



## МОДЕЛЬ БАЛАНСА ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ ЭНЕРГЕТИКИ

*ЕРОХИН А.Л.*

Решается задача построения улучшенной модели баланса целевого продукта в сложных сетях энергетики. На основе исследований графа энергетических связей субординации в классе признаков между поставщиком и потребителями целевого продукта предлагаются улучшенные модели небаланса, которые учитывают флуктуации активных и реактивных составляющих целевого продукта.

### Введение

Рассмотрим класс систем с канальной структурой, в которых имеется сетевая архитектура, множество уровней иерархии, гетерогенные узлы и каналы для транспорта целевого продукта и сложная многоуровневая система управления. Основная функция таких сетей – бесперебойная доставка целевого потребителя по каналам сети от узлов-генераторов через промежуточные узлы к узлам-потребителям [1].

На современном этапе развития информационных, инженерных и электрических сетей наблюдается увеличение многомерных параметров контроля при повышении требований к оперативности и надежности анализа решений. Поэтому актуальной задачей становится поиск улучшенных моделей баланса целевого продукта, который передается по сети, что позволит улучшить качество управленческих воздействий на систему в целом.

### 1. Цель и задачи исследования

Основной целью работы является повышение эффективности управления сложными системами при нештатных ситуациях, оперативности анализа решений человеком-оператором за счет создания улучшенной модели баланса целевого продукта в системе с канальной структурой.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: исследовать топологии системы управления сетями энергетики, разработать уточненную модель баланса целевого продукта, который передается в сложной системе электрического типа с канальной структурой.

### 2. Исследование топологии системы управления сетями энергетики

Рассмотрим модели топологий систем управления в электрических сетях, которые образуют иерархическую структуру подсистем, связанных между собой отношениями субординации и координации [2]. При этом жесткость субординационных связей обеспечивает системе неизменность структуры. Рассмотрим каждую из подсистем как “черный ящик” [2], что позволяет оперировать параметрами их входов-выходов.

Введем понятия: поставщик электрической энергии  $W_s$ , потребитель  $Z_{is}$  электрической энергии. В такой интерпретации любой поставщик  $W_s$  является надсистемой, независимо от того, генерируется им или перерабатывается электрическая энергия. Стационарно распределенные энергопотоки характеризуются установленными режимами поставки-потребления целевого продукта. При этом значения потребляемых активных и реактивных мощностей являются известными, а статистические оценки их циклических изменений – прогнозируемыми. На основе статистики изменений баланса целевого продукта (мощности) определяются интервалы допустимых изменений  $\pm \Delta I$ ,  $\pm \Delta P$  соответственно в геоинформационной системе (ГИС) управления электрическими сетями [4]. Любой выход параметров целевого продукта за пределы  $\pm \Delta I$ ,  $\pm \Delta P$  система управления начнет квалифицировать как нестандартную ситуацию, подлежащую немедленной классификации и распознаванию.

Наиболее простая топология ГИС задана на метрическом двумерном пространстве (на географической карте). С точки зрения анализа энергетических потоков более информативной топологией является множество энергетических параметров, определяющих структуру связей входов-выходов между подсистемами. Указанные множества ( $W_s, Z_{sj}$ ) по одному из мгновенных значений токов  $I_t$ , напряжений  $U_t$  или мощности  $P_t$  могут быть разбиты на классы топологически эквивалентных признаков. Вспомогательными информационными параметрами являются частота  $\nu_t$  тока и угловые параметры  $\varphi_t$  между фазами. Использование классов топологической эквивалентности дает возможность производить сечения сложных графов связей, преобразуя их в более простые структуры.

Рассмотрим на S-м уровне иерархии подмножество выходов энергетических параметров от поставщика  $W_s$  на входы потребителей  $Z_{is}$ , отнесенных к R классу признаков:

$$W_s \leftrightarrow \bigcup_{i \in M^2} Z_{is}, \quad (1)$$

где  $i_s$  – число потребителей энергии, размещенных упорядоченным образом на  $S$ -м уровне иерархии;  $M^2$  – метрическое пространство, на котором заданы системы связей выходов-входов.

