

где  $q = a_{11}^k - a_{12}^k + a_{13}^k$ ;  $a_{ij}^k$  — коэффициенты при неизвестных в уравнениях (П. 5.1)–(П. 5.3).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бредихин А. М., Хомяков М. В. Электрические контактные соединения. — М.: Энергия, 1980.
2. Основы расчета токораспределения в плоских контактных соединениях / А. Н. Герасимович, Д. А. Герасимович, Г. В. Яковлев и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 2000. — № 3. — С. 12–24.
3. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. — Ч. 3. Теория электромагнитного поля. — М.: Энергия, 1969.
4. Герасимович А. Н., Герасимович Д. А. Решение краевой задачи токораспределения в шинопроводе прямоугольного профиля итерационным методом // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1996. — № 3–4. — С. 3–8.
5. Герасимович А. Н. Приближенные методы определения электромагнитных характеристик токоведущих систем и проводящих конструкций электроустановок: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — С.-Петербург: СПбГТУ, 1993.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 10.03.2000

УДК 621.311.019.3

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОШИБОК СИГНАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КОММУТАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

**Докт. техн. наук АНИЩЕНКО В. А., инж. ШУТОВ А. Л.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

**Цель исследования.** Принципы построения и общая структура математической модели сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов и измерений связанных с ними аналоговых переменных, характеризующих действующую схему системы электроснабжения, разработаны в [1–3]. В этой модели система электроснабжения рассматривается как дискретный комбинационный одноконтурный объект, или объект без памяти. Значения выходных аналоговых переменных не зависят от времени и определяются величинами входных аналоговых переменных и функции проводимости.

Указанная модель позволяет организовать диагностику ошибок сигнализации положений коммутационных аппаратов и части аномально больших ошибок измерений связанных с последними аналоговых переменных.

В настоящей работе предлагается методика определения количественных характеристик модели диагностирования. Знание этих характеристик позволит решать следующие проблемы, возникающие в процессе диагностирования:

облегчить практическую реализацию задачи диагностирования для систем электроснабжения большой размерности за счет обоснованного исключения части контролируемых переменных и маловероятных состояний системы;

оценить количественно эффективность диагностирования ошибок сигнализации и измерений, которая может быть достигнута при использовании данной математической модели;

повысить точность локализации ошибок сигнализации и измерений, а в случае невозможности однозначной локализации стратифицировать ошибки по мере убывания приведенных (с учетом технологической значимости) вероятностей подозреваемых в недостоверности данных.

**Вероятности состояний системы сигнализации и измерений.** Число всех возможных состояний (комбинаций) значений входных и выходных аналоговых переменных, представленных в дискретной форме, и результатов сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов равно числу компонент функции исправности и определяется известной формулой [2]

$$N = 2^{(n_a + n_k)}, \quad (1)$$

где  $n_a$  – число измеряемых аналоговых переменных (электрических токов, напряжений);

$n_k$  – то же, дискретных переменных, характеризующих положения выключателей, разъединителей, заземляющих ножей.

Множество состояний  $N$  подразделяется на подмножество технологически непротиворечивых состояний значений переменных  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$  и подмножество противоречивых состояний  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_m\}$ , где  $A_i$  – событие, заключающееся в существовании  $i$ -го непротиворечивого состояния;  $B_j$  – то же,  $j$ -го противоречивого состояния. Таким образом

$$N = H + M, \quad (2)$$

где  $H$  – число непротиворечивых комбинаций;

$M$  – то же, противоречивых комбинаций.

Элементами (переменными) истинного состояния  $A_i = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$  являются события  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$ , представляющие собой значения контролируемых переменных, достоверные для  $i$ -го состояния, где  $n = (n_a + n_k)$  – общее число аналоговых и дискретных переменных.

Введем понятие функции перехода от непротиворечивого состояния  $A_i$  к ошибочному противоречивому  $B_j$

$$F_{ji} = \prod_{l=1}^{k_{ji}} b_l, \quad j = 1, \dots, M; \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, H,$$

