

## ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.398

Н.Е. Пацей, В.Т. Придухо

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

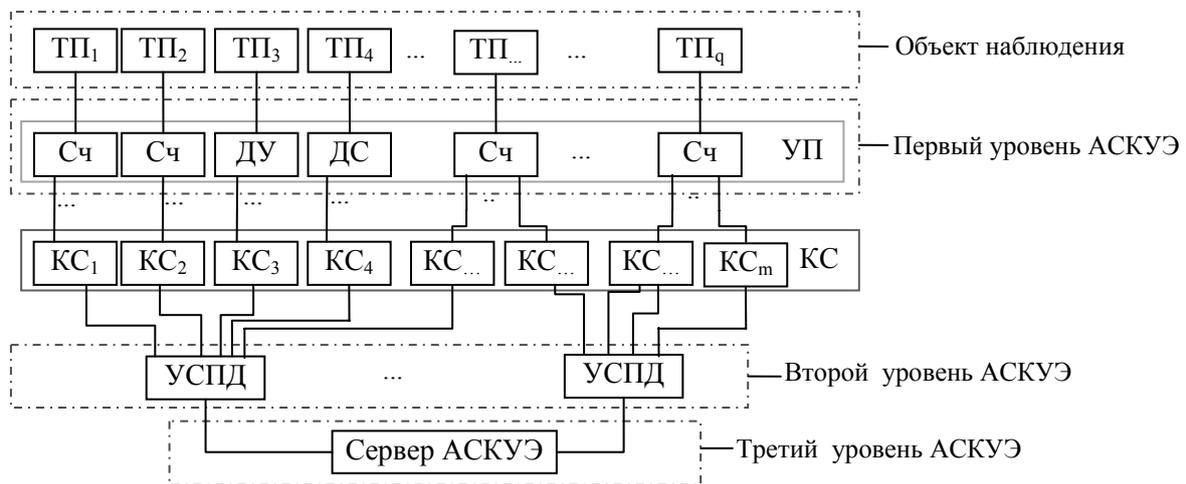
*Предлагается методика проектирования автоматизированных систем учета и контроля электроэнергии технического назначения, использующая методы математического моделирования и многокритериальной оптимизации для поиска рационального проектного зрешения и проверки его работоспособности.*

## Введение

Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) активно внедряются на предприятиях различных сфер деятельности, форм хозяйствования и размера. АСКУЭ являются необходимым условием контроля расхода электроэнергии и управления долей затрат на энергию в себестоимости продукции. За счет повышения точности учета и автоматизации сбора данных эти системы позволяют планировать энергопотребление и снижать затраты на него. В настоящее время они проектируются целым рядом компаний и организаций, среди них ООО «Энергометсистем», СООО «Белтелекарт-М», РУП «БелТЭИ», НПО «Агат», ЗАО «Космос ТВ» и др. Количество предложений и высокий спрос на АСКУЭ свидетельствуют об актуальности проблемы качественного выбора проектного решения.

## 1. Описание объекта

Среди внедряемых в настоящее время систем наиболее распространенными являются проводные трехуровневые (рисунок).



ТП – точки подключения; УП – устройства подключения (датчики управления, датчики сигнализации, счетчики электроэнергии); Сч – счетчики электроэнергии; ДС – датчики сигнализации; ДУ – датчики управления; УСПД – устройства сбора и передачи данных; КС – каналы связи между УП и УСПД

Структурная схема АСКУЭ

Первый уровень представлен совокупностью счетчиков учета электроэнергии. В ряде случаев АСКУЭ дополнительно выполняет функции телеконтроля и телеуправления, для этого на первый уровень системы вводят датчики управления и датчики сигнализации. Второй уро-

вень представлен УСПД, которые выполняют функции сбора данных измерений, энергонезависимого хранения данных по каналам и группам учета, передачи данных на сервер учета, передачи данных между сервером системы, датчиками управления и датчиками сигнализации, синхронизации времени внутренних часов. Третий уровень представлен сервером автоматизированной системы, который выполняет функции сбора данных, их хранения, предоставления для отчета и анализа, диагностики функционирования элементов АСКУЭ, синхронизации и т. д.

Датчики сигнализации используются для контроля состояния оборудования энергосистемы (например, «устройство включено», «подано напряжение»). Датчики управления используются для изменения состояния оборудования энергосистемы (например, «отключить напряжение», «изменить положение контактов»). Счетчики электроэнергии передают данные о потребленной электроэнергии, а также данные о параметрах, максимальных нагрузках в зоне пиковых тарифов, информацию о превышении установленных мощностей. Данные от счетчиков, датчиков сигнализации и управления передаются в виде совокупности бит, длина и формат которой регламентируются протоколом передачи данных, используемым в системе. Передача данных измерения от счетчиков электроэнергии к УСПД происходит периодически, величину периода передачи называют срезом. Передача данных измерения от УСПД на сервер системы также выполняется периодически, величину периода называют отчетным периодом.

