

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

**Введение.** Возможность оценить влияние отказа элемента системы на ее работу при проектировании системы позволяет принять меры по уменьшению или предотвращению этого влияния. Изменение проектного решения, использование средств резервирования, изменение режима работы системы и т.д. на более поздних этапах создания системы или во время ее эксплуатации может быть невозможно или требовать значительных затрат. В качестве количественной оценки влияния отказа может быть использован параметр «отказоустойчивость системы». Под отказоустойчивостью будем понимать способность системы сохранять показатели качества выполняемых функций в случае отказа отдельного элемента.

К настоящему времени нет однозначного метода определения количественной оценки данного параметра. Методы, представленные в литературе, можно разделить на две группы: методы оценки влияния *отказов узлов* системы на качество ее функционирования ([1]-[5]) и методы оценки влияния *отказов функций* системы на качество ее функционирования ([6], [7]). Для оценки отказоустойчивости таких систем как АСКУЭ целесообразно оценить влияние частичного отказа функций системы в результате отказа одного или нескольких ее компонент на качество работы.

**Описание объекта.** В настоящее время широкое распространение получили иерархические трехуровневые АСКУЭ. Верхний уровень таких систем представляется сервером системы, который выполняет сбор, хранение данных, и пр. Средний уровень представляется устройствами сбора и передачи данных (УСПД), которые выполняют автоматический сбор данных измерений, их энергонезависимое хранение. Нижний уровень – это устройства измерения. Эти устройства хранят последовательность усредненных значений электрической нагрузки потребителей на определенном временном интервале. Интервал усреднения называют *срезом*. В ряде случаев АСКУЭ, кроме функций телеизмерения, может выполнять функции телеуправления и телесигнализации. Тогда нижний уровень системы дополняется датчиками управления и сигнализации. Датчики сигнализации используются для контроля состояния оборудования энер-

госистемы (включено оборудование, подано напряжение и т.д.). Датчики управления используются для изменения состояния оборудования энергосистемы (отключить напряжение, изменить положение контактов и пр.). Данные управления и сигнализации передаются между соответствующими датчиками и сервером системы через УСПД. Таким образом, основной функцией АСКУЭ является передача данных между счетчиками учета электроэнергии (точки измерения (ТИ)), датчиками управления (точки управления (ТУ)), датчиками сигнализации (точки сигнализации (ТС)) и сервером сбора данных, расположенном в пункте диспетчерского контроля. Передача всех этих данных осуществляется через УСПД.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать математическую модель, которая позволит оценить степень сохранения качества работы системы при отказе ее элементов, при заданной структуре АСКУЭ и заданных параметрах ее элементов.

Данная оценка позволит:

- выявить элементы, отказ которых является критическим;
  - рассмотреть возможность уменьшения влияния отказа элемента на качество работы системы, изменяя режим работы объекта наблюдения или интенсивность передачи данных между элементами АСКУЭ;
  - оценить необходимость резервирования элемента системы.
- Величина ущерба, причиненного отказом элемента, зависит от интенсивности передачи данных через этот элемент, передаваемого содержимого, применяемым тарифом. Потребление энергии зависит от режима энергопотребления объекта наблюдения и является неравномерным в течение заданного периода (часа, суток, недели и т.д.). Передача данных управления и сигнализации так же является неравномерной в течение заданного периода (часа, суток, недели и т.д.). Передача данных от ТИ к УСПД осуществляется периодически – один раз в срез, величина которого принимается равной 30 мин. Передача данных энергопотребления от УСПД к серверу системы осуществляется периодически – один раз в отчетный период, величина которого составляет 1 календарный месяц.

