

* * *

Математическая модель автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии

КИРИЛИН С.В.

Предложена математическая модель управления в автоматизированных информационно-измерительных системах коммерческого учета электроэнергии. Основной алгоритм, представленный в данной модели, реализован в виде программного комплекса, включающего в себя двухуровневую обработку информации для достижения общего оптимального результата достоверизации данных.

Ключевые слова: энергосистема, автоматическое управление, оптимизация, учет электроэнергии, энергобаланс, рынок электроэнергии

В статье описывается построение модели автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета энергии региона (АИИС КУЭ). Проектирование автоматизированной системы охватывает широкий круг вопросов, и поэтому в многочисленных исследованиях, связанных с созданием систем различного назначения, рассматриваются, как правило, лишь отдельные аспекты этой большой работы.

На современном этапе процесс сбора и обработки данных АИИС КУЭ с использованием цифровых электросчетчиков, цифровых каналов, дублирования на каждом этапе от сбора до передачи результатов измерения в центр сбора и обработки данных, как правило, автоматизирован и происходит практически без участия человека. В то же время, в процессе достоверизации данных велика роль человека. Использование же предлагаемого алгоритма, построенного на основании математической модели АИИС КУЭ с использованием дополнительной фильтрации и дополнительной информации об отдельных ветвях и узлах объекта, параметрах работы объекта измерения позволит формализовать работу оператора, отвечающего за достовер-

A mathematical model of control used in automated information and measurement systems for commercial account of electricity is proposed. The main algorithm presented in the model is implemented as a software system incorporating two-level processing of information for achieving the overall optimal result of a data validation process.

Key words: power system, automatic control, optimization, accounting of electric energy, energy balance, electricity market

ризацию данных АИИС КУЭ, а в будущем и полностью автоматизировать и этот процесс.

При разработке модели АИИС КУЭ необходимо учитывать особенности объекта измерения, которые связаны с различными аспектами обмена коммерческой информацией на оптовом рынке в масштабе региона или страны в целом. Системная особенность учета связана с его незаменимостью для планирования, прогнозирования, а также с взаиморасчетами между различными структурами энергосистемы, поэтому особенно важны показатели достоверности и оперативности получения данных. Под моделью чего бы то ни было обычно понимают другой искусственно созданный объект с известной степенью упрощения.

Энергообъекты, а также сам процесс производства, распределения и потребления — это сложный технологический процесс. На каждом этапе от процесса производства до потребления для балансирования процесса необходимо определить с помощью коэффициентов значение потерь электроэнергии. Последние зависят от параметров оборудования, свойств потоков энергии и режима работы энергосистемы. В конечном итоге количество и качество

электроэнергии на каждом энергообъекте зависят от всех предшествующих стадий производства, передачи и распределения.

Представим структуру системы АИИС КУЭ в виде схемы рис. 1.

В статье предлагается и исследуется алгоритм действий при неполной информации о состоянии объекта. Под неполной информацией о состоянии объекта понимается отсутствие доступа к части измерений и/или некоторый объем недостоверных измерений.

Проводя моделирование, энергосистему в целом можно представить в виде сетевого направленного графа. Множество дуг этого графа отражают потоки информации от различных объектов энергосистемы. Множество вершин (узлов) соответствуют объектам (станция, подстанция), укрупненные узлы – иерархическим территориально распределенным объектам, таким как сетевые, сбытовые и генерирующие компании. В модели имеются единичные и балансирующие объекты, которые играют роль развязок. Они не вводятся в модель явно (по крайней мере, в статическую модель), но благодаря им все потоки в системе разделяются на входящие и исходящие. Входящий поток – «производство @ распределение», исходящий – «распределение @ потребление» (рис. 2).

Построение модели АИИС КУЭ проводится по этапам.

Первый этап – подготовка инфраструктурных параметров, т.е. строится система, состоящая из энергообъектов, точек учета, формируется структура основных и контрольных параметров.

Второй этап – ежедневное наполнение расчетной модели реальными результатами измерений, получаемыми от различных АИИС КУЭ. Задача заключается в построении оптимальной технологии материального баланса всего процесса производства, потребления и режимов работы установок. Критерием оптимальности является свертка вектора, состоящего из набора технико-экономических показателей, таких как, например, рентабельность, качество электроэнергии, частота, соотношение нормативных и фактических потерь. Возможны варианты, при которых один или несколько показателей входят в целевую функцию, остальные в систему ограничений.

Задача с учетом всех факторов настолько сложна, что не может быть решена напрямую по какой-то одной модели. Поэтому используется подход, при котором объект представлен как сложная система, т.е. как набор математически разнородных взаимодействующих элементов.