Число КС, необходимых для передачи данных от УП, может варьироваться от 1 до 4, при этом один КС может быть подключен к одному УСПД, а КС от одного УП могут быть подключены к разным УСПД. Количество КС фиксировано и определяется техническим заданием. Количество интерфейсов УСПД для подключения КС может варьироваться от 8 до 256.

## 2. Постановка задачи

При выполнении проектных работ решаются задачи [1]:

- определения количества и мест установки УСПД;
- определения набора связей между УСПД и УП;
- выбора устройств, при использовании которых система будет решать поставленные задачи;
- оценки работоспособности системы при заданном режиме работы.

Каждая из решаемых задач из-за многочисленных факторов и их взаимосвязей, влияющих на характеристики системы, представляет собой сложную вариационную задачу, допускающую множество технически возможных решений. Так, общее число вариантов построения системы  $N^s$  может достигать  $m^m$ , где  $m$  – количество КС и максимальное число УСПД. Число возможных сочетаний устройств, удовлетворяющих требованиям системы,  $N^p = F_1^{|G_1|} \times F_2^{|G_2|} \dots \times F_M^{|G_M|}$ , где  $M$  – число наборов элементов системы с одинаковыми параметрами (например, число трехфазных и однофазных счетчиков);  $F_i$  – количество УП или УСПД в одном наборе элементов системы с одинаковыми параметрами;  $|G_i|$  – мощность множества, включающего в себя устройства, которые могут быть использованы для одного набора элементов с одинаковыми параметрами. Из множества существующих решений необходимо выбрать лучшее, что затруднительно при традиционном подходе к проектированию даже для сравнительно простых систем. Поэтому возникает необходимость использования методов многокритериальной оптимизации и математического моделирования для поиска рационального проектного решения и проверки его работоспособности.

В настоящей статье рассматривается решение задачи структурно-параметрического синтеза АСКУЭ на основе построения иерархии операционных моделей системы для различных этапов проектирования с сведением проектных задач к задачам поисковой оптимизации. Поставленная задача решается как многокритериальная и многопараметрическая, при этом поиск рационального решения на каждом этапе осуществляется с использованием оригинального набора критериев, оптимизируемых параметров и метода оптимизации. Показатели качества найденного решения оцениваются при имитационном моделировании работы системы в условиях, близких к реальным. При проектировании системы оптимизируемыми считаются критерии, влияющие на ее стоимость и отказоустойчивость [2]. Стоимость системы является ее важнейшей экономической характеристикой, определяющей возможность и целесообразность реализации проектного решения. Выбор отказоустойчивости системы в качестве критерия обуслов-

лен тем, что для объективной оценки надежности АСКУЭ необходимо выполнить расчет параметров безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [3]. Это не всегда является возможным из-за отсутствия необходимых данных в паспортах элементов системы.

Структурный и параметрический синтезы выполняются при допущении, что в один момент времени возможен отказ только одного элемента. Данное условие принято из расчета средней наработки на отказ элементов АСКУЭ 50 000 ч, а среднее время восстановления этих элементов около 12 ч согласно техническим требованиям к системам коммерческого учета электроэнергии для промышленных предприятий. Применяемые на практике устройства имеют значения этих параметров, равные 90 000 и 2 ч соответственно. Таким образом, вероятность отказа двух элементов системы в один момент времени считаем маловероятной. Однако при выполнении структурного и параметрического синтеза учитывается влияние, которое оказывает отказ элемента на работоспособность других элементов системы (например, отказ УСПД вызовет не только потерю данных, хранящихся в его памяти, но и отказ канала связи между датчиками сигнализации и/или управления, подключенными к нему).

При количественной оценке отказоустойчивости используется принцип гарантированного результата, т. е. оценивается устойчивость системы к отказу элемента, выход которого из строя приведет к наихудшим последствиям. Таким образом, отказоустойчивость системы определяем по максимальному количеству потерянных в результате отказа данных (информационная составляющая) и максимальной стоимости потерянных в результате отказа данных (экономическая составляющая). Использование двух оценок позволяет при отсутствии полной информации о режиме работы объекта наблюдения и АСКУЭ, о тарифах проводить предварительную оценку отказоустойчивости системы по одной из них, а при достаточном объеме информации – комплексную оценку с использованием взвешенных коэффициентов.

### 3. Структурный синтез

На этапе структурного синтеза определяются количество УСПД в АСКУЭ и связи между ними и элементами первого уровня. Увеличение отказоустойчивости системы достигается за счет уменьшения максимума количества данных, потеря которых будет вызвана отказом одного УСПД. Стоимость системы уменьшаем за счет использования меньшего числа УСПД и уменьшения общей протяженности КС. Таким образом, в качестве оптимизируемых параметров используются число УСПД в системе и набор соединений между УСПД и УП.

