

Разработка универсальной модели оценки последствий отказов электроснабжения потребителей

ШАРЫГИН М.В.

В большинстве задач электроэнергетики, связанных с оценкой последствий отключений потребителей, используется метод макромоделирования, связывающий ущерб потребителей со значением отключенной мощности и/или недополученной электроэнергии. Однако этот метод является приближенным и не позволяет получить адекватные оценки ущербов в задачах малого масштаба (уровень предприятия и ниже). В таких задачах целесообразно применение принципов агрегативного моделирования производственных систем, которое является наиболее общим и универсальным подходом. Представлены основные принципы построения математической агрегативной модели производственных систем потребителей электроэнергии для оценки последствий отказов электроснабжения потребителей. Представленная модель отличается от существующих универсальностью и позволяет оценить последствия отключений/ограничений потребителей в широком спектре теоретических и практических задач по любым возможным критериям с учетом стохастичности информации и получить любые требуемые числовые характеристики оценок последствий (математические ожидания, вероятности, дисперсии, доверительные интервалы, риски).

Ключевые слова: электроснабжение, потребители, отключение, последствия, модель, оценка

Надежность электроустановок и систем их управления стоит дорого. Ограниченный уровень надежности обуславливает возникновение отказов электроснабжения потребителей и вследствие этого, потерь, качественный состав и значения которых изменяются в очень широких пределах. Особое место занимает анализ отключений (ограничений) производственных систем потребителей из-за большей вероятности тяжелых и опасных последствий.

В связи с этим возник ряд оптимизационных задач по минимизации или ограничению значения потерь потребителей при эксплуатации и проектировании энергосистем и систем электроснабжения. Основой их решения являются наличие, достаточность и достоверность информации о потерях потребителей.

Разнообразие видов, структур, параметров производственных систем и их элементов долгое время не позволяли создать универсальную методическую базу для анализа последствий отключений и ограничений промышленных потребителей. Для решения текущих задач был разработан метод макромоделирования [1, 2], связывающий ущерб потребителей со значением отключенной мощности и/или недополученной электроэнергией. Базой метода являются значения усредненного удельного ущерба по отраслям (руб./кВт \cdot ч, руб./кВт). Анализ метода макромоделирования и опыта его применения показал, что его использование целесообразно при решении задач проектирования узлов нагрузки 110 кВ и выше, а оценка ущерба для отдельного предприятия или фидера практически невозможна [1].

Дальнейшее исследование закономерностей поведения производственных систем различных отраслей при их отключениях и ограничениях, а также развитие методов моделирования позволили создать универсальные модели участков производства и правила их функционирования. Результаты исследований легли в основу метода агрегативного моделирования [1, 3]. Идея его основана на декомпозиции производственной системы, что позволяет имитировать ее с любой степенью детализации с целью управления погрешностью результата. Это обуславливает потенциальную применимость метода во всем спектре задач: от отдельных электроприемников до системообразующей сети. Помимо этого, метод позволяет получить оценку последствий отказов не только в денежном исчислении, но и в технических величинах (число остановленных агрегатов, длительности останова, количество энергоносителей и т.д.), что принципиально отличает его от метода макромоделирования. Однако универсальный математический аппарат агрегативного моделирования до сих пор отсутствовал.

В статье предлагается универсальная методическая основа оценки потерь потребителей в практических и теоретических задачах электроэнергетики на основе математической алгоритмической агрегативной модели производственных систем потребителей. Модель использована при разработке концептуального подхода к решению проблемы надежности электроснабжения потребителей в части определения и использования эквивалентов потребителей по последствиям отказов [4, 5], расчета тех-

нико-экономического эффекта мероприятий по управлению надежностью.

Агрегативная модель систем потребителей. При преобразовании производственной системы всё разнообразие технологического оборудования отражается тремя элементами:

«агрегат» (участки производства);

«накопитель» (склады, емкости полуфабрикатов);

«связь» (электрическая, технологическая и прочие), учитывающая взаимовлияние первых двух элементов.

В основе метода агрегативного моделирования лежит универсальная модель длительности простоя «агрегата» (рис. 1). При его отключении на время t_3 в момент t_1 производительность P к моменту t_2 падает до 0. После восстановления электроснабжения в моменты t_3 и t_4 начинаются ремонтные $t_{рем}$ и восстановительные $t_{тхн}$ работы, а в момент t_5 начинается пуск производства $t_{пуск}$ до выхода на номинальную производительность. В общем виде все перечисленные параметры могут быть разделены на составляющие, являющиеся случайными величинами с любыми функциональными зависимостями. Каждый параметр процесса (рис. 1) может вносить свою долю в суммарный ущерб потребителя в виде недоиспользования производственной мощности, затрат на ремонт, непроизводительного расхода сырья и т.д.