Пацей Наталья Евгеньевна, аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

**Математическая модель.** Влияние отказа элемента системы на качество ее работы оценили по количеству и стоимости данных, потерянных в результате отказа. Такое разделение позволяет выполнять оценку качества работы системы даже при неполном объеме данных (отсутствие данных о тарифах, режимах работы и др., которые влияют на стоимость данных). Для оценки степени сохранения качества работы системы при отказе ее элементов наблюдения использовали соотношения (1) и (2):

$$Q^I = \frac{l - l_o}{l}, \quad (1)$$

$$Q^C = \frac{C - C_o}{C}, \quad (2)$$

где  $Q^I$  — коэффициент сохранения количества информации;  $l$  — количество переданной и сохраненной информации при безотказной работе системы, бит;  $l_o$  — 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 элемента системы, руб.

Структуру АСКУЭ представили в виде матрицы связей (3):

$$S_{k \times p}, \quad (3)$$

где  $k$  — количество УСПД, а  $p$  — количество точек подключения (ТП).

Элемент матрицы  $S_{ij} = 1$ , если существует соединение между ТП и УСПД и  $S_{ij} = 0$ , если оно отсутствует, при этом  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, p$ . Число ТИ в системе равно  $pm \in [1, m]$ . ТП этого типа характеризуются группой учета, распределением потребляемой энергии, тарифом расчета стоимости энергии, направлением и типом учитываемой мощности, числом каналов измерения между ТИ и УСПД, длиной и стоимостью пакета одной посылки информации, глубиной хранения данных. Число ТС в системе равно  $ps \in [m+1, s]$ , а число ТУ в системе  $pp \in [s+1, p]$ . ТУ и ТС характеризуются типом, длиной и стоимостью пакета одной посылки, распределением частоты посылок. УСПД характеризуются числом подключенных ТП, и объемом памяти, определяющей глубину хранения. Все устройства в системе характеризуются минимальным и максимальным временем простоя в случае отказа.

Потеря данных измерения может произойти только в результате отказа ТИ, в этом случае сохраненные данные за текущий отчетный период восстановить не возможно. Количество данных при отказе ТИ рассчитали по формуле (4):

$$I_o^{TI} = \sum_{i=td}^{tr} b^{TI}, \text{ бит}, \quad (4)$$

где  $td$  — номер среза, в течение которого произошла последняя передача данных отчетного периода к УСПД;  $tr$  — номер среза, в течение которого произошло восстановление отказавшей ТИ.

Стоимость потерянных данных, т.е. стоимость неучтенной энергии, рассчитали в соответствии с [8].

Данные управления и сигнализации могут быть потеряны в результате нарушения целостности линии передачи между сервером и соответствующей ТП. Количество и стоимость потерянных данных определяется временем восстановления функционирования линии передачи, содержанием передаваемых данных, а также частотой их передачи в течение этого времени.

Количество данных, потерянных в результате отказа ТС и ТУ, а также и их стоимость определили по формулам (5)–(8) соответственно:

$$I_o^{TC} = \sum_{i=td}^{tr} \sum_{v=1}^V b_v^{TC} \times k_{iv}^{TC}, \text{ бит}, \quad (5)$$

$$I_o^{TU} = \sum_{i=td}^{tr} \sum_{r=1}^R b_r^{TU} \times k_{ir}^{TU}, \text{ бит}, \quad (6)$$

$$C_o^{TC} = \sum_{i=td}^{tr} \sum_{s=1}^{S^{TC}} c_v^{TC} \times k_{iv}^{TC}, \text{ руб.}, \quad (7)$$

$$C_o^{TU} = \sum_{i=td}^{tr} \sum_{r=1}^R c_r^{TU} \times k_{ir}^{TU}, \text{ руб.}, \quad (8)$$

где  $V$  — число типов пакетов системы сигнализации;  $b_v^{TC}$  — длина пакета  $v$ -типа, бит;  $c_v^{TC}$  — стоимость пакета  $v$ -типа, руб.;  $k_{iv}^{TC}$  — число переданных пакетов  $v$ -типа в течение  $i$ -ого среза,  $R$  — число типов пакетов системы управления;  $b_r^{TU}$  — длина пакета  $r$ -типа, бит;  $c_r^{TU}$  — стоимость пакета  $r$ -типа, руб.;  $k_{ir}^{TU}$  — число переданных пакетов  $r$ -типа в течение  $i$ -ого среза.