Параметр 1: число УСПД при выбранной структуре. Чем меньше будет использовано УСПД при выбранной структуре АСКУЭ, тем меньше будет стоимость системы. Однако уменьшение числа УСПД влечет за собой увеличение последствий отказа каждого из них, так как увеличиваются количество и стоимость передаваемых и сохраненных в элементе памяти УСПД данных. Это приведет к уменьшению отказоустойчивости системы. Минимальное количество УСПД ( $n_{min}$ ) определяется количеством КС и максимальным числом физических интерфейсов одного УСПД ( $K_{УСПД}$ ). Максимальное количество УСПД определяется числом КС, необходимых для подключения всех УП.

Параметр 2: общая протяженность КС между всеми УСПД и всеми УП при выбранной структуре. Уменьшение общей протяженности КС приводит к уменьшению стоимости АСКУЭ. Однако это, в свою очередь, может привести к неравномерности распределения данных и их стоимости между УСПД, что вызовет неравнозначность отказов УСПД и затруднит определение мер по предотвращению или уменьшению их влияния на работу системы. Минимальная протяженность КС ( $L_{min}$ ) определяется удаленностью ТП от ближайшего места установки УСПД. Максимальная протяженность КС ( $L_{max}$ ) определяется средой передачи данных (оптоволоконная, беспроводная и т. п.) и протоколом передачи данных.

Таким образом, система параметрических ограничений имеет вид

$$\begin{aligned} n_{min} &\leq n \leq m; \\ L_{min} &\leq L^s \leq L_{max}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $n$  – число УСПД в выбранной структуре;  $L^S$  – общая протяженность КС при выбранной структуре.

Минимальное количество УСПД определяем по формуле

$$n_{min} = \lceil m / K_{\text{УСПД}} \rceil. \quad (2)$$

Изменение перечисленных параметров оказывает влияние на следующие критерии оптимальности, которые, в свою очередь, определяют отказоустойчивость системы к отказам УСПД и ее стоимость.

*Критерий оптимальности 1:* количество данных, передаваемых через УСПД при выбранной структуре. Использование данного критерия обусловлено тем, что вероятности отказа УСПД, предлагаемых производителями, близки и последствия отказа будут определяться количеством потерянных данных. Количество возможных потерянных данных определяем по формуле

$$Y_1 = \max d_{j(\text{УСПД})} \rightarrow \min, j = 1, \dots, n, \text{ бит}, \quad (3)$$

где  $d_{j(\text{УСПД})}$  – количество данных, передаваемых через  $j$ -й УСПД:

$$d_{j(\text{УСПД})} = \sum_{i=1}^m d_i \times h_{ij}, \text{ бит}. \quad (4)$$

Здесь  $d_i$  – количество данных, передаваемых по  $i$ -му КС;  $h_{ij}$  равно 1, если  $i$ -й КС подключен к  $j$ -му УСПД, и 0 – в противном случае.

Данный критерий характеризует информационную составляющую устойчивости системы к отказам УСПД.

*Критерий оптимальности 2:* стоимость данных, передаваемых через УСПД при выбранной структуре. Использование данного критерия также обусловлено соизмеримостью и близостью вероятности отказа УСПД, предлагаемых производителями. Стоимость возможных потерянных данных определяем по формуле

$$Y_2 = \max c_{j(\text{УСПД})} \rightarrow \min, j = 1, \dots, n, \text{ руб.}, \quad (5)$$

где  $c_{j(\text{УСПД})}$  – стоимость данных, передаваемых через  $j$ -й УСПД:

$$c_{j(\text{УСПД})} = \sum_{i=1}^m c_i \times h_{ij}, \text{ руб.} \quad (6)$$

Здесь  $c_i$  – стоимость данных, передаваемых по  $i$ -му КС, руб.

Данный критерий характеризует экономическую составляющую устойчивости системы к отказам УСПД.

*Критерий оптимальности 3:* стоимость оборудования второго уровня

$$Y_3 = C_{\text{УСПД}} \times n \rightarrow \min, \text{ руб.}, \quad (7)$$

где  $C_{\text{УСПД}}$  – стоимость одного УСПД, руб.

Данный критерий участвует в формировании стоимости системы.

*Критерий оптимальности 4:* суммарная стоимость каналов передачи между УП и УСПД

$$Y_4 = C_{\text{УСПД-УП}} \times L^S \rightarrow \min, \text{ бит}, \quad (8)$$

где  $C_{\text{УСПД-УП}}$  – стоимость одного метра КС в рассматриваемом проектном решении, руб./м.

Данный критерий также участвует в формировании стоимости системы.

*Критерий оптимальности 5:* общая стоимость УСПД и КС

$$Y_5 = Y_3 + Y_4 \rightarrow \min, \text{ руб.} \quad (9)$$

Векторная целевая функция имеет вид

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_5) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Постоянными параметрами при проектировании являются число интерфейсов УСПД ( $K_{\text{УСПД}}$ ); множество длин каналов между всеми УСПД и УП (11); множество значений количества данных, передаваемых по каждому КС (12); множество значений стоимости данных, передаваемых по каждому КС (13); множество значений максимальных длин КС, определяемых средой и протоколом передачи данных (14):

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_{m \times m}\}; \quad (11)$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}; \quad (12)$$

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}; \quad (13)$$

$$L_{pr} = \{L_{pr1}, L_{pr2}, \dots, L_{prm}\}. \quad (14)$$

Критерии (3), (5), (7)–(9), целевая функция (10), система параметрических ограничений (1), постоянные параметры (11)–(14) и  $K_{\text{УСПД}}$  представляют собой операционную модель АСКУЭ на стадии эскизного проектирования.

