управления нагрузкой, более

удобный в практическом применении, нежели экономический ущерб. Вместе с тем новый критерий должен отражать ущерб потребителей, чтобы управляющее воздействие было обоснованно рациональным. При этом ущерб должен пониматься в более широком смысле, чем просто экономическая категория, как общее технико-экономическое выражение реакции потребителя электроэнергии и смежных систем на нарушение функциональных режимов связей, объединяющих эти системы с рассматриваемой системой энергетики.

Ущерб потребителя Y_i^j из-за отключения i -го набора присоединений Z_{oni}^j на некоторое время τ , можно записать в виде

$$Y_i^j = \sum_{\forall s^j \in S_i^j} Y_s + \sum_{\forall s^j \in S_{cmi}^j} Y_s \quad (1)$$

где Y_s – ущерб потребителя, возникающий вследствие вынужденного останова участка производства $s^j \in S^{j*}$ (S^{j*} – множество всех вынужденно остановленных участков производства); S_i^j – подмножество отключенных участков производства; S_{cmi}^j – подмножество участков производства, вынужденно остановленных вследствие разрыва технологических связей; $S^{j*} = S_i^j \cup S_{cmi}^j$, $S_i^j \cap S_{cmi}^j = \emptyset$.

Выделение участков производства, связей между ними и построение математической модели производственной системы производится в соответствии с рекомендациями [7, 8, 9].

Таким образом, при отключении у потребителя некоторого i -го набора присоединений Z_{oni}^j общий ущерб потребителя Y_i^j будет тем меньше, чем меньше число участков производства, остановленных из-за разрыва технологических связей, $N_{S_{cmi}^j}$ и меньше ущерб Y_s по каждому вынужденно остановленному участку производства $s^j \in S^{j*}$ (формула (1)). Поэтому данные величины можно принять в качестве базовых критериев допустимости отключения i -го набора присоединений Z_{oni}^j с времени t_0 и длительностью τ .

Чтобы избежать расчёта экономических ущербов по участкам производства Y_s , но учесть размер каждой величины Y_s , предложено [4, 6] ввести деление участков производства на два множества – участки производства с разрешённым вынужденным остановом и участки производства с запрещённым вынужденным остановом (аналог – «небронированные» и «бронированные»). К подмножеству участков производства с запрещённым вынужденным

остановом $S_{запр}^j$ следует отнести участки производства, вынужденный останов которых по любой причине (отключение электроснабжения и (или) разрыв технологической связи) влечёт опасность для жизни людей, окружающей среды, повреждение оборудования, срыв выпуска конечной продукции и другие подобные последствия. Остальные участки производства должны быть отнесены к подмножеству участков производства с разрешённым вынужденным остановом.

Отличие предлагаемого способа деления на два множества от существующей практики определения аварийной и технологической брони состоит в том, что делению должны подвергаться не электроприёмники, а участки производства как непосредственные источники ущерба. При этом учитывается, что вынужденный останов участка производства может произойти не только по причине отключения его электроприёмников, но и вследствие разрыва технологических связей.

Таким образом, оценить величину ущерба j -го потребителя, возникающего при отключении i -го набора присоединений Z_{oni}^j с времени t_0 и длительностью τ , и принять решение о допустимости данного управляющего воздействия можно при помощи двух базовых критериев:

1) числа участков производства, вынужденно остановленных из-за разрыва технологических связей, $N_{S_{cmi}^j}$,

2) числа вынужденных остановов участков производства с запрещённым вынужденным остановом $N_{S_{запр}^j}$.

Система базовых критериев применима только к одному частному случаю – когда полностью известны структура и характеристики производства на время начала отключений t_0 и развитие разрушения производственного процесса однозначно предсказуемо. Например, если потребитель имеет автоматизированную систему контроля параметров производственного процесса или параметры производственной системы потребителя постоянны и не зависят от времени. Чаще всего это не так. Тогда о числе вынужденно остановленных участков производства можно говорить только с точки зрения теории вероятностей, как о дискретных случайных величинах. То есть речь идет о вероятности p_{cmi}^j того, что число участков производства, вынужденно остановленных из-за разрыва технологических связей, не превысит заданной величины $N_{S_{cm}^j}^*$, и о вероятности $p_{запр}^j$ того, что число вынужденных остановов участков произ-

водства с запрещённым вынужденным остановом не превысит заданной величины $N_{S_{запр}}^*$.