В результате отказа УСПД будут потеряны пакеты системы сигнализации и управления, передаваемые между сервером системы, ТС и ТУ, подключенных к отказавшему УСПД. Количество данных, потерянных в результате отказа УСПД рассчитали по формуле (10):

$$I_o^{УСПД} = \sum_{n=1}^{N^{TU}} I_{on}^{TU} + \sum_{n=1}^{N^{TC}} I_{on}^{TC}, \text{ бит}, \quad (10)$$

где  $N^{TU}$  и  $N^{TC}$  — число ТУ и ТС, подключенных к отказавшему УСПД, соответственно.

Стоимость данных, потерянных в результате отказа УСПД, определили по формуле (11) как сумму стоимостей данных сигнализации, управления и стоимости ущерба ( $c_y^{TI}$ ), полученного в результате невозможности оперативного доступа к данным измерения.

$$C_o^{УСПД} = \sum_{n=1}^{N^{TU}} c_{on}^{TU} + \sum_{n=1}^{N^{TC}} c_{on}^{TC} + c_y^{TI}, \text{ руб.} \quad (11)$$

Задачу решали с помощью имитационного моделирования, которое позволяет исследовать модель реальной системы при различных условиях функционирования в определенные отрезки времени [8].

**Вычислительный эксперимент.** Была исследована АСКУЭ, состоящая из четырех УСПД ( $k = 4$ ), двенадцати ТИ ( $pm = 1, \dots, 12$ ), четырех ТС ( $ps = 13, \dots, 16$ ), пяти ТУ ( $pc = 17, \dots, 21$ ), матрица связей (3) для данной системы имеет вид:

$$S = \begin{bmatrix} 000100100110001000100 \\ 000001000000000010000 \\ 000010010001010001001 \\ 111000001000100100010 \end{bmatrix}.$$

В предлагаемом примере тарификация осуществлялась по следующим тарифным зонам (23–06) ч, (06–08) ч и (11–23) ч, (08–11) ч. Тариф расчета стоимости за потребленную энергию, принятый в примере, приведен в таблице 1.

Таблица 1. Тарифы расчета стоимости энергии

Зоны тарификации	(23–06) ч	(06–08) ч, (11–23) ч	(08–11) ч
Стоимость за 1 кВт/ч, у.е.	0,1	0,2	0,4

Характеристики ТИ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Количество потребленной энергии

Номер ТИ	Число каналов связи с УСПД	Длина пакета, передаваемого по одному каналу, Б	
		1	2
1, 7, 8, 9, 10	2	11	11
2, 3, 4	4	11	11
5, 6, 11, 12	1	11	11

Для уменьшения объема входных данных приведем распределение значений потребленной энергии, усредненных в течение одной тарифной зоны (таблица 3).

Таблица 3. Профили нагрузки ТП1-ТП12

Номер ТИ	Количество учтенной энергии, кВт/ч		
	(23-06) ч	(06-08) ч, (11-23) ч	(08-11) ч
ТП1	0,00	177,86	24,00
ТП2	0,00	312,29	165,00
ТП3	158,00	57,14	230,00
ТП4	158,00	57,14	230,00
ТП5	0,00	251,14	0,00
ТП6	933,00	166,71	416,00
ТП7	943,00	144,71	283,00
ТП8	48,00	161,29	247,00
ТП9	0,00	27,86	0,00
ТП10	0,00	15,00	0,00
ТП11	15,00	20,57	275,00
ТП12	14,00	237,29	387,00

Характеристики пакетов системы сигнализации и системы управления (число пакетов, длина одного пакета, стоимость одного пакета по тарифным зонам для каждой ТС и ТУ приведены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Моделирование отказов проводилось для каждой ТП в нулевой, шестнадцатый и тридцать второй срезы после четырехсот девяноста пяти суток безотказного функционирования, максимальное время восстановления всех элементов принято равным 30 мин. Экономический ущерб от отказа любого УСПД принят равным 500 условным единицам. Период хранения данных в элементе памяти ТИ и УСПД принят равным 90 суток, длительность отчетного периода – 30 суток. Моделирование проводили для отказов двух типов:

- не вызывающих потерю данных, хранящихся в памяти элемента системы;
- приводящих к потере данных, хранящихся в памяти элемента системы.