Поиск оптимальной структуры выполняем с помощью генетического алгоритма [4], где решение представляется в виде вектора («хромосома»)  $\mathbf{H}$ , полученного путем последовательного соединения строк матрицы  $\mathbf{S}_{m,m}$ . Элемент матрицы  $S_{ij} = 1$ , если существует соединение между  $i$ -м УП и  $j$ -м УСПД, и  $S_{ij} = 0$ , если данное соединение отсутствует, при этом  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m$ .

Множества  $D, C, L$  представим в виде матриц  $\mathbf{D}_{1,m}, \mathbf{C}_{1,m}, \mathbf{L}_{m,m}$ . Тогда количество данных, передаваемых через  $j$ -й УСПД, вычисляем по формуле

$$d_{j(\text{УСПД})} = \mathbf{D}_{1,m} \times \mathbf{S}_{m,1}^j, j = 1, \dots, m, \quad (15)$$

где  $\mathbf{S}_{m,1}^j$  –  $j$ -й столбец матрицы  $\mathbf{S}_{m,m}$ .

Стоимость данных, передаваемых через УСПД, определяем по формуле

$$c_{j(\text{УСПД})} = \mathbf{C}_{1,m} \times \mathbf{S}_{m,1}^j, j = 1, \dots, m. \quad (16)$$

Минимальную протяженность КС, определяемую удаленностью заданных ТП от ближайшего места установки УСПД, находим по формуле

$$L_{\min} = \sum_{i=1}^m \min(L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{im}), \quad (17)$$

а максимальную протяженность КС, определяемую средой и протоколом передачи данных от заданной ТП, – по формуле

$$L_{\max} = \sum_{i=1}^m \max(L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{im}) \text{ при } L_{ij} \leq L_{prj}, j = 1, \dots, m. \quad (18)$$

Протяженность всех КС для структуры  $\mathbf{S}$  вычисляем по формуле

$$L^S = \sum_{j=1}^m L_j^S, \quad (19)$$

где

$$L_j^S = \mathbf{L}_{1,m}^{jT} \times \mathbf{S}_{m,1}^j, j = 1, \dots, m. \quad (20)$$

Здесь  $\mathbf{L}_{1,m}^{jT}$  – матрица-строка, транспонированная для матрицы  $\mathbf{L}_{m,1}^j$ , элементы которой равны элементам  $j$ -го столбца матрицы  $\mathbf{L}_{m,m}$ .

В качестве функции приспособленности используем нормализованный аддитивный критерий

$$Y = \alpha_1 \times Y_1 / Y_1^{(1)} + \alpha_2 \times Y_2 / Y_2^{(1)} + \alpha_3 \times Y_5 / Y_5^{(1)} \rightarrow \min, \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1, \quad (21)$$

где  $Y_1, Y_2$  и  $Y_5$  – значения частных критериев (3), (5) и (9) соответственно при текущем проектном решении;  $Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}$  и  $Y_5^{(1)}$  – значения частных критериев (3), (5) и (9) соответственно при первом анализируемом проектном решении;  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$  – весовые коэффициенты частных критериев (3), (5) и (9) соответственно.

Изложенный подход был использован для оптимизации структуры существующей АСКУЭ, состоящей из 12 ТП. При равных значениях весовых коэффициентов получаем структуру системы, при которой максимальное количество возможных потерянных данных уменьшилось на 16,4 % при уменьшении максимальной стоимости возможных потерянных данных на 5,2 %.

#### 4. Параметрический синтез

При выполнении параметрического синтеза определяются устройства, которые будут применяться при построении АСКУЭ. Уменьшение стоимости системы достигается за счет использования более дешевого оборудования. Увеличение отказоустойчивости достигается за счет уменьшения вероятности отказа элемента системы, выход из строя которого будет иметь наибольшие последствия. Оптимизируемыми параметрами являются модели устройств первого и второго уровней, выбираемые из базы данных. В зависимости от характеристик ТП и характеристик системы для заданной ТП может быть сформировано множество УП, которые могли бы быть установлены в ней.

Ряд параметров УП определяется свойствами проектируемой АСКУЭ. В случае измерительной подсистемы АСКУЭ это период усреднения  $ts$ , точность учета  $Qua$ , возможность сбора данных о качественных показателях работы сети электроснабжения  $W$ .

Часть параметров УП определяется свойствами ТП. Для измерительной системы это число фаз учета  $n\varphi$ , величина номинального тока  $ni$ , величина номинального напряжения  $ni$ , возможность учета активной энергии в прямом и обратном направлениях  $na$ , возможность учета реактивной энергии в прямом и обратном направлениях  $nr$ .