В этом случае рациональный выбор управляющего воздействия удобно вести при помощи следующих рабочих критериев (полученных преобразованием базовых критериев):

1) возможная длительность отключения i -го набора присоединений $\tau_{воз i}^j = F_{\tau_{воз}}(t_0; Z_{оп i}^j; \alpha^j;$

$N_{S_{см}}^*; p_{см}^*)$, где α^j – множество технических показателей производства j -го потребителя. Физический смысл величины $\tau_{воз i}^j$ состоит в том, что при отключении i -го набора присоединений $Z_{оп i}^j$, начиная с времени t_0 и в течение промежутка времени $\tau_{воз i}^j$, с вероятностью $p_{см}^*$ на j -м производстве вынужденно остановится из-за разрыва технологических связей не более $N_{S_{см}}^*$ нормально работающих участков производства;

2) предельная длительность отключения i -го набора присоединений $\tau_{пред i}^j = F_{\tau_{пред}}(t_0; Z_{оп i}^j; \alpha^j;$

$N_{S_{запр}}^*; p_{запр}^*)$. Физический смысл величины $\tau_{пред i}^j$ состоит в том, что при отключении i -го набора присоединений $Z_{оп i}^j$, начиная с времени t_0 и в течение промежутка времени $\tau_{пред i}^j$, с вероятностью $p_{запр}^*$ на j -м производстве вынужденно остановится не более $N_{S_{запр}}^*$ участков производства с запрещённым вынужденным остановом.

Предлагаемые базовые и рабочие критерии предназначены для оценки ущерба косвенным путём – через величину разрушения производственного процесса потребителя с учётом качественного состава остановленных участков производства. Поэтому применение данных критериев недопустимо в задачах, где требуется именно количественная оценка экономического ущерба, например в проектных или оптимизационных задачах для выбора наилучшего варианта. Однако при решении частной чисто эксплуатационной задачи поиска рациональных вариантов управляющих воздействий использование данных критериев более целесообразно, нежели экономического ущерба.

На основе разработанной системы рабочих критериев предлагается универсальная (применимая ко всем производственным системам) двухступенчатая схема отбора рациональных вариантов управления при известной длительности отключения τ_3 .

Первая ступень отбора заключается в определении множества возможных способов от-

ключения j -го потребителя H^j на время $\tau_3 = \tau_{деф}$ ($\tau_{деф}$ – прогнозируемая длительность дефицита мощности); i -й набор присоединений $Z_{оп i}^j$ принадлежит к множеству возможных способов отключения H^j , если одновременно соблюдаются следующие условия:

$$\begin{cases} \tau_{воз i}^j = F_{\tau_{воз}}(t_0; Z_{оп i}^j; \alpha^j; N_{S_{см}}^* = 0; p_{см}^* \rightarrow 1) > \tau_3 = \tau_{деф} \\ S_{запр}^j \cap S_i^j = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

Отключение любого набора присоединений из множества возможных способов отключения $Z_{оп i}^j \in H^j$ на время τ_3 предпочтительно для j -го потребителя, поскольку отключение не вызовет ни остановов участков производства, смежных с отключенными, (т.к. $N_{S_{см}}^* = 0$, $p_{см}^* \rightarrow 1$), ни вынужденных остановов участков производства с запрещённым вынужденным остановом.

Вторая ступень отбора заключается в определении множества предельных способов отключения j -го потребителя G^j на время $\tau_3 = \tau_{деф}$. i -й набор присоединений $Z_{оп i}^j$ принадлежит к множеству предельных способов отключения G^j , если одновременно соблюдаются следующие условия:

$$\begin{cases} \tau_{пред i}^j = F_{\tau_{пред}}(t_0; Z_{оп i}^j; \alpha^j; N_{S_{запр}}^* = 0; p_{запр}^* \rightarrow 1) > \tau_3 = \tau_{деф} \\ \tau_{воз i}^j < \tau_3 = \tau_{деф} \end{cases} \quad (3)$$

То есть отключение любого набора присоединений из множества предельных способов отключения G^j на время τ_3 не вызовет вынужденных остановов участков производства с запрещённым вынужденным остановом (т.к. $N_{S_{запр}}^* = 0$, $p_{запр}^* \rightarrow 1$), однако разрушения производственного процесса у j -го потребителя, скорее всего, не избежать. Отключение набора присоединения из множества предельных способов отключения G^j на время τ_3 допустимо только в случае нехватки мощности для ликвидации аварийной ситуации в энергосистеме при использовании лишь возможных способов отключения $Z_{оп i}^j \in H^j$ по всем потребителям.