Значимым считали отказ первого типа, в результате которого потеря информации или ее стоимость составила бы более 0,5 %, и отказ второго типа, в результате которого потеря информации или ее стоимость составила бы более 20 % от стоимости сохраненных данных в каждом срезе, для которого проводилось моделирование. Приоритетным считался экономический показатель. В таблице 5 и 6 представлены результаты моделирования.

Таблица 4. Характеристики сигналов сигнализации

Тип, длина сигнала	Характеристики сигнала	(23-06) ч				(06-08) ч, (11-23) ч, (23-06) ч			
		ТС1	ТС2	ТС3	ТС4	ТС1	ТС2	ТС3	ТС4
«Включено», длина 5 Б.	Число	-	-	5	2	-	-	2	2
	Стоимость, у.е.	-	-	0.5	0.5	-	-	2	0.5
«Выключено», длина 5 Б.	Число	4	2	-	-	5	7	-	-
	Стоимость, у.е.	10	15	-	-	10	10	-	-

Таблица 5. Характеристики типов сигналов управления

Тип, длина сигнала	Характеристики сигнала	(23-06) ч					(06-08) ч, (11-23) ч, (23-06) ч				
		ТУ1	ТУ2	ТУ3	ТУ4	ТУ5	ТУ1	ТУ2	ТУ3	ТУ4	ТУ5
«Включить», длина 5 Б.	Число	3	20	3	20	6	3	10	20	6	4
	Стоимость, у.е.	20	20	20	20	300	20	10	20	300	15
«Выключить», длина 5 Б.	Число	10	4	10	4	6	4	10	4	5	5
	Стоимость, у.е.	10	15	10	15	100	15	10	15	10	10
Переключение 1 трансформатора, длина 6 Б.	Число	6	-	8	12	-	-	6	8	12	-
	Стоимость, у.е.	10	-	2	60	-	-	10	2	60	-
Переключение 2 трансформатора, длина 6 Б.	Число	-	15	-	-	-	45	-	-	30	-
	Стоимость, у.е.	-	10	-	-	-	10	-	-	10	-
Переключение 3 трансформатора, длина 6 Б.	Число	-	10	-	-	30	-	10	-	30	-
	Стоимость, у.е.	-	10	-	-	10	-	10	-	10	-

Таблица 6. Результаты моделирования (отказ первого типа)

Точка отказа	0 срез		16 срез		32 срез	
	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>
УСПД4	0,9923	1,0000	0,9909	1,0000	0,9880	1,0000
ТУ4	0,9947	1,0000	0,9934	1,0000	0,9913	1,0000

Таблица 7. Результаты моделирования (отказ второго типа)

Точка отказа	0 срез		16 срез		32 срез	
	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>	Q <sup>C</sup>	Q <sup>I</sup>
ТИ2	0,8978	0,7778	0,8747	0,7778	0,8985	0,7778
ТИ3	0,9362	0,7778	0,9433	0,7778	0,9353	0,7778
ТИ4	0,9362	0,7778	0,9433	0,7778	0,9353	0,7778
ТИ6	0,7727	0,9861	0,8030	0,9861	0,7699	0,9861
ТИ7	0,8658	0,9444	0,8752	0,9444	0,8609	0,9444
ТИ12	0,8699	0,9861	0,8658	0,9861	0,8702	0,9861

По результатам моделирования видно, что наиболее значимым является отказ, который приведет к невозможности передачи данных между сервером системы и ТУ4, а также отказ ТИ6. Результаты моделирования также показывают, что отказ ТИ3 и ТИ4 равнозначны, однако это может являться следствием грубой приближенности входных данных. Модель позволяет провести вычислительный эксперимент при более полных данных о режиме потребления энергии только для этих точек подключения.