К параметрам УСПД, определяемым параметрами УП, отнесем протокол передачи данных между УП и УСПД ( $Pt_{(УСПД-УП)}$ ) и физический интерфейс передачи данных между УП и УСПД ( $Int_{(УСПД-УП)}$ ).

К параметрам УСПД, определяемым параметрами сервера АСКУЭ, отнесем протокол передачи данных между сервером системы и УСПД ( $Pt_{(УСПД-СС)}$ ) и физический интерфейс передачи данных между сервером системы и УСПД ( $Int_{(УСПД-СС)}$ ).

К параметрам УСПД и УП, определяемым параметрами проектируемой системы, отнесем число тарифных зон  $nt$ .

Таким образом, систему функциональных ограничений представим в виде подсистемы ограничений УП

$$\begin{aligned}
 n\varphi_{i(\text{УП})} &= n\varphi_{i(\text{ТП})}; \\
 ni_{i(\text{УП})} &= ni_{i(\text{ТП})}; \\
 nu_{i(\text{УП})} &= nu_{i(\text{ТП})}; \\
 na_{i(\text{УП})} &\leq na_{i(\text{ТП})}; \\
 nr_{i(\text{УП})} &\leq nr_{i(\text{ТП})}; \\
 nt_{i(\text{УП})} &\geq nt_{(\text{АСКУЭ})}; \\
 ns_{i(\text{УП})} &\geq ns_{(\text{АСКУЭ})}; \\
 W_{i(\text{УП})} &\geq W_{(\text{АСКУЭ})}; \\
 Qua_{i(\text{УП})} &\leq Qua_{(\text{АСКУЭ})}, i = 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{22}$$

и подсистемы ограничений УСПД

$$\begin{aligned}
 nt_{j(\text{УСПД})} &\geq nt_{(\text{АСКУЭ})}; \\
 Pt_{j(\text{УСПД-СС})} &= Pt_{(\text{СС})}; \\
 Int_{j(\text{УСПД-СС})} &= Int_{(\text{СС})}; \\
 Pt_{ij(\text{УСПД-УП})} &= Pt_{i(\text{УП})}; \\
 Int_{ij(\text{УСПД-УП})} &= Int_{i(\text{УП})}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Данные о доступных на рынке УП и УСПД содержатся в базе данных. На основе ограничений (22) и (23) формируется множество устройств, допустимое к использованию в заданной АСКУЭ.

Изменение перечисленных параметров оказывает влияние на следующие критерии оптимальности, которые, в свою очередь, определяют устойчивость системы к отказам УСПД и УП, а также стоимость системы.

*Критерий оптимальности 1:* стоимость используемого оборудования

$$Y_6 = \sum_{i=1}^m c_i + \sum_{j=1}^n c_j \rightarrow \min, \tag{24}$$

где  $c_i$  – стоимость УП, подключаемого к  $i$ -й ТП, руб.;  $c_j$  – стоимость  $j$ -го УСПД, руб.

*Критерий оптимальности 2:* отношение количества потерянных при отказе данных к количеству сохраненных данных в системе

$$Y_7 = I^o / (I - I^o) \rightarrow \min, \tag{25}$$

где  $I$  – общее количество данных, передаваемых между элементами системы, бит;  $I^o$  – количество данных, потерянных в результате отказа элемента системы, бит.

Данный критерий характеризует информационную составляющую отказоустойчивости АСКУЭ. Оценку критерия проводим по максимальной потере данных для каждого анализируемого типа отказа с учетом вероятности его возникновения.

*Критерий оптимальности 3:* отношение стоимости потерянных при отказе данных к стоимости данных, сохраненных в системе

$$Y_8 = C^o / (C - C^o) \rightarrow \min, \quad (26)$$

где  $C$  – общая стоимость данных, передаваемых между элементами системы, руб.;  $C^o$  – стоимость данных, потерянных в результате отказа элемента системы, руб.

Данный критерий характеризует экономическую составляющую отказоустойчивости АСКУЭ. Оценку критерия проводим по максимальной стоимости потерянных данных для каждого анализируемого типа отказа с учетом вероятности его возникновения.

Векторная целевая функция имеет вид

$$Y = (Y_6, Y_7, Y_8) \rightarrow \min. \quad (27)$$

Постоянными параметрами при параметрическом синтезе являются множество значений количества данных, передаваемых по каждому КС (12); множество значений стоимости данных, передаваемых по каждому КС (13); множество значений максимальных длин КС, определяемых средой и протоколом передачи данных (14); число интерфейсов УСПД ( $K_{\text{УСПД}}$ ) и структура системы, полученная на этапе структурного синтеза и представленная в виде матрицы  $S_{m \times n}$ .

Критерии (24)–(26), целевая функция (27), система параметрических ограничений (22), (23), постоянные параметры (12)–(14),  $S_{m \times n}$  и  $K_{\text{УСПД}}$ , представляют собой операционную модель АСКУЭ на стадии технического проектирования.