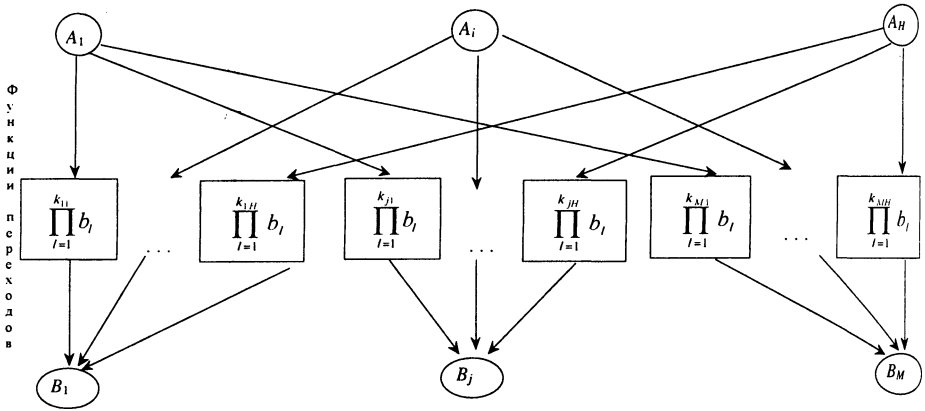
где  $b_l$  – событие, заключающееся в том, что в  $l$ -м результате сигнализации или измерения присутствует ошибка;

$k_{ji}$  – число элементов в  $j$ -м ошибочном состоянии  $B_j$ , значениями которых оно отличается от истинного состояния  $A_i$ .

Тогда ошибочное состояние может быть определено в зависимости от непротиворечивых состояний и функций переходов (рис. 1)

$$B_j = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot F_{ji}) = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot \prod_{l=1}^{k_{ji}} b_l). \quad (4)$$

Технологически непротиворечивые состояния значений переменных



Технологически противоречивые состояния значений переменных

Рис. 1. Состояния системы и функции переходов от технологически непротиворечивых к технологически противоречивым состояниям

В развернутом виде выражение (4) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{11}} + A_2 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{12}} + \dots + A_N \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{1N}}; \\ B_2 &= A_1 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{21}} + A_2 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{22}} + \dots + A_N \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{2N}}; \\ &\dots \\ B_M &= A_1 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{M1}} + A_2 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{M2}} + \dots + A_N \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \dots \cdot b_{k_{MN}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначив вероятность события  $A_i$  через  $P(A_i)$ , приведенную вероятность события  $a_l$  через  $p_l$ , приведенную вероятность события  $b_l$  через  $q_l = 1 - p_l$ , определим вероятность ошибочного состояния

$$Q(B_j) = \sum_{i=1}^N (P(A_i) \prod_{l=1}^{k_{ji}} q_l). \quad ($$

Учет технологической значимости переменных позволит повысить точность выявления ошибочных данных. Это достигается введением понятия приведенной вероятности отказа

$$q_l = \gamma_l q_l^*, \quad (7)$$

где  $q_l^*$  — априорная вероятность отказа  $l$ -го канала;

$\gamma_l$  — относительный вес  $l$ -й переменной, характеризующий ее технологическую значимость.

Информация о значениях вероятностей  $q_l^*$  может быть получена и периодически уточняться путем статистической обработки ретроспективных данных об отказах системы сигнализации и измерений.

Все истинные непротиворечивые и ошибочные противоречивые состояния образуют полную группу несовместных событий, и сумма их вероятностей равна единице

$$\sum_{i=1}^N P(A_i) + \sum_{j=1}^M Q(B_j) = 1. \quad (8)$$

На основе ретроспективного анализа режимов работы данной системы электроснабжения и (или) методом экспертных оценок определяем вероятности существования истинных состояний  $P^*(A_i)$ , при этом принимаем

$$\sum_{i=1}^N P^*(A_i) = 1.$$

Тогда формула (6) для определения вероятности ошибочного состояния примет вид

$$Q^*(B_j) = \sum_{i=1}^N (P^*(A_i) \prod_{l=1}^{k_{ji}} q_l), \quad (9)$$

а для соблюдения условия (8) необходимо ввести нормировочный коэффициент  $\alpha$

$$\alpha = \frac{1}{\sum_{i=1}^N P^*(A_i) + \sum_{j=1}^M Q^*(B_j)}. \quad (10)$$

Используя значение нормировочного коэффициента, получаем окончательные значения вероятностей существования истинных технологически непротиворечивых и ошибочных противоречивых состояний системы сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений аналоговых переменных:

$$P(A_i) = \alpha P^*(A_i); \quad Q(B_j) = \alpha Q^*(B_j). \quad (11)$$

**Эффективность диагностирования ошибочных состояний системы сигнализации и измерений.** Противоречивое состояние говорит о безуслов-

ном наличии ошибки в результатах сигнализации и (или) измерений. Непротиворечивость комбинации результатов сигнализации и измерений еще не гарантирует их достоверность. Существуют такие ошибочные значения переменных, которые позволяют их комбинации маскироваться под истинную, не содержащую ошибок. Обозначим число таких комбинаций через  $T$ . При этом  $T = N$  при  $N > 1$  и  $T = 0$  при  $N = 1$ . Выявить эти недостоверные данные в рамках рассматриваемой математической модели невозможно.