В данном случае предложена модель, имеющая многоуровневую иерархическую структуру. На первом (верхнем) уровне находится базовая модель, т.е. агрегированная матричная модель энергосистемы как целого. Основу этой модели составляет

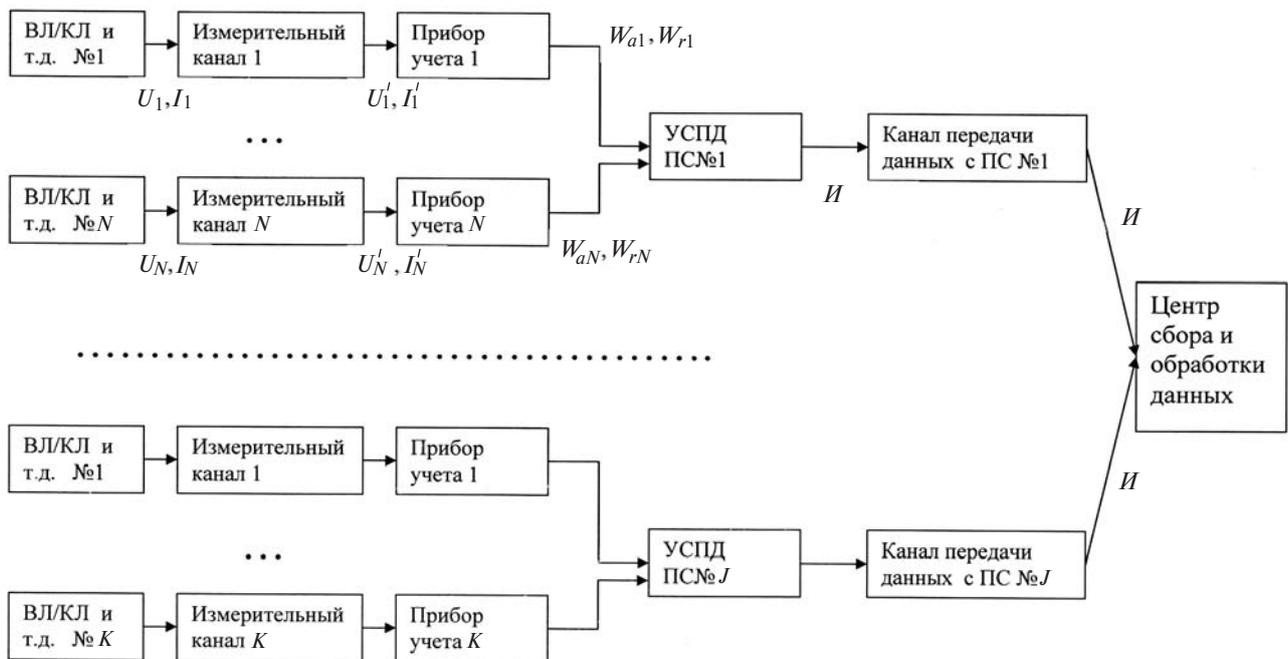


Рис. 1. Структурная схема АИИС КУЭ: U_1, I_1 – реальные значения напряжения и тока в точке измерения (ВЛ, КЛ и т.д.); $U \varphi, I \varphi$ – значения тока и напряжения, полученные после измерительных трансформаторов; W_{a1}, W_{r1} – рассчитанные значения активной/реактивной мощности; I – множество информации по объекту измерения (подстанции, станции и т.п.), в том числе данные учета, состояние элементов системы, журнал событий и т.д.

