

РАЗВИТИЕ АГРЕГАТИВНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Для оценки последствий отключений потребителей наиболее часто используется метод макро моделирования, связывающий ущерб потребителей с величиной отключенной мощности и/или недополученной электроэнергией. Этот метод является наиболее простым, но имеющим важный недостаток: он не позволяет получить адекватные оценки ущербов на уровне предприятия и ниже. В таких задачах необходимо применение принципов агрегативного моделирования, которое является наиболее общим подходом.

В статье разработаны универсальные принципы построения и решения математической агрегативной модели производственных систем потребителей электроэнергии для оценки последствий отказов их электроснабжения. Модель позволяет оценить последствия отказов по любым критериям с учетом стохастичности информации и получить требуемые числовые характеристики оценок последствий (математические ожидания, вероятности, дисперсии, доверительные интервалы, риски).

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

ВВЕДЕНИЕ

Разнообразие видов, структур, параметров производственных систем и их элементов долгое время не позволяли создать универсальной методической базы для анализа последствий отключений и ограничений промышленных потребителей. Для решения текущих задач был разработан метод макро моделирования [1–3], связывающий ущерб потребителей с величиной отключенной мощности и/или недополученной электроэнергией. Базой метода являются значения усредненного удельного ущерба по отраслям (руб./кВт·ч, руб./кВт). Анализ метода макро моделирования 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 [4, 5].

Исследование закономерностей поведения производственных систем различных отраслей при их отключениях и ограничениях, а также развитие методов моделирования позволило создать универсальные модели участков производства и правила их функционирования. Результаты исследований легли в основу метода микро моделирования, представляющего по сути агрегативное моделирование [4, 5]. Идея его основана на декомпозиции производственной системы, что позволяет любую степень детализации с целью управление погрешностью. Это обуславливает потенциальную применимость метода во всем спектре задач: от отдельных электроприемников до системообразующей сети.

ОСНОВЫ МЕТОДА АГРЕГАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При преобразовании производственной системы всё разнообразие технологического оборудования отражается тремя элементами – «агрегат» (участки производства), «накопитель» (склады, емкости полуфабрикатов) и «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 τ , в момент t_1 производительность Π к моменту t_2 падает до 0%. После восстановления электроснабжения в момен-

ты t_3 и t_4 начинаются ремонтные $\tau_{\text{рем}}$ и восстановительные $\tau_{\text{тхн}}$ работы, а в момент t_5 – пуск производства $\tau_{\text{пуск}}$ 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 (см. рис. 1) может вносить свою долю в суммарный ущерб потребителя в виде недоиспользования производственной мощности, затрат на ремонт, непроизводительного расхода сырья и т.д.

Пример агрегативной модели завода строительных материалов представлен на рис. 2, а дополнительная исходная информация – в таблице.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ АГРЕГАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Множество всех агрегатов отдельного j -потребителя определяется как M^j , общим количеством N_{M^j} , а множество его накопителей как D^j , общим количеством N_{D^j} . Агрегат $m^j \cdot M^j$ 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. Пример выделения агрегатов производственного процесса показан на рис. 3.

Элемент модели «накопитель» $d^j \cdot D^j$ отражает наличие буферных емкостей, осуществляющих хранение продукции и разделение смежных агрегатов. Накопитель показывает избыточность связей между участками производства или способность смежных с накопителем агрегатов работать какое-то время независимо. Объём накопителя – случайная величина с соответствующим законом распределения. Элемент «связь» отражает влияние агрегата на накопитель и наоборот. Единым связующим процессом являются изменения состояний элементов модели по времени t , отражаемые фазовыми траекториями агрегатов $X_{mi}^j(t)$ и накопителей $Y_{di}^j(t)$.