Множество всех агрегатов отдельного j -го потребителя определяется как M^j общим числом N_{M^j} , а множество его накопителей как D^j общим числом N_{D^j} . Агрегат $m^j \in M^j$ отражает «элементарный участок производства» – наименьший набор производственных механизмов, отделенный от остального оборудования промежуточными накопителями продукции. Останов части агрегата по любой причине приводит к останову всего агрегата.

Элемент модели «накопитель» $d^j \in D^j$ отражает наличие буферных емкостей, осуществляющих хранение продукции и разделение смежных агрегатов. Накопитель показывает избыточность связей между участками производства или способность смеж-

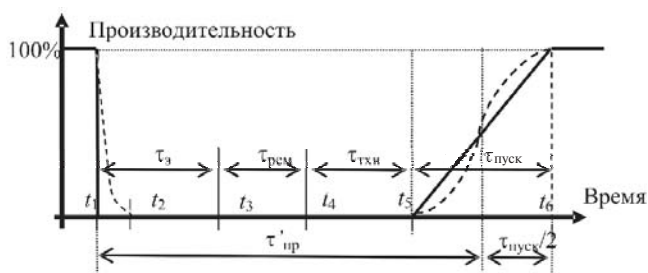


Рис. 1. Срыв и восстановление производственного процесса агрегата при внезапном нарушении электроснабжения

ных с накопителем агрегатов работать какое-то время независимо. Как правило, уровень заполнения накопителя – случайная величина с соответствующим законом распределения.

Минимальный объем информации по производственной системе j -го потребителя, необходимый для создания адекватной агрегативной модели.

Параметры агрегатов:

M^j – множество агрегатов j -го потребителя;

$M_{3,0}^j$ – подмножество (список) агрегатов с запретом на отключение: если «1», то агрегат принадлежит подмножеству, если «0» – нет;

$M_{запр}^j$ – подмножество (список) агрегатов с запрещенным вынужденным остановом: если «1», то агрегат принадлежит подмножеству, если «0» – нет;

$Gr_m^j(t)$ – функция нормального изменения состояния агрегата m^j (производственный график, технологический регламент);

$t_{эм}$ – длительность отключения электроснабжения агрегата m ;

$t_{тхнм} = f_{тхнм}(t_3)$ – длительность технологической подготовки к пуску агрегата m ;

$t_{пмм} = f_{пмм}(t_3)$ – приведенная длительность пуска агрегата m .

Параметры накопителей:

D^j – множество накопителей j -го потребителя;

$V_{max d}$ – предельный верхний уровень заполнения накопителя d ;

$V_{min d}$ – предельный нижний уровень заполнения;

$V_d(t)$ – начальный уровень заполнения накопителя (в момент времени t) или

$N_{кр}(t)$ – закон распределения случайного уровня заполнения в зависимости от времени t .

Параметры технологических связей:

S_v – матрица связанности агрегатов и накопителей: элемент матрицы sv_{md} равен 0, если агрегат m^j не связан с накопителем d^j ($m^j \in M^j; d^j \in D^j$); равен производительности связи, если связь направлена от накопителя m^j к агрегату d^j или равен отрицательной производительности, если наоборот;

Pr – матрица абсолютных величин производительности связей (может совмещаться с матрицей S_v).

Параметры электрических связей:

Z^j – множество присоединений электрической сети;

W^2 – матрица связи системы электроснабжения с производственной схемой: элемент матрицы w_{zm}^2 равен 0, если присоединение $z^j(z^j \hat{=} Z^j)$ не питает агрегат m^j , и равен 1, если питает его.

При необходимости возможно развитие и дополнение прочей информации: составляющих ущербов по элементам модели, желаемых компенсаций, возможных потерь и допустимых вероятностей остановов (рисков) и т.д.

Единым связующим процессом являются изменения состояний элементов модели по времени t , отражаемые фазовыми траекториями агрегатов $X_{mi}^j(t)$ и накопителей $Y_{di}^j(t)$, при отключении i -го набора присоединений электрической сети у j -го потребителя.

Агрегат m^j может находиться в следующих состояниях: $x_m^{(1)}$ – нормальное рабочее состояние агрегата работы с полной загрузкой технологических связей и потреблением мощности P_{mj} ; $x_m^{(2)}$ – нормальное остановленное состояние агрегата в соответствии с производственным графиком (планом); $x_m^{(3)}$ – вынужденное остановленное состояние агрегата вследствие непосредственного отключения его электроснабжения или разрыва технологических связей со смежными накопителями; $x_m^{(4)}$ – состояние технологической подготовки агрегата и выхода его на нормальную производительность (рис. 1). Каждое состояние имеет некоторую длительность t .