(1) являются отношениями субординации. При декомпозиции сложной системы энергоснабжения по  $R$  классу связи подсистем на уровнях  $S$ ,  $(S+1)$ -й уровень можно рассматривать как многополюсный граф с  $(i+1)$  полюсами. Полюс связей выходов  $W_s$  на уровне  $(S+1)$  по отношению к  $Z_{i_s}$  будет базовым. Для удобства в модели многополюсник (рис. 1) имеет базовую вершину  $W_s^-(1)$  первого суграфа, от которой энергия поступает к потребителям  $Z_{2s}, Z_{3s}, \dots, Z_{(i+1)s}$  энергии, и базовую вершину  $W_s^+(i+2)$  (общий нуль системы) второго суграфа. Отрицательный знак определяет передачу параметрас  $W_s$  на  $Z_{i_s}$ .

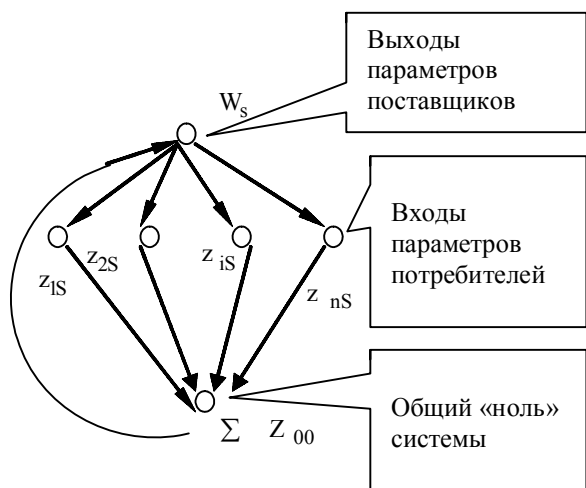


Рис. 1. Граф энергетических связей субординации в классе признаков  $S$  между поставщиком и потребителями

### 3. Разработка модели баланса целевого продукта

Положительный знак базовой вершины  $W_s^+(i+2)$  определяет вход всех нулей от подсистем  $Z_{i_s}$ . Обе базовые вершины связаны между собой отношением тождественности. Структура связей между вершинами и ребрами суграфов в рассматриваемом многополюсном графе представима двумя матрицами инцидентности  $A^+$ ,  $A^-$  [5]. Полюсный граф, совместно с уравнениями связей, определяет зависимости между поперечными и продольными переменными в виде топологических уравнений

$$A^+ \eta_i = 0, \quad (2)$$

$$A^- \xi_i = 0. \quad (3)$$

Для нашей модели поперечными переменными будут значения  $I_{it}$  и  $P_{it}$ , а продольными – значения  $U_{it}$ . Уравнения связей на основании (1) и (2) представля-

ют собой баланс токов и мощностей в системе с распределенными потоками

$$I_t W_s^- = \sum_{i=1}^n I_t Z_{i_s}^+ \quad \text{или} \quad P_t W_s^- = \sum_{i=1}^n P_t Z_{i_s}^+. \quad (4)$$

Считаем, что активные и реактивные нагрузки потребителей являются сбалансированными и не оказывают влияния на изменения частоты  $\nu_t$  тока и угловых параметров  $\varphi_t$ . Перепишем параметры (4) с учетом допустимых изменений  $\pm \Delta I$ ,  $\pm \Delta P$  в виде

$$I_t W_s^- - \sum_{i=1}^n I_t Z_{i_s}^+ = \pm \Delta I, \quad (5)$$

$$P_t W_s^- - \sum_{i=1}^n P_t Z_{i_s}^+ = \pm \Delta P, \quad \forall t \in T.$$

Для принятия адекватного решения по восстановлению целостности системы энергоснабжения, кроме информации об энергетических параметрах, необходимы дополнительные параметры. Так, между подсистемами могут быть определены:

1) ресурсные связи  $R$ , которые для  $W_s$  –  $R^+(\sum P_t^- \times T)$ , а для потребителей  $Z_{i_s}$  –  $R_i^-(\sum P_t^- \times T)$ , в  $T$  – интервале времени;

2) связи  $D$  аварийно-технических и ремонтных служб  $D(x_{sj}, y_{sj}), D_i(p_{sj}, r_{sj})$ , где  $(x, y), (p, r)$  – координаты, определяющие местоположение аварии со стороны поставщика и потребителя соответственно.