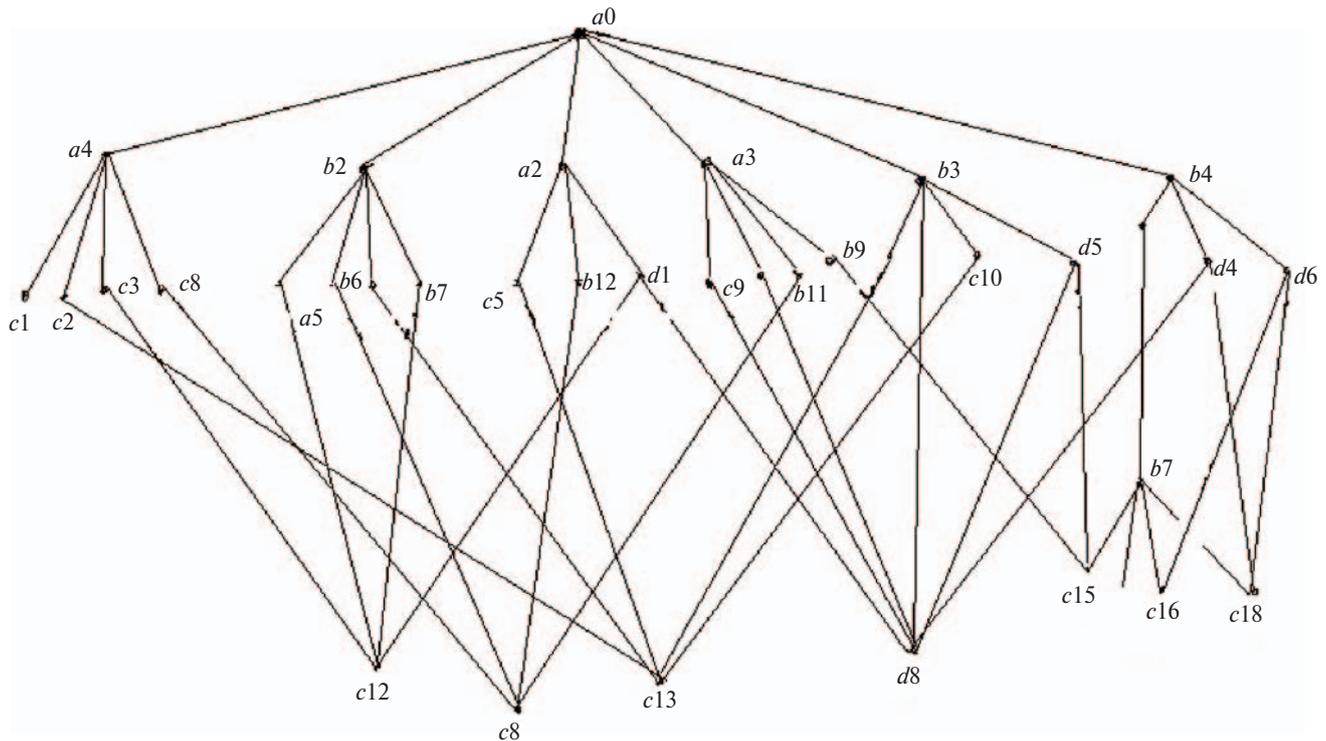


Рис. 2. Граф, отражающий структурную схему АИИС КУЭ

блок «производство – распределение – потребление». Каждый столбец соответствует какому-либо узлу сетевой потоковой модели и рассматривается как агрегат соответствующего объекта – подстанции или энергокомпании. Модели энергообъектов составляют второй уровень системы.

В системе происходит оперирование целой группой различных параметров: к первичным относятся первичные данные коммерческого учета, такие как прием и отдача активной и реактивной энергии, а также группа вторичных (расчетных) параметров, т.е. суммарные параметры сальдо-перетоков, генерации по группам точек поставки. При этом возникает сложная иерархия (соответствующая изначально построенной модели АИИС КУЭ), обеспечивающая расчет суммарных параметров верхнего уровня, каковыми являются потребление отдельных энергообъектов, отдельных территорий, выработка электростанций, сальдо-перетоки с пограничными субъектами.

Поэтому для данного случая и проведения системного анализа применим методологию теории графов, а также оценим характеристики получающегося графа G , по следующим показателям: сбалансированность (общая и отдельных элементов), целостность информационной структуры, управляемость структуры и устойчивость системы.

Для оценки сбалансированности структуры АИИС КУЭ как в целом, так и отдельных ее элементов применим следующие показатели: информационная нагрузка на различных уровнях иерар-

хии (в качестве этого показателя возьмем число информационных потоков), для нашего графа G – это число ребер иерархических вершин – a (A_0, A_n). Для повышения системной эффективности следует стремиться к тому, чтобы информационная нагрузка на каждом иерархическом уровне распределялась как можно более равномерно между всеми звеньями информационной системы. При этом сама информация на различных уровнях иерархии будет, естественно, существенно различной.

При таком подходе взаимодействие между элементами системы осуществляется не прямо, а через посредство «центра». Механизм согласования решений локальных задач (режимов работ отдельных энергообъектов) с целью достижения оптимального общего решения вытекает из представления о модели первого уровня как обобщенной модели на основе метода декомпозиции Данцига–Вулфа и метода обобщенных потенциалов для задач большой размерности с неопределенными факторами, который позволяет свести решение исходной задачи большой размерности к решению серии существенно более простых с вычислительной точки зрения задач, допускающей вариабельность параметров в рамках одной постановки задачи.

Задача решается с помощью вычислительной схемы, которая строится на базе симплексного алгоритма с использованием механизма генерирования столбцов [1]. Столбцы генерируются в результате решения задач второго уровня. Агрегированная матричная модель играет роль координатора

этих решений. Эту функцию она осуществляет путем расчета симплексных мультипликаторов, которые трактуются в данном случае как «теневые оценки» количества электроэнергии и ее параметров. Каждая локальная модель с учетом этих «теневых цен» оптимизирует собственную технологию и, соответственно, коэффициенты представляющего ее столбца «производство – распределение – потребление», а затем передает их в агрегированную матричную модель.

Поскольку при заданных коэффициентах исходящие потоки полностью определяются входящими, задача сводится к расчету интенсивностей входящих потоков, т. е. к расчету количества произведенной электроэнергии, поступающей в энергосистему за определенный период. Пусть J – множество входящих потоков системы, x_j – интенсивность j -го потока. Тогда ограничения по загрузке элементов энергосистемы:

$$\sum_{j \in J_n} \dot{a}_{ij} x_j \in [L_n^-, L_n^+], \quad n \in N, \quad (1)$$

где N – множество энергообъектов; J_n – множество входящих потоков для n -го элемента энергосистемы; L_n^-, L_n^+ – пределы допустимой загрузки n -го элемента.

Ограничения по поставкам топлива, поступающего со стороны:

$$\sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} x_j \in [S_i^-, S_i^+], \quad i \in I_0, \quad (2)$$

где I_0 – множество наименований топлива (газ, мазут, уголь и пр.), поступающего со стороны; S_i^-, S_i^+ – ограничения на поставку (передачу) i -го киловатт-часа; J_i – множество входящих потоков, которыми представлен i -й киловатт-час.

Ограничения по условиям материального баланса для производства электроэнергии:

$$\sum_{n \in N_i} \dot{a}_{in} x_n - \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} x_j = 0, \quad i \in I_1, \quad (3)$$

где I_1 – множество произведенной электроэнергии; N_i – множество генераторов, производящих i -й киловатт-час; a_{in} – коэффициент отбора i -го киловатт-часа в n -й электроустановке.