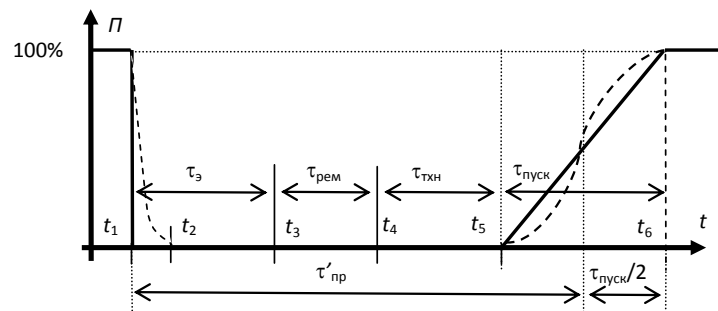


Рис. 1. Срыв и восстановление производственного процесса агрегата при нарушении его электроснабжения

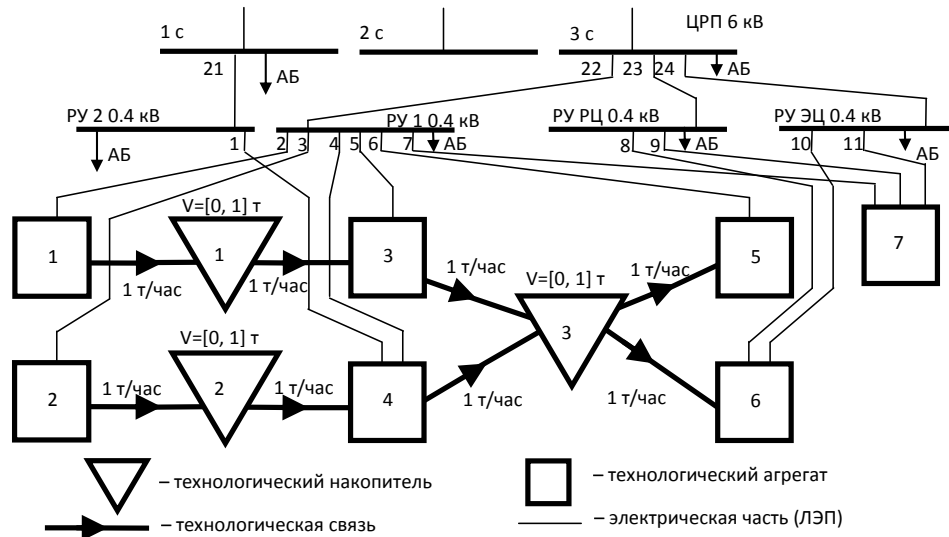


Рис. 2. Агрегативная модель завода строительных материалов, совмещённая с графом схемы его электроснабжения

Параметры агрегатов завода строительных материалов

Номер агрегата	Потребляемая электрическая мощность (зима/лето), кВт	Время возобновления работы агрегата после восстановления электроснабжения, ч	Время восстановления работы агрегата, остановленного из-за разрыва технологической связи, ч
1	40 / 20	0,1	0,1
2	40 / 20	0,1	0,1
3	210 / 130	0,2	0,2
4	200 / 130	0,2	0,2
5	150 / 100	—*	—*
6	210 / 130	—*	—*
7	200 / 130	0,1	0,1

Примечание. Останов агрегатов 5 и 6 приводит к браку продукции и срыву её выпуска.