Для решения задачи использовали метод исследования пространства оптимизируемых параметров [5]. Метод заключается в генерации множества проектных решений и формировании на его основе множества Парето. Отличительная черта метода – систематический просмотр многомерной области проектных решений в режиме диалога проектировщика и ЭВМ с удалением неперспективных вариантов, что позволяет оперировать привычными для проектировщика величинами, видя, какой выигрыш по одним критериям могут дать уступки по другим. Для принятия окончательного решения используем нормализованный аддитивный критерий

$$\min Y = \beta_1 \times Y_6 / Y_6^{(1)} + \beta_2 \times Y_7 / Y_7^{(1)} + \beta_3 \times Y_8 / Y_8^{(1)}, \quad \sum_{h=1}^3 \beta_h = 1, \quad (28)$$

где  $Y_6, Y_7, Y_8$  – значения частных критериев (24)–(26) соответственно при текущем анализируемом проектном решении;  $Y_6^{(1)}, Y_7^{(1)}, Y_8^{(1)}$  – значения частных критериев (24)–(26) соответственно при первом анализируемом проектном решении;  $\beta_1, \beta_2$  и  $\beta_3$  – весовые коэффициенты частных критериев (24)–(26) соответственно.

Анализ опытной системы проводили:

- для отказа УП, не повлекшего отказ элемента памяти, или отказа канала передачи данных между УП и УСПД;
- для отказа УП, повлекшего отказ элемента памяти;
- для отказа УСПД, не повлекшего отказ элемента памяти, или отказа канала передачи данных между УСПД и сервером системы;
- для отказа УСПД, повлекшего отказ элемента памяти.

Для каждого типа отказа сформировали множество значений информационных оценок устойчивости системы к отказам устройств, для которых характерен данный тип отказа, и множество значений экономических оценок устойчивости системы к отказу устройств, для которых характерен данный тип отказа. В результате были сформированы следующие множества:

$$I_{(\text{КУП})}^o = \{I_{ij(\text{КУП})}^o\}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n; \quad (29)$$

$$I_{(\text{УП})}^o = \{I_{i(\text{УП})}^o\}, \quad i = 1, \dots, m; \quad (30)$$

$$I_{(КУСПД)}^o = \{I_{j(КУСПД)}^o\}, j = 1, \dots, n; \quad (31)$$

$$I_{(УСПД)}^o = \{I_{j(УСПД)}^o\}, j = 1, \dots, n; \quad (32)$$

$$C_{(КУП)}^o = \{C_{ij(КУП)}^o\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n; \quad (33)$$

$$C_{(УП)}^o = \{C_{i(УП)}^o\}, i = 1, \dots, m; \quad (34)$$

$$C_{(КУСПД)}^o = \{C_{j(КУСПД)}^o\}, j = 1, \dots, n; \quad (35)$$

$$C_{(УСПД)}^o = \{C_{j(УСПД)}^o\}, j = 1, \dots, n. \quad (36)$$

Элементы множеств (29)–(36) рассчитали соответственно по формулам

$$Z_{ij(КУП)}^o = z_{ij} / \left( \sum_{x=1, x \neq i}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} + (t-1) \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} + T_{sev} \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} \right); \quad (37)$$

$$Z_{i(УП)}^o = z_{ij} \times c_{ij} / \left( \sum_{x=1, x \neq i}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} + (t-1) \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} + T_{sev} \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} \right); \quad (38)$$

$$Z_{j(КУСПД)}^o = \sum_{i=1}^m z_{ij} \times c_{ij} / \left( \sum_{x=1}^m \sum_{y=1, y \neq j}^n z_{xy} \times c_{xy} + (t-1) \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} + T_{sev} \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} \right); \quad (39)$$

$$Z_{j(УСПД)}^o = t \times \sum_{i=1}^m z_{ij} \times c_{ij} / \left( (t-1) \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1, y \neq j}^n z_{xy} \times c_{xy} + T_{sev} \times \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n z_{xy} \times c_{xy} \right), \quad (40)$$

где  $Z_{ij(КУП)}^o$  – элемент множества (29) или (35);  $Z_{j(УП)}^o$  – элемент множества (30) или (34);  $Z_{j(КУСПД)}^o$  – элемент множества (31) или (35);  $Z_{j(УСПД)}^o$  – элемент множества (32) или (36);  $z_{ij}$ ,  $z_{xy}$  – размер пакета информации, передаваемого между соответствующими УП и УСПД по одному каналу при вычислении значений элементов множеств (29)–(32), бит, или стоимость пакета информации, передаваемого между соответствующим УП и УСПД по одному каналу при вычислении значений элементов множеств (33)–(36), руб;  $c_{ij}$ ,  $c_{xy}$  – значения, равные 0, если существует соединение между соответствующими УП и УСПД;  $t$  – число срезов, в которые не передавались данные от УП к УСПД;  $T_{sev}$  – период хранения данных на сервере системы.