Способы отключения j -го потребителя, не принадлежащие ни к множеству возможных способов отключения H^j , ни к множеству предельных способов отключения G^j , применять нежелательно, поскольку их осуществление приведёт к вынужденным остановам участков производства с запрещённым вынужденным остановом.

На основе разработанных критериев можно осуществить рациональное распределение всей величины дефицита мощности $P_{деф}$, возникающего в момент времени t_0 , длительностью $\tau_{деф}$,

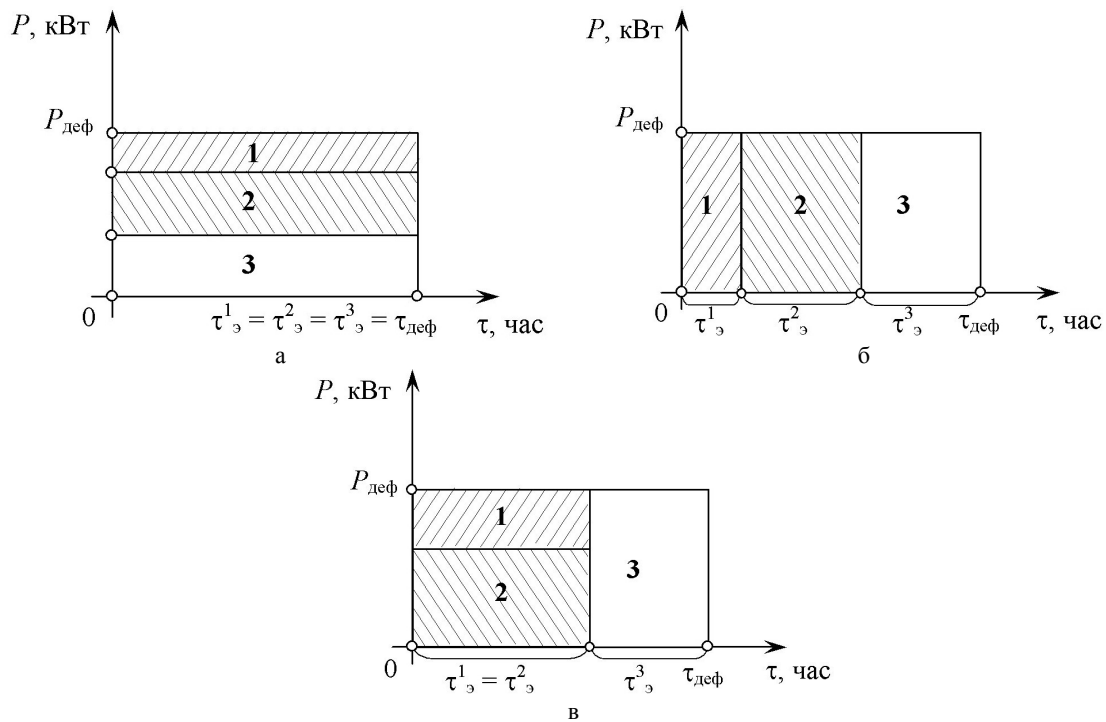


Рис. 2. Схематичное изображение возможных способов покрытия дефицита мощности за счёт трех потребителей (а – «параллельное», б – «последовательное», в – «смешанное» погашение трех потребителей)

между несколькими потребителями, за счёт которых этот дефицит может быть ликвидирован. Распределение величины дефицита может быть произведено двумя принципиально различными путями.

Суть первого подхода заключается в рассмотрении производства всех потребителей в месте дефицита как единой системы без разделения по хозяйствующим субъектам. В этом случае величины $\tau_{\text{воз}i}$, $\tau_{\text{пред}i}$ необходимо рассчитывать по данной объединённой производственной системе. Соответственно выбор управляющего воздействия по выражению (2) или (если отключаемой мощности недостаточно) по выражению (3) также будет вестись по объединённой производственной системе. Найденное рациональное управляющее воздействие – i -й набор присоединений $Z_{\text{он}i}$ будет содержать присоединения различных потребителей, за счёт которых может быть ликвидирован дефицит мощности. При существующей экономической обособленности всех субъектов данный подход, скорее всего, неприменим.