Информация о минимальных расстояниях от точки аварии  $(p_{sj}, r_{sj})$  до точки  $(x_s, y_s) \in W_s$  или до точки  $(x_{si}, y_{si}) \in Z_{i_s}$  позволяет выработать оптимальный вариант подключения структур  $D_W$  или  $D_{Z_i}$  для ликвидации аварии.

Выразим связи между поставщиком и потребителями в виде многопараметрической функции

$$W_s((x_s, y_s), P_t^-, \sum_{t \in T} P_t^-, R^+(\sum_{t \in T} P_t^- \times T), \varphi, D(x_{sj}, y_{sj})), \quad (6)$$

$$Z_{i_s}((x_{si}, y_{si}), P_{it}^+, \sum_{t \in T} P_{it}^+, R_i^-(\sum_{t \in T} P_{it}^+ \times T), \varphi, D_i(p_{sj}, r_{sj})), \quad (7)$$

где  $(x_s, y_s), (x_{si}, y_{si})$  – географические координаты поставщика и потребителя, заданные в базах данных;

$P_t^-, P_{it}^+, \sum_{t \in T} P_t^-, \sum_{t \in T} P_{it}^+$  – мгновенные и интегральные мощности поставщика и потребителя соответственно;

$R^+(\sum_{t \in T} P_t^- \times T), R_i^-(\sum_{t \in T} P_{it}^+ \times T)$  – значения ресурсных потоков;  $\varphi$  – мгновенные значения углов между фазами тока;  $D, D_i$  – параметры, характеризующие

структуру аварийно-технических служб поставщика и потребителя.

Для анализа сложной системы энергоснабжения используем три мгновенных энергетических параметра, и баланс мощностей в соответствии с (4), (6) и (7) примет вид

$$PW_s^-(P_t^-, U_t, \rho_t) = \sum_{i=1}^p PZ_{si}^+(P_{it}^+, U_{it}, \rho_{it}), \quad \forall t \in T. \quad (8)$$

В соответствии с (5) выражение (8) перепишем в виде

$$\begin{aligned} PW_s^-(P_t^- + U_t + \phi_t) &\cong \\ &\cong \sum_{i=1}^p PZ_{si}^+(P_{it}^+ + U_{it} + \phi_{it}) \pm \Delta P, \quad \forall t \in T. \quad (9) \end{aligned}$$

Из (9) небаланс мощностей

$$\begin{aligned} PW_s^-(P_t^-, U_t, \phi_t) - \\ - \sum_{i=1}^p PZ_{si}^+(P_{it}^+, U_{it}, \phi_{it}) &\cong \Delta P, \quad \forall t \in T. \quad (10) \end{aligned}$$

Правая часть дисбаланса (9) и (10) представляет собой открытое множество, состоящее из счетного числа элементов, ограниченных сверху и снизу по модулю значения  $2\Delta P$ . Рассмотрим множество

$$\begin{aligned} V_s = \bigcup_{t \in T} Z_t \text{ как совокупность открытых подмножеств:} \\ V_s = \bigcup_{t \in T} \sum_{i=1}^p PZ_{t si}^+(P_{it}^+, U_{it}, \phi) \pm \Delta P. \quad (11) \end{aligned}$$

Введем предикатную переменную, такую, что

$$\Pr(PW_s - V_s) = 1, \quad \forall (PW_s^- - \sum_{i=1}^n PZ_{si}^+ = \pm \Delta P), \quad (12)$$

$$\Pr(PW_s - V_s) = 0, \quad \forall (PW_s^- - \sum_{i=1}^n PZ_{si}^+ \neq \pm \Delta P). \quad (13)$$

Если для всех значений реального времени  $t$  выполняется условие (12), то многополюсник может быть преобразован в двухполюсник, в котором выходной параметр мощности с базового полюса  $W_s$  остается неизменным, а множество параметров мощностей, принятых всеми потребителями  $Z_{si}$ , заменяется их суммой, сосредоточенной в полюсе  $V_s$  (рис. 2).