Для оценки отказоустойчивости АСКУЭ использовали элементы множеств (29)–(36), имеющие максимальные значения  $I_{max(КУП)}^o$ ,  $I_{max(УП)}^o$ ,  $I_{max(КУСПД)}^o$ ,  $I_{max(УСПД)}^o$ ,  $C_{max(КУП)}^o$ ,  $C_{max(УП)}^o$ ,  $C_{max(КУСПД)}^o$ .

Потерю данных и экономический ущерб оценили с учетом вероятности отказа каждого типа:

$$I^o = P_{(КУП)} \times I_{max(КУП)}^o + P_{(УП)} \times I_{max(УП)}^o + P_{(КУСПД)} \times I_{max(КУСПД)}^o + P_{(УСПД)} \times I_{max(УСПД)}^o; \quad (41)$$

$$C^o = P_{(КУП)} \times C_{max(КУП)}^o + P_{(УП)} \times C_{max(УП)}^o + P_{(КУСПД)} \times C_{max(КУСПД)}^o + P_{(УСПД)} \times C_{max(УСПД)}^o. \quad (42)$$

Вероятность наступления отказов каждого типа  $P_{(КУП)}$ ,  $P_{(УП)}$ ,  $P_{(КУСПД)}$ ,  $P_{(УСПД)}$  определили по формуле

$$P_{(x)} = \frac{P_{(x)}^o}{P_{(КУП)}^o + P_{(УП)}^o + P_{(КУСПД)}^o + P_{(УСПД)}^o}, \quad (43)$$

где  $P_{(x)}$  – вероятности наступления отказов: канала передачи данных между УП и УСПД; УП; канала передачи данных между УСПД и сервером системы; УСПД;  $P_{(x)}^o$  – вероятности отказов: канала передачи данных между УП и УСПД ( $P_{(КУП)}^o$ ); УП  $P_{(УП)}^o$ ; канала передачи данных между УСПД и сервером системы  $P_{(КУСПД)}^o$ ; УСПД  $P_{(УСПД)}^o$ . Данные величины рассчитали по формуле

$$P_{(x)}^o = 1 - 1/T_{н.о.(x)}, \quad (44)$$

где  $T_{н.о.(x)}$  – время наработки на отказ, определяемое по паспорту соответствующего устройства.

При использовании изложенного подхода к рассматриваемой в качестве примера АСКУЭ при равных весовых коэффициентах критериев (24)–(26) удалось подобрать устройства, у которых суммарная стоимость ниже на 10 % по сравнению с реальным вариантом при незначительном увеличении вероятности отказа системы (0,001 %).

## 5. Моделирование работы системы

При анализе работы проектируемой системы для определения целесообразности резервирования ее элементов и оптимизации режима работы используются данные о режиме работы объекта наблюдения. Анализ последствий отказов проводится для каждого УП и УСПД в различные отрезки времени с учетом длительности функционирования системы. Оценку сохранения качества работы системы при отказе ее элементов проводим по количеству и стоимости потерянных данных, для этого используем соотношения

$$Q^I = (I - I^o)/I; \quad (45)$$

$$Q^C = (C - C^o)/C, \quad (46)$$

где  $Q^I$  – коэффициент сохранения количества информации;  $I$  – количество переданной и сохраненной информации при безотказной работе системы, бит;  $I^o$  – количество информации, утерянной в результате отказа элемента системы, бит;  $Q^C$  – коэффициент сохранения стоимости информации;  $C$  – стоимость переданной и сохраненной информации при безотказной работе системы, руб.;  $C^o$  – стоимость информации, утерянной в результате отказа, руб.

Задачу решали с помощью имитационного моделирования, которое позволяет исследовать модель реальной системы при различных условиях функционирования в определенные отрезки времени [6, 7].

Потеря данных измерения может произойти только в результате отказа счетчика, в этом случае сохраненные данные за текущий отчетный период восстановить невозможно. Данные управления и сигнализации могут быть потеряны в результате нарушения целостности линии передачи между сервером и соответствующим УП, количество потерянных данных определяется временем восстановления функционирования линии передачи и частотой возможной передачи данных в течение этого времени.

Количество данных при отказе счетчика и их стоимость рассчитали соответственно по формулам

$$I_{Cч}^o = \sum_{i=td+1}^{tr-1} b_{i(Cч)}, \text{ бит}; \quad (47)$$

$$C_{Cч}^o = \sum_{i=td+1}^{tr-1} c_{i(Cч)}, \text{ руб.}, \quad (48)$$

где  $td$  – номер среза, в течение которого произошла последняя передача данных отчетного периода к УСПД;  $tr$  – номер среза, в течение которого произошло восстановление отказавшего

счетчика;  $b_{i(Cч)}$  – количество данных, передаваемых отказавшим счетчиком за  $i$ -й срез;  $c_{i(Cч)}$  – стоимость учтенной за  $i$ -й срез энергии:

$$c_{i(Cч)} = \sum_{t=id+1}^{tr-1} Tr_t E_t, \text{ руб.} \quad (49)$$

Здесь  $Tr_t$  – тариф расчета стоимости учтенной энергии, действующий во время отказа, руб./кВт ч;  $E_t$  – количество энергии, кВт ч.