Второй подход состоит в том, что сначала заранее определяются возможности каждого потребителя в ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме, то есть для каждого i -го набора присоединений $Z_{\text{он}i}^j$ отдельного j -го потребителя рассчитываются возможная и предельная длительности отключения – $\tau_{\text{воз}i}^j$ и $\tau_{\text{пред}i}^j$. При возникновении аварийной ситуации вели-

чина дефицита мощности $P_{\text{деф}}$ распределяется в соответствии с известными возможностями потребителей в месте дефицита по модульному принципу. На рис. 2 схематично изображены теоретически возможные способы покрытия дефицита мощности за счёт однократного отключения части нагрузки нескольких потребителей.

Первый способ – «параллельное» погашение всех потребителей – заключается в одновременном частичном отключении всех потребителей в течение всей длительности дефицита $\tau_{\text{деф}}$ (рис. 2а). Второй способ – «последовательное» погашение всех потребителей (рис. 2б) – позволяет более гибко, нежели первый, приспособиться к возможностям производства. Каждый потребитель может частично погашаться на индивидуальный срок $\tau^j_{\text{о}}$ в размере всего дефицита мощности, после чего требуется его подмена другим потребителем. Ещё более оптимальным является третий способ покрытия дефицита мощности – «смешанное» погашение всех потребителей (рис. 2в). Размер и длительность участия каждого потребителя в ликвидации дефицита мощности здесь связаны не только с ожидаемыми параметрами дефицита мощности, но и с возможностями других потребителей в месте дефицита. При значительном числе потребителей, за чей счёт может быть ликвидирован дефицит мощности, способ «смешанного» погашения позволит выбрать у каждого потребителя только допустимые варианты его уча-

ствия в ликвидации практически любых дефицитов мощности. Следовательно, дефицит мощности любых параметров будет ликвидироваться с минимальными потерями со стороны потребителей. Однако два последних способа предполагают проведение синхронизированных действий с большим числом выключателей, что можно осуществить только при наличии развитой автоматизированной системы управления электроснабжением.

Алгоритм самого простого способа распределения дефицита мощности – «параллельного» погашения потребителей – будет выглядеть следующим образом. Заблаговременно, с помощью математической модели производственных систем потребителей, определяются множества возможных способов отключения H и предельных способов отключения G [4, 9]. Пусть отключение части нагрузки всех потребителей в месте дефицита мощности производится однократно с момента времени t_0 в течение времени $\tau_э = \tau_{\text{деф}}$. Тогда величина дефицита $P_{\text{деф}}$ должна распределяться по отдельным потребителям следующим образом:

$$P^j = k^j \cdot P_{\text{деф}}, \quad (4)$$

где P^j – величина нагрузки j -го потребителя, подлежащая отключению; k^j – коэффициент участия j -го потребителя.

Коэффициент участия j -го потребителя k^j определяется исходя из необходимости соблюдения следующих условий:

1) если позволяет величина дефицита мощности $P_{\text{деф}}$, то отключаться должны только наборы присоединений из множества возможных способов отключения H по всем потребителям, общее количество которых обозначим $N_{\text{п}}$, $H = \bigcup_{j=1}^{N_{\text{п}}} H^j$;

2) способы отключения из множества предельных способов G должны использоваться, если ресурса возможных способов погашения недостаточно. Множество G определяется как

$$G = \bigcup_{j=1}^{N_{\text{п}}} G^j.$$

Тогда коэффициент участия j -го потребителя k^j можно рассчитать по следующей формуле:

$$k^j = \begin{cases} \frac{P^j_{\text{возмах}}}{\sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} P^j_{\text{возмах}}}, & \text{если } P_{\text{деф}} < \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} P^j_{\text{возмах}}, \\ \frac{P^j_{\text{предмах}}}{\sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} P^j_{\text{предмах}}}, & \text{если } \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} P^j_{\text{предмах}} > P_{\text{деф}} \geq \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} P^j_{\text{возмах}} \end{cases} \quad (5)$$

где $P^j_{\text{возмах}}$ – максимальная электрическая мощность среди всех наборов присоединений из

множества возможных способов отключения H^j , $P^j_{\text{предмах}}$ – максимальная электрическая мощность среди всех наборов присоединений из множества предельных способов отключения G^j .