В состояниях $x_m^{(3)}$ и $x_m^{(4)}$ материальные потоки по входам–выходам агрегата равны нулю. Длительность состояния $x_m^{(3)}$ зависит от причины вынужденного останова агрегата m^j :

$$t_{x_m^{(3)}} = \begin{cases} t_{\text{э}}, & \text{если } m^j \hat{=} M_i^j \text{ и } t_0 \leq t_{\text{э}}; \\ t_{\text{свmd}}, & \text{если } m^j \hat{=} M_i^j \text{ и } t > t_{\text{э}}, \\ \text{либо } m^j \hat{=} M_{\text{сви}}^j; \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{\text{э}} = t_{\text{э}} - t_0, \quad (2)$$

где $t_{\text{э}}$ – длительность перерыва электроснабжения; t_0 – абсолютное время начала отключения; $t_{\text{э}}$ – абсолютное время окончания отключения; t – текущее модельное время ($t_0 \leq t$); M_i^j и $M_{\text{сви}}^j$ – множества агрегатов, с отключенным электроснабжением и остановленных вследствие разрыва технологических связей соответственно; $t_{\text{свmd}}$ – длительность разрыва связи между агрегатом m^j и соединённым с ним накопителем (или несколькими накопителя-

ми) $d^j \hat{=} D_m^j$, находящимся в критическом состоянии (опустошенном или переполненном) относительно агрегата m^j .

Значение $t_{\text{свmd}}$ определяется по фазовым траекториям соответствующего агрегата $X_{mi}^j(t)$ и связанных с ним накопителей сырья-продукции $Y_{di}^j(t)$.

Длительность состояния $x_m^{(4)}$ определяется пусконаладочными свойствами агрегата m^j :

$$t_{x_m^{(4)}} = t_{\text{технм}} + t_{\text{пм}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{технм}} = f_{\text{технм}}(t_{\text{э}})$ – длительность технологической подготовки к пуску агрегата m^j ; $t_{\text{пм}} = f_{\text{пм}}(t_{\text{э}})$ – приведённая длительность пуска агрегата m^j .

В зависимости от уровня заполнения V накопителя d^j он может находиться в трех состояниях: $y_d^{(1)}$ – состояние, когда $V_{\text{min}d} < V < V_{\text{max}d}$; $y_d^{(2)}$ – переполненное состояние d^j , при котором $V = V_{\text{max}d} y_d^{(3)}$ – опустошённое состояние d^j , при котором $V = V_{\text{min}d}$.

Состояние $y_d^{(2)}$ является критическим для агрегатов со стороны входа накопителя и ведёт к останову данных агрегатов и разрыву (обнулению) связи между накопителем d^j и этими агрегатами: $Sv_{md} = 0$ в матрице инцидентий-производительностей Sv ; состояние $y_d^{(3)}$ является критическим для агрегатов со стороны выхода накопителя.

Уровень заполнения V_d накопителя d^j определяет состояние накопителя в текущий момент времени t и, соответственно, его фазовую траекторию $Y_{di}^j(t)$. Уровень заполнения V_d накопителя d^j меняется по следующему закону – в соответствии с суммой вкладов сырья-продукции от каждого связанного агрегата за промежуток времени $t = t - t_0$:

$$V_d(t) = V_d(t_0) + \int_{t_0}^t \sum_{m^j \hat{=} M_d^j} \dot{V}_{md}(t) dt \quad (4)$$

где $V_d(t_0)$ – начальное значение уровня заполнения накопителя d^j ; $\dot{V}_{md}(t)$ – зависимость производительности агрегата, связанного с накопителем, $m^j \hat{=} M_d^j$ от времени, определяемая фазовой траекторией данного агрегата и заданным значением 100%-й производительности связи между агрегатом m^j и накопителем d^j Sv_{md} :

$$\dot{V}_{md}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_{mi}^j(t) \neq x_m^{(1)}; \\ Sv_{md}, & \text{если } X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}. \end{cases} \quad (5)$$

К началу отключения ($t = t_0 - 0$) агрегат находится в одном из двух нормальных состояний: $x_m^{(1)}$ или $x_m^{(2)}$. Переход в состояние $x_m^{(1)}$ в момент t происходит в двух случаях:

1) при пуске агрегата из нормального остановленного состояния $x_m^{(2)}$ согласно плану

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(2)} \text{ и } Gr_m^j(t) = 1, \quad (6)$$

где $Gr_m^j(t)$ – функция нормального изменения состояния агрегата m^j (производственный график); если $Gr_m^j(t) = 1$, то агрегат согласно плану должен находиться в работе, если $Gr_m^j(t) = -1$, то агрегат должен находиться в нормальном остановленном состоянии;

2) при пуске после необходимых пусконаладочных работ из-за вынужденного останова из состояния $x_m^{(4)}$:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(4)} \text{ и } X_{mi}^j(t-t_{x_m^{(4)}} + 0) = x_m^{(4)}. \quad (7)$$

Переход агрегата m^j в состояние $x_m^{(2)}$ происходит при останове агрегата m^j , находящегося в нормальном рабочем состоянии $x_m^{(1)}$:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(2)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(1)} \text{ и } Gr_m^j(t) = -1 \quad (8)$$