Количество данных, потерянных в результате отказа ДС, и их стоимость определили соответственно по формулам

$$I_{ДС}^o = \sum_{i=id+1}^{tr-1} \sum_{v=1}^V b_{v(ДС)} \times k_{iv(ДС)}, \text{ бит;} \quad (50)$$

$$C_{ДС}^o = \sum_{i=id+1}^{tr-1} \sum_{v=1}^V c_{v(ДС)} \times k_{iv(ДС)}, \text{ руб.}, \quad (51)$$

где  $V$  – число типов посылок информации системы сигнализации;  $b_{v(ДС)}$  – длина пакета посылки информации  $v$ -типа, бит;  $c_{v(ДС)}$  – стоимость пакета посылки информации  $v$ -типа, руб.;  $k_{iv(ДС)}$  – число посылок информации  $v$ -типа в течение  $i$ -го среза.

Количество данных, потерянных в результате отказа ДУ, и их стоимость определили соответственно по формулам

$$I_{ДУ}^o = \sum_{i=id+1}^{tr-1} \sum_{r=1}^R b_{r(ДУ)} \times k_{ir(ДУ)}, \text{ бит;} \quad (52)$$

$$C_{ДУ}^o = \sum_{i=id+1}^{tr-1} \sum_{r=1}^R c_{r(ДУ)} \times k_{ir(ДУ)}, \text{ руб.}, \quad (53)$$

где  $R$  – число типов посылок информации системы управления;  $b_{r(ДУ)}$  – длина пакета посылки информации  $r$ -типа, бит;  $c_{r(ДУ)}$  – стоимость пакета посылки информации  $r$ -типа, руб.;  $k_{ir(ДУ)}$  – число посылок информации  $r$ -типа в течение  $i$ -го среза.

Количество данных, потерянных в результате отказа УСПД, рассчитали как сумму переданных данных между сервером системы и ДС, ДУ, подключенных к отказавшему УСПД. Стоимость данных, потерянных в результате отказа УСПД, определили как сумму стоимостей переданных данных между сервером системы и ДС, ДУ, а также стоимости ущерба  $c_y^{Cч}$ , полученного в результате невозможности оперативного доступа к данным измерения.

С помощью данной методики анализа провели моделирование работы системы для отказов двух типов: не вызывающих потерю данных, хранящихся в памяти элемента системы, и приводящих к потере данных, хранящихся в памяти элемента системы. Значимыми считали отказ первого типа, в результате которого потеря информации или ее стоимость составили бы более 0,5 %, и отказ второго типа, в результате которого потеря информации или ее стоимость составили бы более 20 % от стоимости сохраненных данных в каждом срезе, для которого проводилось моделирование. В результате были выявлены УП, отказы которых являются значимыми при заданном режиме работы.

## Заключение

Предложенная методика проектирования объединяет все этапы создания АСКУЭ и позволяет в рамках каждого из них, варьируя структурными связями между устройствами и значениями параметров используемых компонент, осуществлять поиск рационального решения в многомерном пространстве параметров. Кроме того, использование средств моделирования работы разрабатываемой системы позволяет оценить целесообразность и предусмотреть средства резервирования отдельных устройств системы на этапе проектирования, оптимизировать режим работы системы. Рассмотренный пример показал, что при равных исходных данных

возможно построение качественно новой АСКУЭ с улучшенными экономическими и техническими характеристиками. В соответствии с данной методикой разработаны программные средства, которые могут быть использованы как при создании новых АСКУЭ, так и при модернизации уже существующих. Все программные модули разработаны на языке программирования С и предназначены для работы на ПК с операционной системой Windows XP, Windows 2000 или Windows NT 4.0 Service Pack 6.

### Список литературы

1. Савчиц, М.В. Этапы и стадии создания АИИС КУЭ / М.В. Савчиц // Измерение.ru. – 2004. – № 10. – С. 28–29.
2. Jalote, P. Fault Tolerance in Distributed Systems / P. Jalote. – Prentice Hall, 1994. – 448 p.
3. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
4. Man, K.F. Genetic Algorithms Concepts and Designs / K.F. Man, K.S. Tang, S. Kwong. – Springer, 1999. – 348 p.
5. Соболев, И.М. Выборы оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1985. – 107 с.
6. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1988. – 230 с.
7. Цвиркун, А.Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структур сложных систем (оптимизационно-имитационный подход) / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов. – М.: Наука, 1985. – 173 с.

Поступила 04.01.11

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, пр. Независимости, 65  
e-mail: patsey\_natasha@mail.ru*

**N.E. Patsey, V.T. Priduho**

### **STRUCTURAL PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATED SYSTEMS FOR ACCOUNTING AND CONTROL OF ELECTRICITY**

The paper suggests a method of designing engineering automated systems for accounting and control of electricity, using methods of mathematical modeling and multiobjective optimization to search for rational design decisions and to verify its performance.