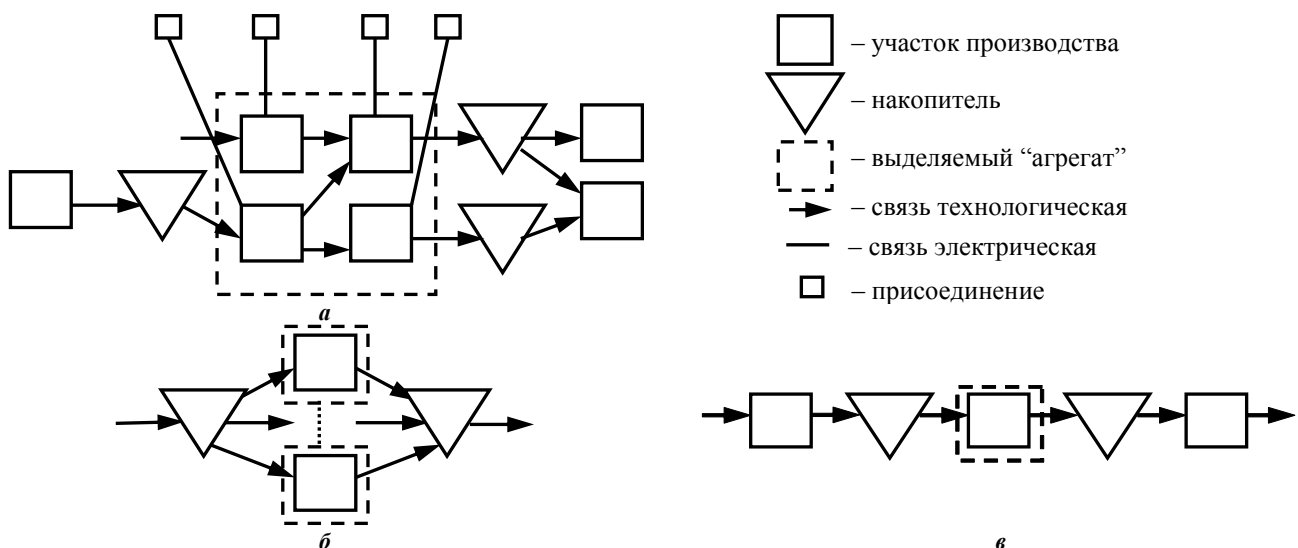


Рис. 3. Выделение агрегатов при преобразовании производственной системы: а – однофазная; б – многоканальная однофазная; в) многофазная схема производства

Пусть X – множество учитываемых состояний произвольного агрегата m^j , состоящее из элементов $\{x_m^{(1)}, x_m^{(2)}, x_m^{(3)}, x_m^{(4)}\}$, где $x_m^{(1)}$ – нормальное рабочее состояние агрегата; $x_m^{(2)}$ – нормальное остановленное в соответствии с планом состояние; $x_m^{(3)}$ – вынужденное остановленное состояние вследствие отключения электроприёмников или из-за разрыва технологических связей; $x_m^{(4)}$ – состояние технологической подготовки агрегата и выхода его на номинальную производительность.

Состояние $x_m^{(2)}$ характерно для агрегатов с циклическим технологическим процессом, когда материальные потоки по входам-выходам равны нулю. Длительности $\tau_{x_m^{(1)}}$ и $\tau_{x_m^{(2)}}$ определяются графиками нормальной или заданной работы агрегата m^j . В состоянии $x_m^{(3)}$ потоки по входам-выходам также равны нулю, а длительность его зависит от причины вынужденного останова m^j :

$$\tau_{x_m^{(3)}} = \begin{cases} \tau_3, & \text{если } m^j \in M_i^j \text{ и } t_0 \leq t \leq t_3, \\ \tau_{\text{св } md}, & \text{если } (m^j \in M_i^j \text{ и } t > t_3), \\ \text{либо } (m^j \in M_{\text{св } i}^j), & \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau_3 = t_3 - t_0,$$

где τ_3 – длительность перерыва электроснабжения; t_0 – начало отключения; t_3 – окончание отключения; t – текущее модельное время ($t_0 \leq t$); $\tau_{\text{св } md}$ – длительность разрыва связи между агрегатом m^j и накопителем $d^j \in D_m^j$, находящемся в критическом состоянии относительно m^j ; $\tau_{\text{св } md}$ – время, определяемое по фазовым траекториям агрегата $X_{mi}^j(t)$ и связанных с ним накопителей $Y_{di}^j(t)$, $d^j \in D_m^j$.

В состоянии $x_m^{(4)}$ потоки по входам-выходам равны нулю, а $\tau_{x_m^{(4)}}$ определяется пусконаладочными характеристиками m^j (см. рис. 1):

$$\tau_{x_m^{(4)}} = \tau_{\text{рем } m} + \tau_{\text{ТХН } m} + \tau_{\text{п } m}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{рем } m} = f_{\text{рем } m}(\tau_3)$ – длительность ремонта m^j ; $\tau_{\text{ТХН } m} = f_{\text{ТХН } m}(\tau_3)$ – длительность технологической подготовки к пуску m^j , $\tau_{\text{п } m} = f_{\text{п } m}(\tau_3)$ – приведённая длительность пуска m^j .

В зависимости от заполнения накопителя d^j , множество его состояний $Y = \{y_d^{(1)}, y_d^{(2)}, y_d^{(3)}\}$, где: $y_d^{(1)}$ – 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 $m^j \in M_{\text{вх } d}^j$ и ведёт к останову данных агрегатов и разрыву (обнулению) связи между накопителем d^j и агрегатами $Sv_{md} = 0$ в матрице инцидентий-производительностей Sv ; Со-

стояние $y_d^{(3)}$ является критическим для агрегатов со стороны выхода накопителя $m^j \in M_{\text{вых } d}^j$.