Переход агрегата m^j в состояние $x_m^{(3)}$ происходит при вынужденном останове агрегата m^j , находящегося в нормальном рабочем состоянии $x_m^{(1)}$, из-за отключения электроприёмников:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(3)}, \text{ если } t = t_0 \text{ и } m^j \in M_i^j, \quad (9)$$

или по причине перехода связанных накопителей в критическое состояние по отношению к данному агрегату:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(3)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(1)} \text{ и}$$

$$\begin{aligned} \hat{e} Y_{di}^j(t) = y^{(2)} \text{ хотя бы для одного } d^j \in D_{вхm}^j; \\ \hat{e} Y_{di}^j(t) = y^{(3)} \text{ хотя бы для одного } d^j \in D_{выхm}^j, \end{aligned} \quad (10)$$

где $D_{вх}$ и $D_{вых}$ – множества накопителей по входным и выходным связям агрегата соответственно.

Переход агрегата m^j в состояние $x_m^{(4)}$ происходит в случае начала пусконаладочных работ на агрегате m^j , который до этого находился в вынужденном остановленном состоянии $x_m^{(3)}$ при перехо-

де связанных накопителей в некритическое состояние:

$$\begin{aligned} X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(4)}, \\ \text{если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(3)}, t > (t_0 + t_3) \text{ и} \\ \hat{e} Y_{di}^j(t) = y^{(2)}, " d^j \in D_{вхm}^j; \\ \hat{e} Y_{di}^j(t) = y^{(3)}, " d^j \in D_{выхm}^j. \end{aligned} \quad (11)$$

Условия перехода (11) соответствуют последовательной схеме запуска внепланово остановленных агрегатов. После перехода всех внепланово остановленных агрегатов в нормальные состояния $x_m^{(1)}$ или $x_m^{(2)}$ дальнейшее моделирование не требуется.

Для иллюстрации изложенных принципов моделирования на рис. 2 приведены фазовые траектории простейшей агрегативной модели, состоящей из двух агрегатов и одного накопителя. Для упрощения принято, что производительность агрегатов одинакова и изменяется скачкообразно от 0 до 100%. Проценты заполненности накопителя приняты условно.

Начало моделирования происходит в момент отключения ТП-1 t_0 , питающей агрегат 1. После отключения агрегата 1 производительность его связей падает до 0 и он перестает выдавать полуфабрикат в накопитель 1. Уровень заполнения накопителя начинает снижаться, поскольку агрегат 2 продолжает работу. Через некоторое время уровень заполнения накопителя становится равен 0 и агрегат 2 переходит в остановленное состояние. Производственный процесс полностью разрушается. В момент времени t_3 электроснабжение агрегата 1 восстанавливается. После технологической подготовки производства происходит пуск агрегата 1, восстановление производительности его связей до 100%, вследствие чего накопитель 1 начинает заполняться. Затем начинается технологическая подготовка и пуск агрегата 2. После этого восстанавливается нормальная работа производственного процесса и дальнейшее моделирование не требуется.

Задачи агрегативного моделирования и их решение. Описанная математическая агрегативная модель производственной системы (1)–(11) может быть записана как имитационная, так и аналитическая. В первом случае составляется алгоритмическая модель производственной системы, что является наиболее простым, но и самым трудоемким решением. Из-за ограниченных возможностей математического аппарата применение аналитических моделей затруднено.

Решением прямой задачи моделирования является совокупность параметров режима элементов математической модели: фазовых траекторий агре-