Ограничения по производству электроэнергии:

$$\sum_{n \in N_i} \dot{a}_{in} x_n - \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} x_j \in [D_i^-, D_i^+], \quad i \in I_2, \quad (4)$$

где I_2 – множество произведенной электроэнергии; D_i^-, D_i^+ – допустимые объемы производства i -го киловатт-часа.

В базовом варианте модели используются упрощенные модели. Если эти требования формулируются в виде интервальных ограничений, то можно записать

$$\sum_{j \in J_m} \dot{a}_{kj} (q_{kj}^- - q_{km}^-) x_j \leq 0; \quad \sum_{j \in J_m} \dot{a}_{kj} (q_{kj}^+ - q_{km}^+) x_j \leq 0; \quad (5)$$

$$m \in M, \quad k \in K_m,$$

где M – множество производимой, передаваемой и потребляемой электроэнергии; K_m – множество показателей качества, контролируемых для m -го киловатт-часа; J_m – множество входящих потоков для точки измерения m -го киловатт-часа; q_{kj} – значение k -го показателя качества для j -го потока; q_{km}^-, q_{km}^+ – нижний и верхний допустимые уровни k -го показателя качества для m -го киловатт-часа соответственно.

Из всех вариантов, удовлетворяющих условиям (1) – (5), необходимо выбрать такой, при котором достигается максимум некоторого критерия. Критерии делятся на две категории: базовые общеэкономические критерии (прибыль, рентабельность) и технико-экономические показатели, специфичные для электроэнергетики (частота, соотношение активной и реактивной мощности и т.п.).

Эти критерии можно выразить как линейные функции интенсивности потоков. Рассмотрим, например, прибыль энергокомпаний. Механизм ее формирования можно представить следующим образом:

$$\Pi = Q - (V + C) = \sum_{i \in I_2} \dot{a}_{iz} z_i - \sum_{i \in I_0} \dot{a}_{i0} c_i^- - \sum_{j \in J_1} \dot{a}_{j1} x_j + \sum_{n \in N} \dot{a}_{n1} b_n \sum_{j \in J_n} \dot{a}_{jn} x_j + C_{\text{fix}} \text{max},$$

где z_i – выход i -го киловатт-часа; c_i^+ – цена i -го киловатт-часа; c_i^- – цена i -го ресурса, поступающего извне; b_n – коэффициент затрат на n -й энергоустановке (имеется в виду стоимость затрат топлива и/или электроэнергии на собственные нужды; в первом приближении можно считать, что эти затраты пропорциональны фактической загрузке установки); I_2 – множество энергокомпаний.

Раскрывая скобки и пренебрегая независимыми от x условно-постоянными затратами, получим целевую функцию в следующей форме:

$$\sum_{i \in I_2} \dot{a}_{iz} z_i - \sum_{i \in I_0} \dot{a}_{i0} c_i^- - \sum_{j \in J_1} \dot{a}_{j1} x_j - \sum_{n \in N} \dot{a}_{n1} b_n \sum_{j \in J_n} \dot{a}_{jn} x_j \text{max}.$$

Ввиду того что выработка электроэнергии не фигурирует в модели как независимая переменная, а выражается через интенсивность входящих пото-

ков (ресурсов), целевую функцию следует записать так:

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} c_j^+ x_j - \sum_{j \in J_1} c_j^- x_j - \sum_{j \in J_n} b_n x_j \rightarrow \max. \\ & \sum_{i \in I_2} c_i^+ x_i - \sum_{i \in I_0} c_i^- x_i - \sum_{i \in I} b_n x_i \end{aligned}$$

Меняя порядок суммирования и осуществляя простейшие преобразования, можно в итоге привести целевую функцию к весьма простому виду:

$$\sum_{j \in J} p_j x_j \rightarrow \max, \tag{6}$$

где p_j – удельное значение j -го потока.

Для удобства дальнейшего изложения запишем модель (1)–(6) в обобщенной канонической форме:

$$\max\{(c, x) \mid Ax = b, x \geq 0\},$$

где c – вектор коэффициентов целевой функции; A – матрица условий; b – вектор ограничений.

Каждый столбец расширенной матрицы этой задачи является представителем (агрегатом) модели соответствующего узла (энергоустановка, сетевой элемент) или, иначе говоря, вектором из некоторого множества:

$$\tilde{a}_j = (c_j a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})^T \in M_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \tag{7}$$

где M_j – множество возможных «перетоков» соответствующего узла.

Решение обобщенной задачи сводится к формированию оптимального базиса путем генерирования столбцов, являющихся крайними точками допустимых множеств.

Поставленная задача решается по следующим этапам.

1. Формирование начального варианта задачи с включением в матрицу условий по одному представителю множеств $M_j, j = 1, 2, \dots, n$. Эта задача решается симплекс-методом с обратной матрицей, находится оптимальный базис и соответствующая ему обратная матрица.

2. Вычисление соответствующих текущему базису симплексных множителей $p = c_B B^{-1}$, где c_B – коэффициенты целевой функции при базисных столбцах; эти множители трактуются в данном случае как условная единица ценности киловатт-часа.