Уровень заполнения V_d накопителя d^j определяет его состояние в момент t и, соответственно, фазовую траекторию $Y_{di}^j(t)$ за время $\tau = t - t_0$:

$$V_d(t) = V_d(t_0) + \sum_{m^j \in M_d^j} \left[\int_{t_0}^t \text{Пр}_{md}(t) dt \right], \quad (3)$$

где $V_d(t_0)$ – начальное значение уровня накопителя d^j ; $\text{Пр}_{md}(t)$ – зависимость производительности агрегата $m^j \in M_d^j$ от времени, определяемая фазовой траекторией и заданной 100% производительности связи m^j и d^j Sv_{md} :

$$\text{Пр}_{md}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_{mi}^j(t) \neq x_m^{(1)}, \\ Sv_{md}, & \text{если } X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}, \end{cases} \quad (4)$$

К началу отключения ($t < t_0$) 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; 2) при пуске после необходимых пусконаладочных работ из-за вынужденного останова из состояния $x_m^{(4)}$. При этом:

для случая 1:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(2)} \text{ и } Gr_m^j(t) = 1, \quad (5)$$

где $Gr_m^j(t)$ – функция нормального изменения состояния m^j : если $Gr_m^j(t) = 1$, то агрегат, согласно производственному графику, должен находиться в работе, а при $Gr_m^j(t) = -1$ в нормальном остановленном состоянии;

для случая 2:

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(1)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(4)} \text{ и } X_{mi}^j(t - \tau_{x_m^{(4)}} + 0) = x_m^{(4)}. \quad (6)$$

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

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(2)}, \text{ если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(1)} \text{ и } Gr_m^j(t) = -1. \quad (7)$$

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

$$X_{mi}^j(t) = x_m^{(3)}, \text{ если } t = t_0 \text{ и } m^j \in M_i^j, \quad (8)$$

или по причине перехода связанных накопителей в критическое состояние:

$$\begin{aligned}
 & X_{mi}^j(t) = x_m^{(3)}, \\
 & \text{если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(1)} \\
 & \text{и} \begin{cases} Y_{di}^j(t) = y^{(2)}, \\ \text{хотя бы для одного } d^j \in D_{\text{вх } m}^j; \\ Y_{di}^j(t) = y^{(3)}, \\ \text{хотя бы для одного } d^j \in D_{\text{вых } m}^j. \end{cases} \quad (9)
 \end{aligned}$$

Переход в состояние $x_m^{(4)}$ происходит при пуско-наладочных работах на агрегате m^j , который до этого находился в состоянии $x_m^{(3)}$ при переходе связанных накопителей в некритическое состояние:

$$\begin{aligned}
 & X_{mi}^j(t) = x_m^{(4)}, \\
 & \text{если } X_{mi}^j(t-0) = x_m^{(3)}, t > (t_0 + \tau_3), \\
 & \text{и} \begin{cases} Y_{di}^j(t) \neq y^{(2)}, \forall d^j \in D_{\text{вх } m}^j; \\ Y_{di}^j(t) \neq y^{(3)}, \forall d^j \in D_{\text{вых } m}^j. \end{cases} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Условия этого перехода 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 обычно не требуется.

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ РЕШЕНИЕ

Описанная выше математическая модель производственной системы может быть записана как имитационная, так и аналитическая. При первом подходе составляется алгоритмическая имитационная модель производственной системы, что является наиболее доступным, простым, но, вместе с тем, самым трудоемким решением. Аналитическая модель на практике применяется крайне редко в силу ограниченных возможностей математического аппарата.

Решением прямой задачи моделирования назовем совокупность параметров режима элементов модели: фазовых траекторий агрегатов и накопителей и их производных величин (скорость изменения параметров, последовательность смены состояний, достижение критических состояний):

$$\Pi_{\text{вых.пр}} = F_{\text{пр}}(\Pi_{\text{вх.пр}}),$$

где $\Pi_{\text{вых.пр}}$ – выходные параметры: вектор фазовых траекторий элементов модели; $\Pi_{\text{вх.пр}}$ – входные параметры: вектор исходной информации, включающий параметры агрегатов, накопителей, производительности связей, их начальные состояния; $F_{\text{пр}}$ – оператор преобразования.