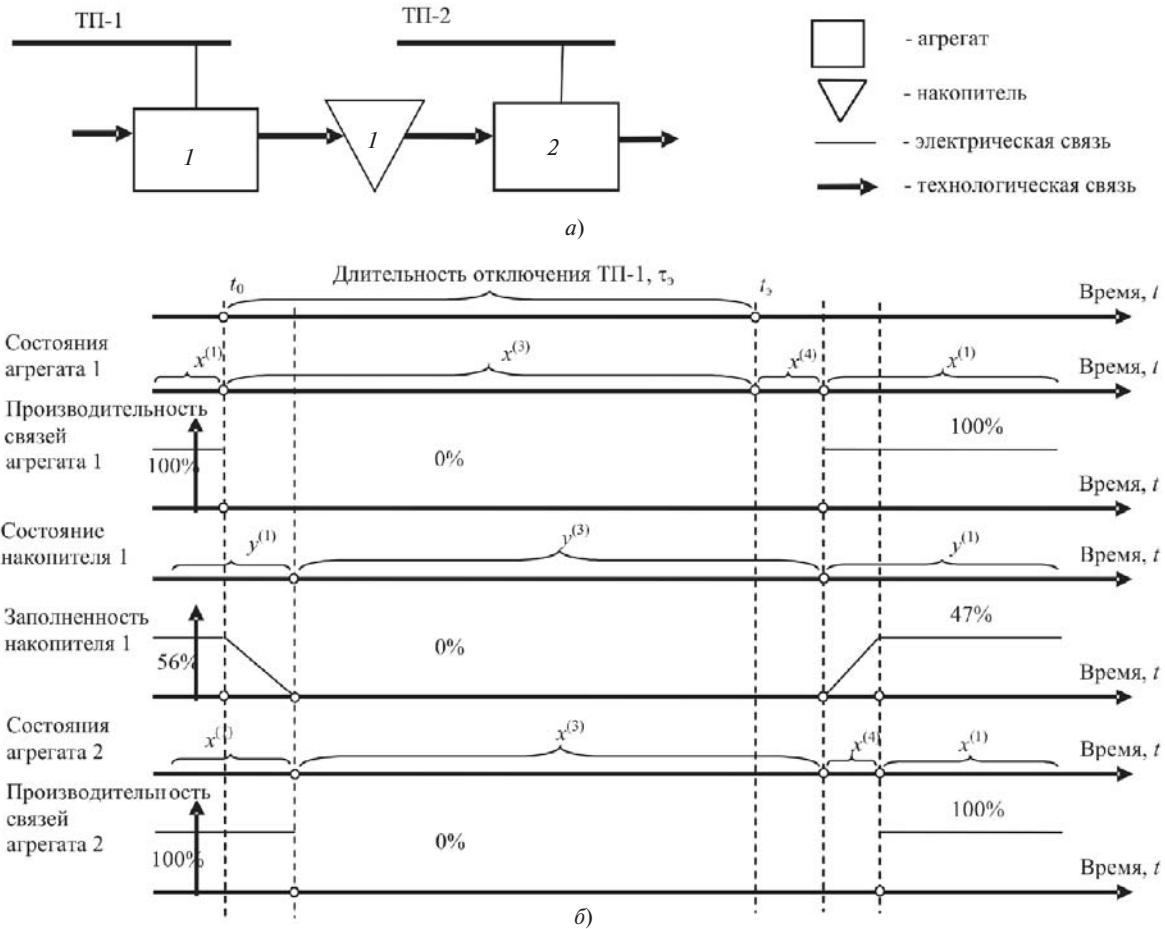


Рис. 2. Пример фазовых траекторий при отключении агрегата 1: а – агрегативная модель; б – фазовые траектории элементов модели

готов и накопителей и их производных величин (скорость изменения параметров, последовательность состояний, достижение критических состояний и т.д.) – вся прочая информация модели является входной и должна быть задана для решения прямой задачи моделирования:

$$\mathbf{P}_{\text{вых.пр}} = F_{\text{пр}}(\mathbf{P}_{\text{вх.пр}}),$$

где $\mathbf{P}_{\text{вых.пр}}$ – выходные параметры: вектор фазовых траекторий элементов модели – агрегатов и накопителей; $\mathbf{P}_{\text{вх.пр}}$ – входные параметры: вектор исходной информации при прямой задаче, включающий информацию о параметрах агрегатов, накопителей сырья-продукции, производительностях связей, их начальных состояниях; $F_{\text{пр}}$ – оператор преобразования прямой задачи моделирования.

В ряде практических случаев для сохранения адекватности модели может потребоваться усложнение описанной модели и ее решения:

в прогнозных расчетах использование приведенного формализованного описания поведения производства усложняется тем, что часть параметров элементов модели (уровни заполнения некоторых накопителей, исходные состояния агрегатов и т.д.) могут быть заданы вероятностно, с произволь-

ным законом распределения, а недетерминировано, как рассматривалось ранее. В этом случае для получения решения применяем метод статистических испытаний на имитационной модели производственной системы [6];

в оптимизационных задачах требуется решение обратной задачи моделирования, например синтез параметров производственной системы (или управляющих воздействий) при наложенных ограничениях на вектор фазовых траекторий элементов модели [6]. При этом возникает необходимость создания оператора преобразования $F_{\text{обр}}$. Простейшим способом создания данного оператора преобразования являются итерационные методы (подбор), использующие на каждой итерации решения прямой задачи алгоритмической имитационной модели.

Пример оценки последствий отключений для выбора рационального варианта управления нагрузкой предприятия при ликвидации дефицита мощности в ЭЭС.

Расчёт характеристик производства – возможных длительностей отключения $t_{\text{воз}}^j$ для i -го набора присоединений – проведен с помощью агрегативной модели. Физический смысл величины

$t_{\text{воз}}^j$ при данной длительности отключения i -го набора присоединений вероятность разрушения оставшегося в работе производственного процесса мала (допустимая вероятность отсутствия вынужденного останова смежных агрегатов $p_{\text{см}}^* = 0,9$).

Агрегативная модель технологической схемы предприятия приведена на рис. 3. В настоящее время все мощности отнесены к технологической броне. Мощность аварийной брони (АБ) незначительна (50 кВт). Договорная мощность предприятия – 2 МВт. Предприятие не участвует в графиках отключений электрической мощности.