3. Каждая энергоустановка или сетевой элемент оптимизирует собственную работу с учетом ценности входящих и исходящих киловатт-часов:

$$D_j = \min_{c, a} \{(p, a_j) - c_j \mid (c_j \mid a_j)^T \in M_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \tag{8}$$

т.е. каждый узел формирует отклик в виде столбца $a_j = (c_j, a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})^T$, полученного из условия минимизации соответствующей оценки замещения.

4. Проверка условия $D_j = \min\{D_j\} \geq 0$; если оно выполняется, то текущий базис оптимален – переход к п. 6; в противном случае – переход к следующему пункту.

5. Введение в базис столбца $a_v = (c_v, a_{1v}, a_{2v}, \dots, a_{mv})^T$; формирование новой матрицы B^{-1} ; столбец, выводимый из базиса, удаляется из задачи; переход к п. 2.

6. Выдача решения.

Если множества M представляют собой многогранники, то решение, если оно существует, найдется за конечное число итераций. Действительно, представим, что все столбцы, соответствующие крайним точкам этих множеств, введены в модель заранее (что, разумеется, в общем случае сделать практически невозможно), тогда получается обычная задача линейного программирования.

Если же среди M есть множества, не являющиеся многогранниками, то сходимость за конечное число итераций не гарантируется, поскольку такие множества имеют бесконечное число крайних точек. Но в любом случае процесс сходится монотонно и идет до тех пор, пока на двух смежных итерациях не будут получены практически одинаковые результаты.

Пример модели второго уровня. Выражение (8) является обобщенной принципиальной формой записи локальных задач. В реальности каждая из них формулируется на основе модели соответствующего узла. В качестве примера рассмотрим генератор. В этом случае происходит потребление «ресурсов» и выработка целевого продукта, т.е. электроэнергии. На показатели качества и количества наложены ограничения. Оптимизация этого процесса сводится к известной в исследовании операций «задаче о точках на прямой»:

$$\max_x \sum_{n=0}^N f_n(x_n, x_{n+1}) \mid 0 = x_0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_N = L, \tag{9}$$

где L – число генераторов; N – число выработанных киловатт-часов; x – точки перехода электроэнергии от одного энергообъекта к другому; $f_n(x_n, x_{n+1})$ – свертка векторного критерия, характеризующего целевой продукт (киловатт-час) с точки зрения ценности и соответствия показателям качества.

Встроить эту задачу в «монолитную» линейную модель невозможно. При использовании же сис-

темного подхода никаких принципиальных трудностей не возникает. Для этого задачу нужно сформулировать по типу (8), т.е. составить критерий так, чтобы он содержал общесистемную составляющую:

$$f_n(x_n, x_{n+1}) = p_n(x_n, x_{n+1}) - b_n y_n(x_n, x_{n+1}), \quad (10)$$

где p_n – симплексный множитель, сформированный для данного энергообъекта в основной модели и играющий здесь роль его цены; y_n – штрафная составляющая; b_n – коэффициент свертки, с помощью которого задается соотношение между составляющими критерия.

Штрафная составляющая вводится для обеспечения показателей качества. Она представляет собой взвешенную сумму квадратов относительных отклонений (в нижнюю или верхнюю сторону) расчетных значений показателей от заданных:

$$y_n(x_n, x_{n+1}) = \sum_{k=1}^K q_{nk} d_{nk}^2(x_n, x_{n+1}), \quad (11)$$

где K – число показателей качества; q_{nk} – экспертная оценка приоритета показателя; d_{nk} – относительное отклонение расчетного значения показателя от допустимых пределов:

$$d_{nk}(x_n, x_{n+1}) = \begin{cases} (p_{nk} - p_{nk}^+) / p_{nk}^+, & \text{если } p_{nk} > p_{nk}^+; \\ (p_{nk} - p_{nk}^-) / p_{nk}^-, & \text{если } p_{nk} < p_{nk}^-; \\ 0, & \text{если } p_{nk} \in [p_{nk}^-, p_{nk}^+]. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь p_{nk}^-, p_{nk}^+ – нижний и верхний допустимые пределы показателя; $p_{nk} = p_{nk}(x_n, x_{n+1})$ – расчетное значение показателя, которое в общем случае показателей, соответствующих тем или иным вариантам, можно рассчитать по формуле

$$p_{nk}(x_n, x_{n+1}) = I_k \prod_{i=x_n}^{x_{n+1}} a_{ik} D_i \frac{\dot{\vartheta}}{\vartheta} \quad (13)$$

где Γ_{i1}, Γ_{i2} – показатели i -й энергоустановки; I – так называемая индексная функция.

Задача представляется как N -шаговый процесс принятия решений. Под состоянием процесса на n -м шаге понимается начальное измерение; под управлением u_n – число включаемых в текущий процесс измерений электроэнергии; под функцией шагового подхода – $f_n(x_n, x_{n+1})$. Рекуррентное соотношение Беллмана в данном случае:

$$F_n(x_n) = \max_{u_n \in U_n} \{f(x_n, x_{n+1}(u_n)) + F_{n+1}(x_{n+1}(u_n))\}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (14)$$

где U_n – множество допустимых управлений текущего шага (F – функция состояния, $F_N(x_N) = 0$).