Введем в рассмотрение подмножество ошибочных непротиворечивых состояний  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_v, \dots, C_T\}$ , в котором каждое состояние внешне совпадает с истинным непротиворечивым состоянием  $A_i$ , однако содержит в отличие от последнего ошибочные значения переменных.

Ошибочное непротиворечивое состояние  $C_v$  определяется в зависимости от истинных непротиворечивых состояний  $A_i$  и соответствующей функции переходов  $F_{vi}$  (рис. 2)

$$C_v = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq v}}^N (A_i F_{vi}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq v}}^N (A_i \prod_{l=1}^{k_{vi}} b_l), \tag{12}$$

где  $F_{vi}$  – функция перехода от истинного непротиворечивого состояния  $A_i$  к ошибочному непротиворечивому  $C_v$ ;

$k_{vi}$  – число элементов в  $v$ -м ошибочном состоянии  $C_v$ , значениями которых оно отличается от  $i$ -го истинного состояния  $A_i$ .

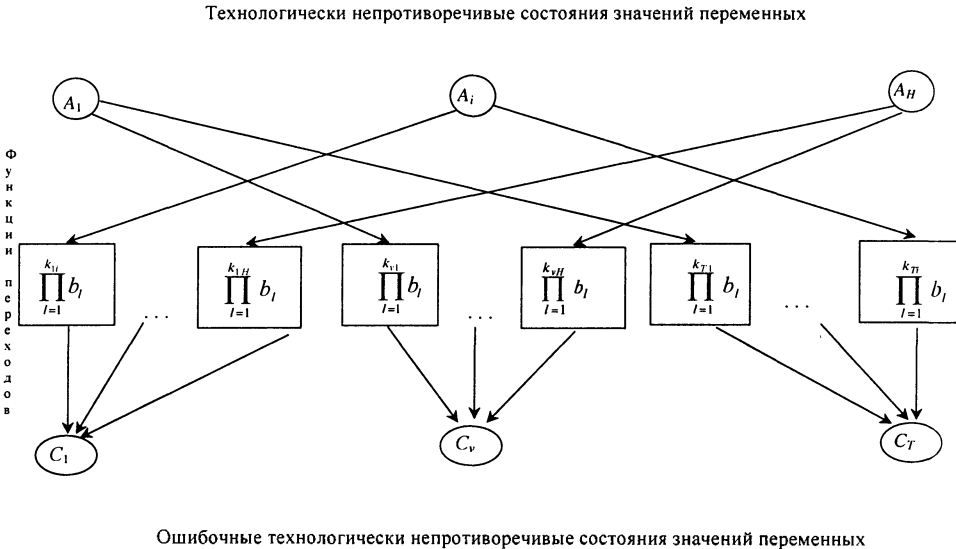


Рис. 2. Состояния системы и функции переходов от технологически непротиворечивых истинных к технологически непротиворечивым ошибочным состояниям

Вероятность пребывания системы в состоянии  $C_v$  представляет собой вероятность «ложного спокойствия», т. е. неправильного решения о появлении истинного непротиворечивого состояния  $A_i$ , когда имеет место

маскирующееся под него непротиворечивое, но содержащее ошибочные значения переменных состояние  $C_v$ :

$$Q(C_v) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq v}}^N (P(A_i) \prod_{l=1}^{k_{vi}} q_l). \quad (13)$$

Эффективность методов диагностирования ошибок сигнализации и измерений, основанных на использовании предложенной выше математической модели, может быть оценена как отношение числа ошибочных событий, которые принципиально можно выявить, к общему числу ошибочных

$$E_1 = \frac{M}{M + T}. \quad (14)$$

С учетом неодинаковых вероятностей различных ошибочных событий эффективность диагностирования можно определять следующим образом:

$$E_2 = \frac{\sum_{j=1}^M Q(B_j)}{\sum_{j=1}^M Q(B_j) + \sum_{v=1}^T Q(C_v)}. \quad (15)$$

**Иллюстративный пример.** На рис. 3 представлена однолинейная схема распределительного устройства, в котором контролируется правильность сигнализации положений высоковольтных выключателей и изме-