За расчётную схему производства принят предельно неблагоприятный случай, когда в работе находятся все агрегаты при полной загрузке с постоянным графиком работы. Исходные данные приведены в табл. 1 и 2. Поскольку уровни заполнения промежуточных накопителей невозможно принять предельно неблагоприятными для производства (тогда при любом частичном отключении производство предприятия незамедлительно остановится), они заданы в виде случайной величины. Установлено, что закон распределения уровней заполнения является равномерным от предельного нижнего уровня заполнения накопителя (ноль) до $V_{\text{max } d}$ – предельного верхнего уровня d -го накопителя:

Номер накопителя	Предельный уровень (верхний) заполнения Т
1	8,0
2	4,7
3	4,7
4	2,8

Расчёт длительностей отключения $t_{\text{воз}}^j$ проводился по алгоритму [6].

Из рис. 3 видно, что оперативно управляемые присоединения 41–44 ЦРП 6 кВ не могут подвергаться внезапному отключению из-за питания агрегатов 4–10, не подлежащих отключению (табл. 1), и наличия мощности аварийной брони. Отключаться могут только присоединения на уровне ТП 0,4 кВ и присоединения РУ-6 кВ (рис. 3). Присоединения 1–3 РУ 6 кВ (агрегаты 1–3 на рис. 3) хотя и могут быть отключены, но на крайне короткий срок (несколько минут), из-за длительного восстановления работы данных агрегатов. Поэтому их участие в отключениях невозможно. Участвовать в отключениях могут только отдельные присоединения всех ТП 0,4 кВ (питающие агрегаты 11–13).

Время, на которое можно отключать различные сочетания этих присоединений, приведено в табл. 3: от 5 до 17% мощности предприятия (100, 350 кВт) могут быть отключены на срок от 1