При учете потерь (расчетных и фактических) для балансирования системы эффект от внедрения АИИС КУЭ необходимо определять, применяя теорию рисков результатов расчетов как результат сужения интервалов неопределенности. Экономический эффект от внедрения или модернизации измерительных систем коммерческого учета электроэнергии может быть корректно определен с помощью принципа уменьшения риска неопределенности результатов измерений [2].

Общий алгоритм решения поставленной задачи.

1. В области допустимых вариаций измеряемых величин строится сетевой направленный граф таким образом, что множество его путей соответствуют множеству допустимых решений задачи. Узлы группируются по уровням, соответствующим шагам процесса, и образуют множества X_0, X_1, \dots, X_N , причем X_0 и X_N содержат по одному узлу.

2. На каждом шаге (начиная с $n = N-1$ и далее для $n = N-2; N-3; \dots, 0$) для всех $x_n \in X_N$ решается задача (14), в результате определяются условно-оптимальное управление $u_n(x_n)$ и потенциал $F_n(x_n)$.

3. Решение $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ получается при определении каждой следующей оптимальной точки через предыдущую, т.е. по цепочке:

$$x_1 = u_0(0) \rightarrow x_2 = u_1(x_1) \rightarrow \dots \rightarrow x_N = u_{N-1}(x_{N-1}).$$

4. В результате получены оптимальные значения измеряемой величины и коэффициенты столбца, которым эта энергоустановка представлена в основной модели:

$$a_n(p) = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_N}, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Таким образом, для модели первого уровня формируется отклик в виде коэффициентов выхода целевых значений киловатт-часа и зависящих от них оценок достоверности. Эти коэффициенты, в свою очередь, могут повлиять на оценки, и тогда потребуется очередной шаг корректировки решения.

В настоящее время в энергокомпаниях основным способом обнаружения недостоверности в данных АИИС КУЭ является процедура достоверизации данных, т.е. анализ полученных с объектов измерения данных и их оценка различными методами, в основном балансовым. В данном случае

рассматривается идея обнаружения наиболее грубых ошибок в результатах измерения с помощью расчетных фильтров, т.е. фактически определение результата измерения «до» момента получения самого результата измерения.

Для эффективного управления информационной системой обработки данных АИИС КУЭ необходимо располагать по возможности точной информацией о параметрах, характеризующих объект измерения (т.е. режимах работы энергосистемы и основного электрооборудования). Здесь принцип простой: чем больше и точнее информация об измеряемом объекте, тем лучше – в такой ситуации никакие дополнительные расчеты не требуются, однако такая идеальная ситуация бывает не всегда.

Риск неопределенности результата измерения, или риск коммерческого учета – эти понятия следуют из вероятностного характера измерений, характеризующихся той или иной функцией распределения вероятности под влиянием случайных и не исключенных систематических погрешностей. Для практического применения необходимо определить: в чем состоит событие, вероятность события, стоимость последствий. Так, при выполнении каких бы то ни было измерений – событие состоит в получении показания прибора (математического ожидания) с его погрешностью. Причем при прямых однократных измерениях, к которым относится измерение приращения электроэнергии, неопределенность полностью устанавливается показанием прибора при заданной погрешности $\pm D$ и ее достоверной вероятности.

Пусть имеется некоторый результат измерения $P^{ai}(k)$ параметра P в заданный момент k . Предположим, результат данного измерения можно рассчитать через значения результатов других, влияющих параметров несколькими способами, т.е. существует возможность получить совокупность некоторых оценок данного параметра $P_1^p(k)$, $P_2^p(k)$, $P_n^p(k)$. Для идеального случая, когда все результаты измерений не содержат ошибок, данные получены со всех точек измерения в полном объеме, полученные значения должны быть близки друг другу, однако на практике это не так. Применяв принцип обнаружения значения, выпадающего из общей совокупности, можно определить элемент, содержащий ошибку.

Классические методы управления хорошо работают при детерминированном объекте управления и детерминированной среде, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления оптимальными являются нечеткие методы управления. Нечеткая логика является разви-

тием классической логики. При принятии решений по схеме Беллмана–Заде не делается никакого различия между целью и ограничениями. Всякое разделение на цель и ограничения является условным. В традиционной теории принятия решений подобные замены функции предпочтения на ограничение недопустимы. Однако и там прослеживается некоторое скрытое сходство между целями и ограничениями. Оно становится явным при использовании метода неопределенных множителей Лагранжа и штрафных функций, когда цель и ограничения объединяются в одну функцию [3]. В качестве решения в таких случаях обычно выбирают альтернативу с максимальной степенью принадлежности.