Пример алгоритма решения прямой задачи имитационной модели и получения фазовых траекторий показан на **рис. 4**. Для снижения погрешности и уменьшения количества операций применяется не пошаговое, а пособытийное продвижение модельного времени. В качестве событий приняты переходы агрегатов и накопителей в любое из состояний, определённых для них в формализованном описании поведения

производства по (1)-(10). Поскольку некоторые события происходят одновременно и являются следствиями других, то при поиске ближайшего события удобно рассматривать группы:

- 1) нормальное изменение режима работы агрегатов с циклическим технологическим процессом путём перехода в состояние $x_m^{(1)}$ или $x_m^{(2)}$;
- 2) переход накопителя в критические состояния $y_d^{(3)}$ или $y_d^{(2)}$ и вынужденный переход агрегата в $x_m^{(3)}$;
- 3) переход агрегата в состояние $x_m^{(1)}$ из состояния $x_m^{(4)}$, а накопителя в некритическое состояние $y_d^{(1)}$.

Совершение событий первой группы определяет производственным графиком нормальной работы, если на производстве есть агрегаты с циклическим технологическим процессом. События из второй и третьей группы происходят одновременно. Времена совершения ближайших в каждой их трёх перечисленных групп событий находятся в блоках 3, 4, 5 (см. **рис. 4**), после чего из них выбираются ближайшие и происходит продвижение модельного времени вперёд (блок 6 на **рис. 4**). На этот же шаг по (3) и (4) просчитываются уровни накопителей (блок 7, см. **рис. 4**). В блоке 8 (см. **рис. 4**) моделируются найденные ближайшие события, то есть изменяются фазовые траектории агрегатов и накопителей.

Все изменения состояний агрегатов и накопителей происходят в соответствии с выражениями (1)-(10).

В ряде случаев для сохранения адекватности модели может потребоваться усложнение описанной модели и/или методов ее решения, например:

- в прогнозных расчетах часть параметров элементов модели (уровни заполнения накопителей, исходные состояния агрегатов) могут быть заданы вероятностно;
- в оптимизационных задачах требуется решение обратной задачи моделирования (синтез параметров производственной системы, управляющих воздействий при наложенных ограничениях на вектор фазовых траекторий). При этом необходимо создание оператора преобразования для данной обратной задачи Гобр. Простейшим способом его создания являются итерационные методы (подбор), использующие на каждой итерации решения прямой задачи алгоритмической имитационной модели.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АГРЕГАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ АГРЕГАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

Агрегативное моделирование как научный метод изначально было создано для определения ущербов промышленных потребителей при отключении или ограничении их электроснабжения (прямая задача моделирования). Для этого в алгоритм (см. **рис. 4**) вводится информация по элементарным составляющим ущерба на каждом участке производства и рассчитывается ущерб по-агрегатно при возникновении событий останова, пуска и т.д. - по фазовым траекториям агрегатов за все время отключения/ограничения. После окончания имитации достаточно суммировать эти ущербы, что бы получить общий ущерб по участкам, цехам, производствам, по предприятиям с необходи-

мой точностью и детальностью по желанию пользователя, выполняющего расчет.

Численные методы позволяют решать и обратные (оптимизационные) задачи, где ущерб является оптимизируемой или заданной величиной. При этом решение прямой задачи моделирования (см. **рис. 4**) используется как основа, ядро решения, с помощью которого получают информацию о поведении производственной системы при вариативных внешних и внутренних параметрах. Во многих практических задачах техническая информация (например, длительности простоя участков, времена останова, изменения электрической мощности при останове/пуске агрегатов), которая использовалась ранее только как служебная для расчета ущербов, приобретает первоочередное значение в качестве критериев оптимизации или ограничений. Например, можно определить:

- рациональные точки воздействия на производственный процесс для реализации системы АЧР или графиков ограничения и отключения [4];
- оптимальные состав и структуру производственной системы [5];
- присоединения электрической сети, где реконструкция необходима в первую очередь.