**Заключение.** Таким образом, при равных значениях характеристик надежности (наработка на отказ, ремонтпригодность и т.д.) различных элементов системы их отказ может иметь различное влияние, как на экономические, так и качественные результаты работы системы. Предложенная имитационная модель системы позволяет определить не только элементы системы, отказ которых является критическим, но и количественно оценить это влияние при достаточно обобщенных данных о режиме работы объекта наблюдения. Полученная оценка может быть использована при принятии решения о необходимости проведения мероприятий, усиливающих контроль за работоспособностью оборудования АСКУЭ, а также необходимости резервирования элемента системы или канала передачи данных.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Савельева, О.С. Критерии отказоустойчивости технических систем / О.С. Савельева // Труды Одесского политехн. ун-та. – 2004. – № 2(22). – С. 1-4.
2. Антошина, И.В. Формализованный подход к модернизации локальной вычислительной сети / И.В. Антошина, В.Г. Домрачев, И.В. Ретинская // Лесной вестник. –2003. – №5. – С. 173-178.
3. Родзин, С.И. Технология проектирования и программно-аппаратные методы обеспечения отказоустойчивости вычислительных структур / С.И. Родзин // Известия ТРТУ. Тематический выпуск: компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – С. 55-58.
4. Марлов, А.В. Методики оценки отказоустойчивости в автоматизированных системах / А.В. Марлов // Научная сессия МИФИ-2003. 10 Всероссийская научная конференция «Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы»: сб. науч. тр. / Московский инж.-физ. ин-т; под ред. И.М. Ядыкин. – Москва, – 2003. – С. 125-126.
5. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей: ГОСТ Р 51901.13-2005 – Введ. 29.06.05. – Москва: Научно-техническим управлением Госстандарта России, 2005. – С. 14.
6. Богатырев, В.А. Функциональный подход к надежности и отказоустойчивости компьютерных систем / В.А. Богатырев // Региональная информатика – 2004: материалы IX Санкт-Петербургской международной конференции. Санкт-Петербург, 22-24 июня 2004 г. / Санкт-Петербургское о-во инф-ки, выч. тех., систем связи и упр-ия: под ред. Б.Я. Советова. - СПб, 2004. - С. 31.
7. Абдель-Вахед Мутаз Халед. Методико-алгоритмический аппарат (инструментарий) анализа и оценки системы обеспечения надёжности и отказоустойчивости распределенной локальной компьютерной сети : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.13 / Абдель-Вахед Мутаз Халед ; Мос. Гос. ун-т экон., статис. инф-ки. – М., 2006. – 26 с.
8. Инструкция по применению двухставочного и двухставочно-дифференцированного по зонам суток тарифов на активную электрическую мощность и энергию с основной платой за фактическую величину наибольшей потребляемой активной мощности в часы максимальных нагрузок энергосистемы: утв. Постановлением М-вом энергетики Респ. Беларусь 16.10.02: текст по состоянию на 1 фев. 2010 г. – Минск: Дикта, 2010. – 15 с
9. Цвиркун, А.Д. Иммитационное моделирование в задачах синтеза структур сложных систем (оптимизационно-имитационный подход) / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.А. Филиппов. – М: Наука, 1985. – 173 с.

*Материал поступил в редакцию 02.11.10*

**PATSEY N.E. Simulation of data collection system**

The paper introduces a simulation model for the distributed hierarchical data collection system, which is the basis of an automated system for control and power metering. Model allows to evaluate the quality of the system for failures of elements and determine the need reserve, and the opportunity to optimize the operation of the system.