Рассмотрим предварительное обнаружение грубых ошибок в результатах измерений на примере измерения перетока электроэнергии по некоторой линии электропередачи. В этом случае исходным для локальной обработки данных является следующее множество данных с учетом структурной схемы АИИС КУЭ (рис. 1):

$$W = \{\{W_{на}\}, \{W_{кон}\}\} = \{P_{i-j}^{ai}, Q_{i-j}^{ai}, I_{i-j}^{ai}, U_i^{ai}, P_{j-i}^{ai}, Q_{j-i}^{ai}, I_{j-i}^{ai}, U_j^{ai}\}. \quad (15)$$

Предлагаемый статический фильтр позволяет обнаруживать аномальные выбросы в результатах измерений исходя из полученных ранее значений анализируемой функции передачи и распределения мощности с учетом потерь электроэнергии:

$$F_1 = DP(P_{i-j}^{ai}, Q_{i-j}^{ai}, U_i^{ai}) = \frac{(P_{i-j}^{ai})^2 + (Q_{i-j}^{ai})^2}{(U_i^{ai})^2} R; \quad (16)$$

$$F_2 = DP(P_{j-i}^{ai}, Q_{j-i}^{ai}, U_j^{ai}) = \frac{(P_{j-i}^{ai})^2 + (Q_{j-i}^{ai})^2}{(U_j^{ai})^2} R; \quad (16a)$$

$$F_3 = DP(Q_{i-j}^{ai}, Q_{j-i}^{ai}) = \frac{(Q_{i-j}^{ai})^2 + (Q_{j-i}^{ai})^2}{X} R; \quad (16b)$$

$$F_4 = DP(P_{i-j}^{ai}, P_{j-i}^{ai}) = P_{i-j}^{ai} - P_{j-i}^{ai}; \quad (16в)$$

$$F_5 = DP(U_i^{ai}, U_j^{ai}, d_{ij}^{ai}) = \frac{(U_i^{ai})^2 + (U_j^{ai})^2 - 2U_i^{ai}U_j^{ai} \cos d_{ij}^{ai}}{Z^2} R. \quad (16г)$$

(Здесь P_{i-j} и Q_{i-j} – результаты измерения значения активной и реактивной мощности соответственно.)

Обнаружение аномального значения измерения основано на том факте, что результаты измерения входят в выражения только для некоторых значе-

ний (в нашем примере для расчета F_1 и F_4). Следовательно, те значения, которые сильно отличаются от оставшихся, однозначным образом определяют значения измерений АИИС КУЭ, которые содержат недостоверные данные. Результаты расчетов показали, что данный метод имеет существенный недостаток, а именно различная чувствительность функций F_1, \dots, F_5 к ошибкам в разных результатах измерений.

При этом предложенный алгоритм имеет ограничение в использовании: для его применения должен соблюдаться критерий наблюдаемости системы. Система является наблюдаемой на отрезке (t_0, t_1) , если ее начальное состояние $X(t_0)$ может быть определено по известному на отрезке (t_0, t_1) значению функций выхода $Y(t)$. Не забывая при этом закон о двойственности управляемости и наблюдаемости системы, установленный Р. Кальманом. Из полной наблюдаемости системы следует ее полная управляемость, а из полной управляемости системы следует ее полная наблюдаемость [4].

Дополнительным фильтром является методика расчета результатов измерений несколькими способами, к примеру, один из которых заключается в решении квадратичного уравнения, причем в качестве неизвестных выступают значения перетоков активной и реактивной мощности. Таким образом, получаем, что один и тот же результат измерения входит в несколько расчетных выражений, для которых характерна различная чувствительность к ошибке. Поэтому в результате проведения анализа этому измерению может быть присвоен статус ошибочного или подозрительного значения, в зависимости от того, какое элементарное множество анализируется.

Для каждого оцениваемого параметра записывается несколько независимых функций, каждая из которых получается в результате расчета на основании результатов других измерений. Составим простейший алгоритм действий по выверке результатов измерений:

$$P_{i-j}^{(1)} = P_{i-j}^{ai}; \tag{17}$$

$$P_{i-j}^{(2)} = P_{i-j}^{ai} + DP_{cp} + (U_i^{ai})^2 G_m + (U_j^{ai})^2 G_m; \tag{17a}$$

$$P_{i-j}^{(3)} = \sqrt{\frac{(U_{i-j}^{ai})^2 (Q_{\phi j} - Q_{\phi i})}{X} - (Q_{\phi j})^2 + (U_i^{ai})^2 G_m}, \tag{176}$$

где

$$DP_{cp} = \frac{1}{2} \frac{(P_{\phi j})^2 + (Q_{\phi j})^2}{(U_i^{ai})^2} R + \frac{(P_{\phi i})^2 + (Q_{\phi i})^2}{(U_j^{ai})^2} R;$$

G_m – расчетный коэффициент потерь активной энергии на i -м элементе сети; вводится, если размер участка достаточно велик и полностью пренебречь потерями нельзя, в противном случае принимается равным 1.

Далее необходимо принять соответствующее решение.