В реальной системе двухполюсник  $(W_s, V_s)$  с предикатной переменной (12) характеризует стационарное распределение энергопотоков независимо от  $R$  класса эквивалентности и  $S$  уровня. Введем для сложной системы энергоснабжения со стационарным распределением энергопотоков новый элемент

$$\bar{V}_s : [W_s \cup V_s \quad \forall (PW_s^- - \sum_{i \in M^2} PZ_{si}^+ \pm \Delta P = 0)], \quad (14)$$

$\bar{V}_s \in (V)$ , который является минимальным из множества отношений подсистем на любом из  $S$ -уровней

сети. При объединении подсистем по всем классам эквивалентности элементы  $\bar{V}_s \in (V) \quad \forall S = 1, 2, \dots, p$  образуют конечное множество  $(\bar{V}_s)$  со сложившейся структурой связей субординации между подсистемами, как это представлено на рис. 3. Неизменность топологии множества  $(\bar{V}_s)$  является характеристикой стационарности распределения энергопотоков на всех уровнях сети.

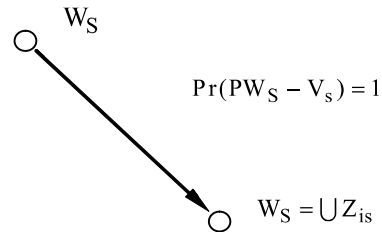


Рис. 2. Двухполюсный граф энергетических связей субординации в классе признаков  $S$  при оптимальном распределении энергопотоков от поставщика к потребителям энергии

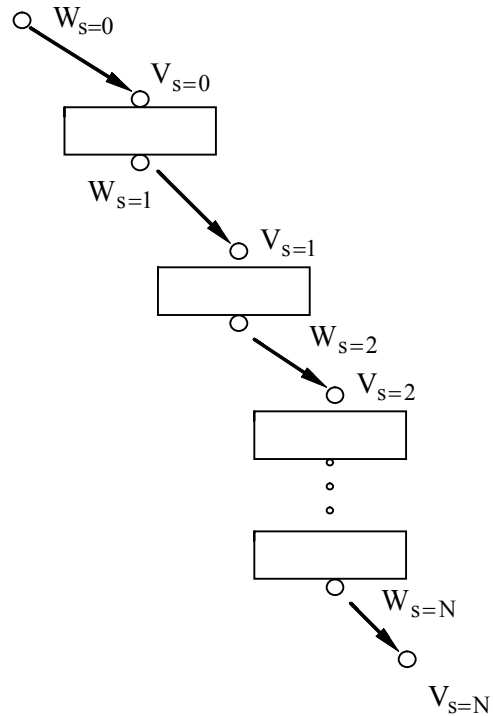


Рис. 3. Линейная организация графов  $(W, V)$  при сохранении баланса мощностей между поставщиками и потребителями

При нарушении баланса мощностей на любом из  $S$  уровней рассматриваемой сети предикатная переменная переходит в состояние (13). В этом случае двухполюсник вновь преобразуется в многополюсник с восстановлением структуры связей выходов-входов. С этого момента начинается информационно-аналитическая деятельность по классификации и распознаванию нестандартной или аварийной ситуации.

Наибольший практический интерес представляет аварийная ситуация, способная вызвать отключение лю-

бой из подсистем с координатами  $(x_{sj}, y_{sj})$ . Отключение означает, что в многополюснике модели произошел разрыв одной или более дуг, связывающих вершины  $W_p \rightarrow Z_{kp}$ . Структура матриц инцидентности  $A^+$ ,  $A^-$  многополюсника оказывается нарушенной из-за появления нулевых элементов  $a_{1k} = 0$ , и топологические уравнения в этом случае будут иметь вид

$$A^+ \eta_i \neq 0, \quad (15)$$

$$A^- \xi_i \neq 0. \quad (16)$$

Возникший небаланс мощностей в системе требует оперативной компенсации активных и реактивных нагрузок. Задача компенсации активных и реактивных мощностей при нестационарном режиме сети энергоснабжения представляет определенные вычислительные трудности [6], ограниченные к тому же дефицитом времени.