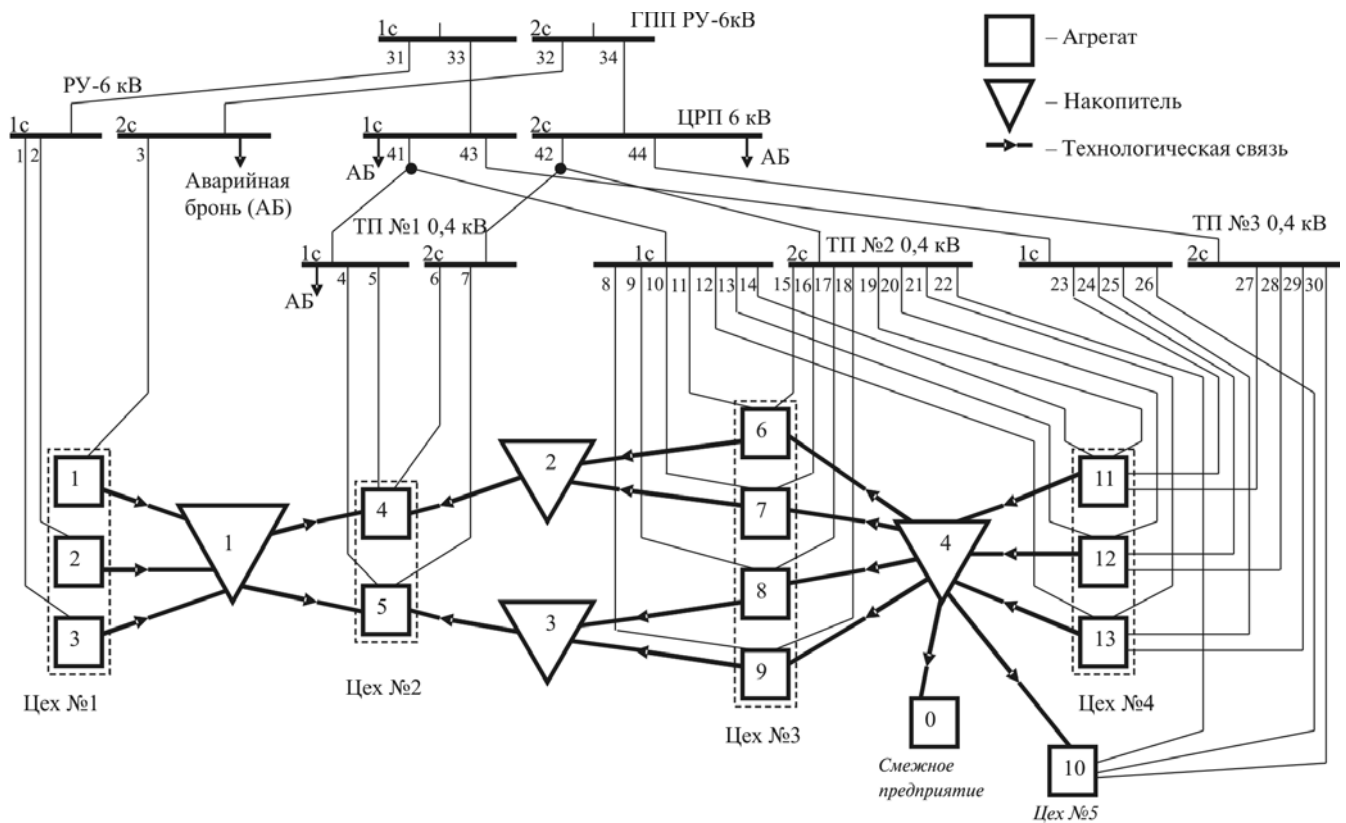


Рис. 3. Агрегативная модель предприятия, совмещённая со схемой его электроснабжения

Таблица 1

Номер агрегата	Потребляемая электрическая мощность, кВт	Отношение к множеству агрегатов		Общее время восстановления работы агрегата	
		с запретом на отключение M_{30}^j	с запрещённым вынужденным остановом $M_{запр}^j$	после возобновления его электроснабжения, ч	остановленного из-за разрыва технологической связи
0	-	(-) *	(+) *	0	0
1	500	(-)	(-)	4	4
2	500	(-)	(-)	4	4
3	0	(-)	(-)	4	4
4	110	(+)	(-)	-	0,08
5	110	(+)	(-)	-	0,08
6	50	(+)	(-)	-	0,08
7	50	(+)	(-)	-	0,08
8	50	(+)	(-)	-	0,08
9	50	(+)	(-)	-	0,08
10	400	(+)	(-)	-	5
11	150	(-)	(-)	1	0,33
12	100	(-)	(-)	1	0,33
13	100	(-)	(-)	1	0,33

Примечание. Знак минус (-) означает, что данный агрегат не принадлежит к множеству; плюс (+) означает, что данный агрегат принадлежит к множеству.

Таблица 2

Агрегаты	Пропускная способность т/ч и направления технологических связей			
	Накопители			
	1	2	3	4
0	0	0	0	-0,02
1	+2,5	0	0	0
2	+2,5	0	0	0
3	0	0	0	0
4	-3	-0,7	0	0
5	-3	0	-0,7	0
6	0	+0,2	0	-0,02
7	0	+0,2	0	-0,02
8	0	0	+0,2	-0,02
9	0	0	+0,2	-0,02
10	0	0	0	-0,04
11	0	0	0	+0,083
12	0	0	0	+0,042
13	0	0	0	+0,042

Примечания. Знак плюс (+) означает, что направление связи – от агрегата к накопителю; если производительность связи равна нулю, это значит, что данные накопитель и агрегат не связаны между собой.

Таблица 3

Набор погашаемых присоединений	Сочетание отключаемых агрегатов	Значение отключаемой мощности, кВт	Возможная длительность отключения $t_{\text{воз}}^j$, ч
14, 19, 23, 27	11	150	4
13, 20, 24, 28 или 12, 21, 25, 29	12 или 13	100	17
14, 19, 23, 27, 13, 20, 24, 28	11 и 12	250	2
14, 19, 23, 27, 12, 21, 25, 29	11 и 13	250	2
14, 19, 23, 27, 13, 20, 24, 28, 12, 21, 25, 29	11 и 12 и 13	350	1
13, 20, 24, 28, 12, 21, 25, 29	12 и 13	200	4

до 17 ч. На рис. 4 показана зависимость отключаемой мощности от прогнозной длительности отключения $t_{\text{э}} = t_{\text{деф}}$ (данные из табл. 3).

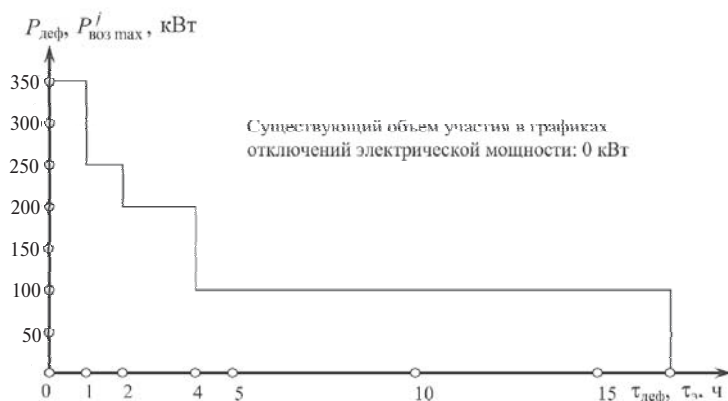


Рис. 4. Зависимость возможной отключаемой мощности от прогнозной длительности отключения $t_{\text{э}}$

Таким образом, предприятие может участвовать в кратковременных отключениях, но при условии, что прогнозный срок действия отключений не должен превышать соответствующей отключенной нагрузке возможной длительности отключения.