Практическая работа с агрегативными моделями показала, что некоторые оптимизационные задачи [4] могут решаться и без участия экономической категории ущерба, поскольку эта часть информации, как правило, известна в неполном объеме, а известная - обладает малой степенью достоверности и актуальности. В этих случаях исключение ущерба из параметров моделирования позволяет существенно упростить и ускорить решение задачи, поэтому целесообразно выделить факт участия экономической информации в модели в отдельный классификационный признак.

Таким образом, для классификации агрегативных моделей можно использовать следующие признаки:

- по характеру исходной информации (вероятностная/детерминированная);
- по времени оцениваемого состояния производственной системы (фактическое/прогнозное);
- по цели моделирования производственной системы: определение ущерба/ оптимизация (параметров производственной системы/процесса, системы электроснабжения, оптимизация управленческих решений и множества других задач);
- по использованию экономической информации в модели: используется/ не используется.

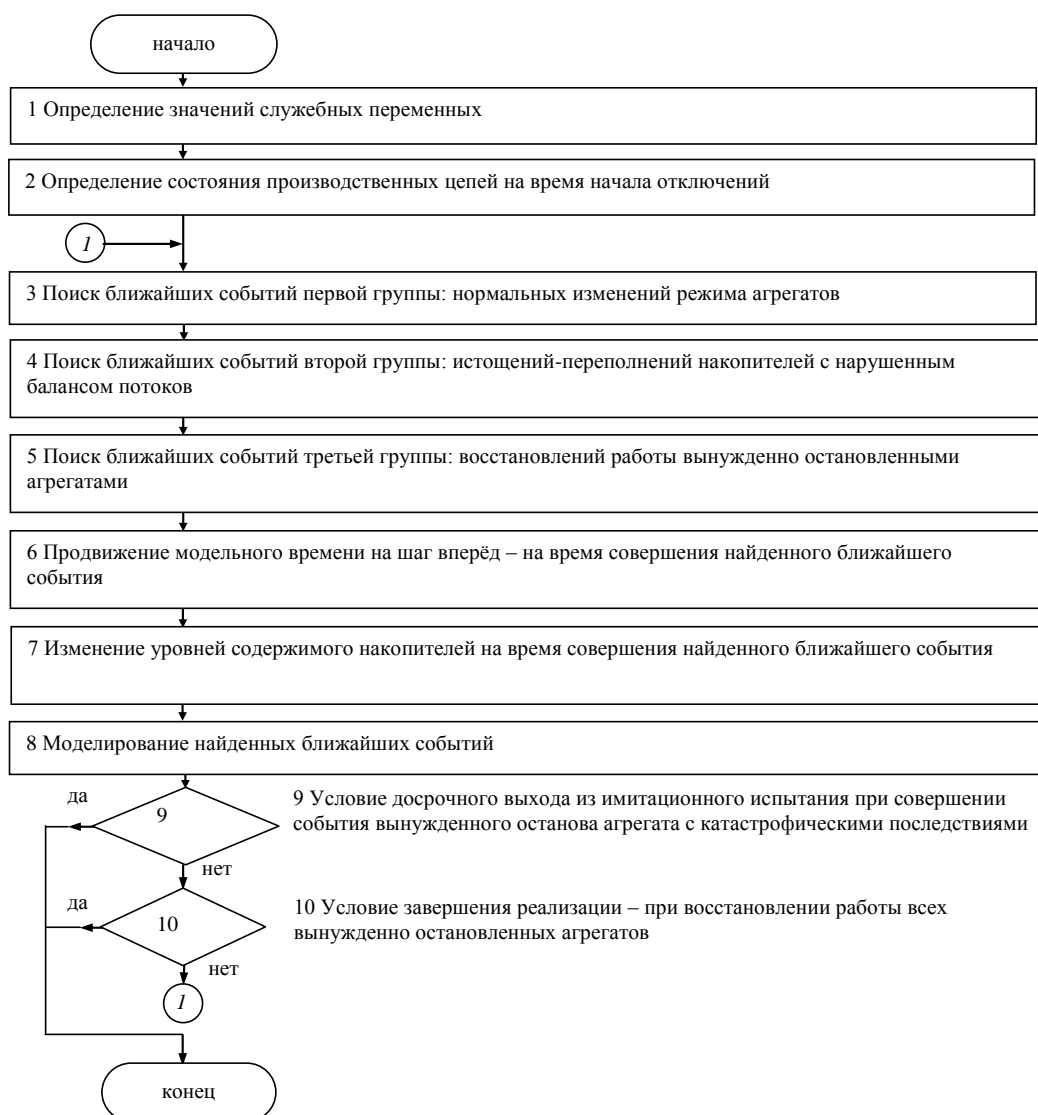


Рис. 4. Блок-схема алгоритмической имитационной агрегативной модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ существующего положения проблемы оценки последствий нарушений электроснабжения объектов производственных систем показал, что необходим новый, более совершенный подход к её решению. Метод агрегативного моделирования производственных систем позволяет продуктивно решать множество инженерных задач электроэнергетики, связанных с оценкой последствий отключения или ограничения производственных систем промышленных потребителей. Его преимущества заключаются в том, что на основе универсальных правил создания математических моделей любых производственных систем предлагаются методы решения прямых и обратных типовых задач моделирования. Практическая работа с агрегативными моделями показала, что ряд оптимизационных задач может решаться без участия категории

ущерба, что позволяет существенно упростить и ускорить решение задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китушин В.Г. Надёжность энергетических систем. М.: Высш. шк., 1984. 256 с.
2. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 188 с.
3. Эдельман В.И. Надёжность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1988. 151 с.
4. 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. Вып. 56. Задачи надёжности реформируемых систем энергетики и методы их решения. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006. С. 250-258.