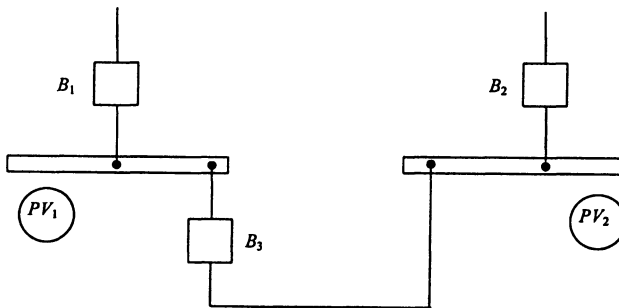


Рис. 3. Функциональная схема сигнализации положений высоковольтных выключателей и измерений напряжений на шинах распределительного устройства

рений фазных напряжений. Контроль осуществляется по пяти каналам. Контролируются положения выключателей  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и напряжения на шинах  $PV_1$ ,  $PV_2$ . Все возможные состояния ( $N = 32$ ), из которых 16 технологически непротиворечивы и 16 технологически противоречивы, представлены соответственно в табл. 1 и 2.

## Непротиворечивые состояния

Каналы сигнализации и измерений	Номер состояния															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$B_1$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$B_2$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
$B_3$	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1
$PV_1$	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$PV_2$	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Таблица 2

## Противоречивые состояния

Каналы сигнализации и измерений	Номер состояния															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$B_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
$B_2$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
$B_3$	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
$PV_1$	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$PV_2$	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0

Исходные вероятности существования технологически непротиворечивых истинных состояний  $P^*(A_i)$ , определенные методом экспертных оценок с учетом априори известной информации о режимах работы системы, и их нормированные значения  $P(A_i)$ , согласно условию (11), приведены в табл. 3. При этом предполагалось равенство вероятностей ошибок типа «отключено» и «включено» для дискретных переменных и типа «нет сигнала» и «есть сигнал» для аналоговых переменных.

Таблица 3

Номер состояния	Значение вероятности			
	$P^*(A_i)$	$P(A_i)$	$Q(B_j)$	$Q(C_v)$
1	0,045	0,044052	0,000640	0,000152
2	0,020	0,019578	0,000640	0,000321
3	0,020	0,019578	0,000081	0,001052
4	0,020	0,019578	0,000060	0,000321
5	0,020	0,019578	0,000060	0,001052
6	0,700	0,685246	0,000403	0,001379
7	0,100	0,097892	0,000325	0,007248
8	0,005	0,004895	0,007258	0,000540
9	0,005	0,004895	0,000454	0,000740
10	0,005	0,004895	0,000259	0,000156
11	0,005	0,004895	0,000325	0,000740
12	0,005	0,004895	0,007258	0,000156
13	0,005	0,004895	0,000259	0,000616
14	0,020	0,019578	0,000454	0,007111
15	0,020	0,019578	0,001300	0,007111
16	0,005	0,004895	0,001300	0,000163

В этой же таблице представлены результаты расчета вероятностей технологически противоречивых состояний  $Q^*(B_j)$  и технологически непротиворечивых ошибочных состояний  $Q(C_v)$ , произведенного по формулам (9), (13), при априорной вероятности отказа элемента системы электроснабжения  $q_l = 0,01$ .

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о широком разбросе нормированных вероятностей технологически противоречивых ошибочных состояний, что дает возможность уменьшить размерность решаемой задачи, исключив из рассмотрения технологически противоречивые состояния № 3, 4, 5.

Используя формулы (14), (15), определим для данного случая эффективность методов диагностирования ошибок сигнализации и измерений  $E_1 = 0,5$ , а с учетом неодинаковых вероятностей  $E_2 = 0,42084$ .

## ВЫВОД

Получены расчетные формулы для определения количественных характеристик математической модели диагностирования ошибок результатов сигнализации положений коммутационных аппаратов в системах электроснабжения и связанных с ними результатов измерений аналоговых переменных. Приведен иллюстративный пример, дающий представление о реальных значениях этих характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А н и щ е н к о В. А., Ш у т о в А. Л. Функциональная диагностика сигнализации положения коммутационных электрических аппаратов // Электропотребление, энергоснабжение, электрооборудование: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. // Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 1999. – С. 14–16.

2. А н и щ е н к о В. А., Ш у т о в А. Л. Диагностика сигнализации положения коммутационных аппаратов в системах электроснабжения // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 1. – С. 23–27.

3. А н и щ е н к о В. А., Ш у т о в А. Л. Разработка математической модели сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 4 – С. 6–13.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 30.03.2000