1. Если $P_{i-j}^{(1)}$ отличается от совокупности двух других расчетных результатов измерений, то такое значение P_{i-j}^{ai} признается недостоверным и ему присваивается соответствующий признак и предлагается заменить его расчетным значением

$$P_{i-j}^{ai} = \frac{(P_{i-j}^{(2)} + P_{i-j}^{(3)})}{2}.$$

2. Если $P_{i-j}^{(2)}$ отличается от совокупности двух других расчетных результатов измерений, то такое значение P_{i-j}^{ai} признается недостоверным и ему присваивается соответствующий признак и предлагается заменить его расчетным значением

$$P_{j-i}^{ai} = P_{i-j}^{ai} - DP_{cp} + (U_i^{ai})^2 G_m + (U_j^{ai})^2 G_m.$$

3. Если $P_{i-j}^{(3)}$ отличается от совокупности двух других расчетных результатов измерений, то такое значение P_{i-j}^{ai} рассматривается как подозрительное и ему присваивается соответствующий признак, т.е. в данном случае требуется определить, какое именно из подозрительных измерений является ошибочным. Для этого дополнительно учитываются результаты измерений реактивной мощности в тех же самых точках измерения:

$$Q_{i-j}^{(1)} = Q_{i-j}^{ai}; \tag{18}$$

$$Q_{i-j}^{(2)} = \frac{(U_i^{ai})^2 - U_i^{ai} U_j^{ai} \cos d_{ij}^p - P_{i-j}^{(1)} R}{X} + (U_i^{ai})^2 B_{ш}; \tag{18a}$$

$$Q_{j-i}^{(1)} = Q_{j-i}^{ai}; \tag{186}$$

$$Q_{j-i}^{(2)} = \frac{(U_j^{ai})^2 - U_i^{ai} U_j^{ai} \cos d_{ij}^p - P_{j-i}^{(1)} R}{X} + (U_j^{ai})^2 B_{ш}. \tag{18b}$$

Здесь $B_{ш}$ — расчетный коэффициент потерь реактивной энергии на i -м элементе сети; вводится, если размер участка достаточно большой и полностью пренебречь потерями нельзя, в противном случае принимается равным 1.

Далее для логического алгоритма анализируются расчетные значения, полученные по (18)–(18в), что позволяет выявить ошибку в результатах измерений, полученных от АИИС КУЭ.

Если в рассматриваемом примере имеются дополнительные источники информации (датчики ТИ, данные технического учета и т.п.), обладающие меньшей точностью измерений, то данные результаты измерений могут быть также учтены в предложенном алгоритме, что повышает число операций проверки и позволяет повысить достоверность измерений.

В представленной схеме учитываются также результаты измерений, получаемые от соседних систем АИИС КУЭ, при этом каждому результату измерений присваивается дополнительный признак, зависящий от класса качества той системы АИИС КУЭ, от которой он получен.

После проведения проверки наиболее критических для энергосистемы значений результатов измерений (к каковым относятся результаты измерений, полученные от источников выработки электроэнергии и от граничных с другими энергосистемами элементов сети), появляется возможность использования балансового метода достоверизации результатов измерений.

Балансовый метод основан на законе Кирхгофа и широко и повсеместно используется для достоверизации результатов измерения, поэтому в статье данная методика подробно не рассматривается, так как она хорошо изучена и лишь можно отметить то, что в данной модели алгоритма она является автоматическим фильтром второго уровня, т.е. другими словами фильтром «тонкой очистки».

При создании и анализе функционирования какой-либо системы управления всегда подразумевается какой-либо глобальный критерий ее качества, что является отражением фундаментального принципа целостности, принятого в системном подходе. Для того чтобы определить наличие такого критерия, необходимо подняться на одну или несколько ступеней иерархии в структуре функционирования изучаемого объекта. На основании другого фундаментального принципа системного подхода — принципа декомпозиции — возможен переход от

глобального критерия качества функционирования системы к локальным критериям качества. Это, в свою очередь, позволяет определить структуру математических моделей и топологию соответствующих подсистем управления, обеспечивающих соблюдение требований к локальным критериям качества и, как следствие, достижение экстремальных значений глобального показателя эффективности технологического процесса.

Заключение. Предложенный алгоритм характеризуется небольшим объемом математических вычислений и даже с учетом большого числа обрабатываемых данных (более чем 5000 точек измерения) позволяет выполнять автоматическую обработку данных в режиме, близком к реальному времени.

Дополнительно встраиваемый в модель алгоритм обнаружения грубых ошибок, совмещенный с балансовым методом, тестируется на реальных значениях, получаемых с энергообъектов энергосистемы Самарской области. Наиболее эффективно выявляются ошибки в значениях выработки и потребления активной мощности. Ввиду того что в настоящее время отсутствуют взаиморасчеты за реактивную мощность, в части измерения реактивной мощности число недостоверных данных велико, поэтому и число ложных определений недостоверности в результатах измерения реактивной энергии существенно выше.

Математическая модель обработки данных АИИС КУЭ продолжает проходить опытную эксплуатацию для проверки ее работоспособности. В дальнейшем планируется использовать эту модель для полной автоматизации процесса сбора, обработки и передачи данных АИИС КУЭ регионального уровня на уровень объединенного диспетчерского управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лэсдон Л. Оптимизация больших систем. — М.: Наука, 1975.
2. Осика Л.К. Операторы коммерческого учета на рынках электроэнергии. Технология и организация деятельности: Производств.-практ.пособие. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.
3. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. — Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976.
4. Математические основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп., т. 1./Под ред. Б.К. Чемоданова. — М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2006.

[20.12.12]

Автор: Кирилин Сергей Витальевич окончил в 1999 г. Самарский институт (филиал) Российского государственного торгово-экономического университета. Зам. начальника службы энергетических режимов и балансов Самарского РДУ – филиала ОАО «СО ЕЭС».