Рассмотрим топологию координационных связей между потребителями  $z_{is}$  на  $S$  уровне. Между элементами множества потребителей  $z_{is} \in V_s$ , относящихся к  $R$  классу эквивалентности, нет прямых энергетических связей, кроме общего нуля – базовой вершины  $W_s^+(i+2)$  полярного графа.

Слабая структурированность координационных связей и отсутствие прямых энергетических связей не позволяют решать вопросы компенсации электрической мощности между оставшимися, не отключенными потребителями. Для системы с распределенными электрическими мощностями связи между  $Z_{is} \in V_s$  являются информационно-координационными в режиме ожидания. Структура связей, соединяющих потребителей  $Z_{is} \in V_s$ , образует сеть. При разрыве энергетической связи между  $(W_{1s}^-, Z_{ps}^+)$  происходит отключение  $Z_{ps}$ , и информационно-координационные связи между оставшимися подсистемами  $(V_s \setminus Z_{ps})$  формируют кольцевую структуру в обход  $Z_{ps}$ .

Определим минимальное число информационных параметров, достаточных для мониторинга параметров целевого продукта. Распишем общее значение баланса (8) и (9) мгновенной и интегральной мощностей электрического тока в виде суммы их реактивных и активных составляющих:

$$P_{st}^- \approx (P_{At}^- + P_{Lt}^- + P_{Ct}^-), \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^p P_{sit}^+ \approx \sum_{i=1}^p (P_{Ait}^+ + P_{Lit}^+ + P_{Cit}^+), \quad (18)$$

где  $P_{At}^-$ ,  $P_{Ait}^+$  – значения активных мощностей, поставляемых от поставщика к потребителю;  $P_{Lt}^-$ ,  $P_{Lit}^+$  – значения реактивных индуктивных мощностей;

$P_{Ct}^-$ ,  $P_{Cit}^+$  – значения реактивных емкостных мощностей.

С учетом (17) и (18) выражение баланса (9) перепишем в виде

$$PW_s^- (P_{At}^- + P_{Lt}^- + P_{Ct}^-) \cong \sum_{i=1}^p PZ_{si}^+ (P_{Ait}^+ + P_{Lit}^+ + P_{Cit}^+) \pm \Delta P, \quad \forall t \in T. \quad (19)$$

## Выводы

*Научная новизна полученных результатов.* Проведенные исследования сложной системы с каналной структурой показали, что при работе системы в так называемом штатном режиме возможно использовать традиционное уравнение баланса, которое не учитывает флуктуации инжектированной и потребленной мощностей. Впервые предложено для рассматриваемого класса систем уточненное уравнение баланса, которое учитывает флуктуации целевого продукта при реальной эксплуатации сложной системы.

*Практическая значимость исследования.* Использование разработанного подхода к модели баланса целевого продукта в виде (5), (9) и (19) позволит повысить эффективность работы диспетчера при возникновении нестандартных ситуаций, поскольку параметры активных и реактивных мощностей являются управляемыми, а конечной задачей системы управления можно считать информационно-координационную поддержку принятия решений при возникновении нестандартной или аварийной ситуации.

**Литература:** 1. Гриб О.Г., Ерохин А.Л., Сендерович Г.А., Старков К.А. Проектирование систем электроснабжения. Харьков: ХГАГХ, 2002. 185 с. 2. Лямец В.И., Тевяшев А.Д. Системный анализ. Вводный курс. Харьков: ХТУРЭ, 1998. 252 с. 3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК Изд-во стандартов, 1998. 4. Гриб О.Г., Ерохин А.Л., Светелик А.А. О поддержке принятия решений при аварийных ситуациях в электрических сетях // Проблемы бионики. 2000. Вып. 53. С.28-30. 5. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. К.: Техніка, 1977. 768 с. 6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш.школа, 1985. 536 с.

Поступила в редколлегию 20.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Захаров И.П.

**Ерохин Андрей Леонидович**, д-р техн. наук, начальник кафедры информатики Харьковского национального университета внутренних дел. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пр.50-летия СССР, 27, тел. 739-81-88, e-mail: aayerokhin@ukr.net.

Internet: <http://www.color-dynamic.com>