Вывод. Разработанная модель позволяет оценить последствия отключений/ограничений потребителей в широком спектре теоретических и практических задач по любым возможным критериям с учетом стохастичности информации и получить любые требуемые числовые характеристики оценок последствий (математические ожидания, вероятности, дисперсии, доверительные интервалы, риски).

На основе полученной модели возможна оптимизация любых параметров: структуры и состава производственных систем потребителей, их систем электроснабжения, параметров технологических установок, различных управляющих воздействий.

Модель использована при разработке концептуального подхода к решению проблемы надежности электроснабжения потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папков Б.В., Куликов А.Л. Основы теории систем для электроэнергетиков /Под ред. Н.И. Воропая. — Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2011, 456 с.
2. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей.— М.: Издат. дом МЭИ, 2010, 188 с.
3. Червонный Е.М. Пособие к дипломному проектированию систем электроснабжения промышленных предприятий. — Горький: Изд. ГПИ им. А.А. Жданова, 1985, 82 с.
4. Папков Б.В., Шарыгин М.В. Организация договорных отношений для управления надежностью электроснабжения потребителей. — Энергетическая политика, 2013, № 3.
5. Папков Б.В., Шарыгин М.В. Эквиваленты потребителей электроэнергии по последствиям отказов электроснабжения. — Проблемы энергетики, 2013, № 7–8, с. 27 – 35.
6. Червонный Е.М., Шарыгин М.В. Рациональное распределение отключаемой мощности между потребителями при ликвидации аварийной ситуации в энергосистеме. — Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики и методы их решения. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006, с. 250–258.

[16.09.14]

Автор: Шарыгин Михаил Валерьевич окончил факультет автоматики и электромеханики Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) в 2002 г. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и совершенствование методов управления нагрузкой для ликвидации аварийных ситуаций в электроэнергетической системе» в НГТУ. Доцент кафедры энергетики, электроснабжения и силовой электроники НГТУ.

Development of a Universal Aggregative Model for Estimating the Consequences from Failures of Power Supply to Consumers

M.V. SHARYGIN

In the majority of electric energy problems connected with estimating the consequences from disconnection of consumers, the macromodeling method is used, which correlates the damage inflicted to consumers and the value of disconnected power and/or undersupplied electric energy. However, this method is an approximate one and does not allow one to obtain adequate assessments of damages in small-scale problems (at the level of an enterprise or lower). In solving such problems, it is advisable to apply the principles of aggregative modeling of production systems, which is the most general and universal approach. The main principles of constructing an aggregative mathematical model of the production systems of electricity consumers for estimating the consequences from failures of power supply to consumers are presented. The presented model differs from the existing ones in being universal in nature and allows one to estimate the consequences from disconnections/limitations of power supply to consumers in a wide range of theoretical and practical problems with respect to any possible criteria and taking stochastic nature of information into account, and to obtain any numerical parameters characterizing the estimates of consequences (mathematical expectations, probabilities, variances, confidence intervals, and risks).

Key words: *electric power supply, consumers, disconnection, consequences, model, assessment*

REFERENCES

1. **Papkov B.V., Kulikov A.L.** *Osnovy teorii sistem dlya elektroenergetikov/Pod redaktsiey N.I. Voropaya* (Fundamentals of the theory of systems for power engineering specialists/Edit. by N.I. Voropai. Nizhnii Novgorod, Publ. Volgo-Vyatsk Academy of Public Administration, 2011, p. 456.
2. **Nepomnyashchii V.A.** *Ekonomicheskiye poteri ot narushenii elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* (Economic losses from violation of electricity supply to consumers). Moscow. Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2010, 188 p.
3. **Chervonnyi Ye. M.** *Posobiye k diplomnomu proektirovaniyu sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* (A Handbook

on Graduation Designing of Industrial Enterprise Power Supply Systems). Gor'kii, Publ. State Polytechnic Institute named A.A. Zhdanov, 1985, 82 p.

4. **Papkov B.V., Sharygin M.V.** *Energeticheskaya politika (Power Engineering Policy)*, 2013, No. 3.

5. **Papkov B.V., Sharygin M.V.** *Problemy energetiki (Power Engineering Problems)*, 2013, No. 7–8, pp. 27–35.

5. **Chervonnyi Ye.M., Sharygin M.V.** *Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. Vypusk 56. Zadachi nadezhnosti reformiruyemykh sistem energetiki i metody ikh resheniya* (Methodical questions of studying the reliability of large energy systems. Issue 56. Reliability problems of energy systems being reformed and methods for solving them. Irkutsk, Publ. L.A. Melent'yev Institute of Power Systems. Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2006, pp. 250–258.

Author: Sharygin Mikhail Valer'yevich (Nizhnii Novgorod, Russia) – Cand. Techn. Sci., Associate Professor at the Nizhnii Novgorod State Technical University.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы
можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс (495)362-7485).