После расчёта по формуле (4) задания по снижению электрической мощности для j -го потребителя P^j выбирается набор присоединений $Z^j_{\text{опи}}$ из множества возможных способов H^j (условие 2) или множества предельных способов G^j для отключения данного потребителя (условие 3). Электрическая мощность, записанная за искомым набором присоединений P^j_i , должна быть больше задания по снижению электрической мощности для j -го потребителя P^j , $P^j < P^j_i$. При этом управляющее воздействие будет рациональным и не повлечёт у погашаемых потребителей тяжёлых нарушений производственного цикла, порчи оборудования и сырья, аварий и т.п. последствий с вероятностью выше заданной в расчётах.

На основании опыта прошлых лет [6] величина дефицита мощности, ликвидируемого графиками отключений, как правило, не превышает уровня 20% от максимума нагрузки. Соответственно, предельная величина отключаемой мощности в среднем по каждому потребителю должна быть приблизительно равна пятой части всей его нагрузки.

По объективным причинам возможен случай, когда мощности допустимых способов отключения в совокупности по всем потребителям в месте дефицита будет недостаточно для ликвидации дефицита мощности. В такой ситуации обосновано использование недопустимых способов отключения из множества E . Потребители должны быть оповещены об этой потенциальной возможности, чтобы принять необходимые меры по повышению надёжности электроснабжения своего производства – ввести независимые резервные источники энергии и (или) повышать долю управляемой нагрузки за счёт преобразования технологических схем и режимов. Необходимо заметить, что предложенный метод рационального распределения отключаемой мощности между потребителями при ликвидации аварийной ситуации в энергосистеме не решает проблемы внедрения рыночных отношений в электроэнергетике в части противоаварийного управления.

Выводы

Предложенный метод рационального распределения отключаемой мощности между потребителями при ликвидации аварийной ситуа-

ции в энергосистеме позволяет объективно оценить возможности каждого потребителя и может служить базой для внедрения рыночных отношений, например при разработке тарифов, дифференцированных по надёжности. В основе предложенного метода лежат оригинальные математические модели производственных систем промышленных потребителей электрической энергии.

Список литературы

1. Федеральный закон «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ от 26 марта 2003 г.
2. Шарыгин М.В. Критический анализ правил разработки и применения графиков ограничения потребления и временного отключения электрической энергии (мощности) // Межвузовский сборник научных трудов «Электрооборудование промышленных установок». Н.Новгород, 2002. С. 91–96.
3. Шарыгин М.В. История вопроса управления нагрузкой энергосистем с целью удаления дефицита мощности // III Всесоюзная молодёжная научно-техническая конференция «Будущее технической науки»: Тез. докл. Н. Новгород, 2004. С. 118.
4. Червонный Е.М., Шарыгин М.В. Участие потребителей в ликвидации аварийных дефицитов мощности в энергосистеме // Надёжность либерализованных систем энергетики. Новосибирск: Наука, 2004. 333 с.
5. Папков Б.В., Шарыгин М.В. Надёжность электроснабжения: учёт кризисных явлений // Энергоэффективность: научно-технический журн. 2006. Вып. 1–2. С. 36–42.
6. Червонный Е.М., Шарыгин М.В. Частное решение задачи оптимального управления нагрузкой в условиях дефицитов мощности в энергосистеме // XXI научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики»: Тез. докл. Н. Новгород, 2002. С. 33 – 35.
7. Папков Б.В. Надёжность и эффективность электроснабжения. Н. Новгород: НГТУ, 1996. 212 с.
8. Червонный Е.М. Построение схем электроснабжения предприятий и управление их режимами, обеспечивающие эффективное использование внутренних резервов производства при нарушениях энергоснабжения: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. Иркутск, 1982. 31 с.
9. Шарыгин М.В. Разработка и совершенствование методов управления нагрузкой для ликвидации аварийных ситуаций в электроэнергетической системе: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2005. 20 с.

THE USE OF MATHEMATICAL MODELS OF PRODUCTION SYSTEMS FOR LOAD CONTROL IN EMERGENCY PREVENTION AND ELIMINATION IN AN ELECTRIC POWER SYSTEM

M.V. Sharygin

Load shedding is the only reliable way of emergency prevention and elimination in an electric power system when there is an imbalance between electricity supply and demand. A new approach is proposed to a practically realizable rational choice of options of emergency control actions with respect to customers based on universal modeling of the production system.

Keywords: electric power engineering, electric power consumers, load shedding, optimal control.