5. Папков, Б.В., Куликов, А.Л. Основы теории систем для электроэнергетиков. Н.Новгород: Изд-во ВВАГС, 2011. 456 с.

INFORMATION IN ENGLISH

INDIVIDUAL ELECTRICITY CONSUMERS MATHEMATICAL SIMULATION PRINCIPLES FOR CONSEQUENCES ASSESSMENT OF THEIR OUTAGE FROM ELECTRICITY SUPPLY

Sharigin M.V.

The mostly used method for consequences assessment of consumers curtailment is the way of macromodeling which is connecting the consumers damage with the dead power magnitude and/or with the non-received electricity. This method is simple, but it has an important disadvantage: it doesn't allow to get appropriate assessments of damages at the factory level and lower. It is necessary to use the principles of aggregative simulation (which is the common approach) in such situations.

The cross functional principles of mathematical aggregative industrial energy consumers systems model production and determination for consequences assessment of consumers energy curtailment are set up in the article. The model allows to evaluate the consequences of consumers curtailment by all kinds of criterias taking into account stochastic behavior of information and to get required numerical characteristics of consequences assessments (mathematical expectations, probabilities, dispersions, confidential interval, risks).

Keywords: electricity, customers, outage, consequences, model, assessment.

REFERENCES

1. Kitushin V.G. *Nadjozhnost' energeticheskikh sistem* [Reliability of electric power systems]. Moscow: Vishaya shkola. 1984, 256 p.
2. Nepomnjashnij V.A. *Ekonomicheskie poteri ot narushenij elektrosnabzhenija potrebitel'ej* [Economic losses on account of consumer electrical disturbance]. Moscow: Publishing house of MPEI, 2010, 188 p.
3. Jedel'man V.I. *Nadjozhnost' tehniceskikh sistem: ekonomicheskaja ocenka* [Reliability of technical systems: economic evaluation]. Moscow, Economy. 1988, 151 p.
4. Chervonnyj E.M., Sharygin M.V. *Racional'noe raspredelenie otkljuchaemoj moshhnosti mezhdu potrebitel'jami pri likvidacii avarijnoj situacii v energosisteme* [Rational disabled capacity allocation among the consumers within the liquidation of emergency situation in the power system]. *Metodicheskie voprosy issledovanija nadjozhnosti bol'shix sistem energetiki* [Methodical issues of the big energy systems reliability researching]. Vol. 56. The tasks of reliability of reforming energy system and the methods of their solutions. 2006, pp. 250-258.
5. Papkov B.V., Kulikov A.L. *Osnovy teorii sistem dlja elektroenergetikov* [Fundamentals of power generation industries systems theory]. Nizhny Novgorod: The publishing house VVAGS, 2011, 456 p.