

УДК 621.311.019.3

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОШИБОК СИГНАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КОММУТАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

*Белорусская государственная политехническая академия*

Эксплуатационная надежность систем электроснабжения зависит как от надежности силового электрооборудования, так и от достоверности измерительной информации, характеризующей, в частности, включенное или отключенное состояния коммутационных электрических аппаратов (автоматических выключателей, разъединителей и их заземляющих ножей), которые определяют конфигурацию действующей схемы электрических соединений.

Поддержание требуемого уровня эксплуатационной надежности измерительной информации может быть обеспечено методами функциональной диагностики, позволяющими оперативно обнаруживать недостоверные данные при включенном в работу оборудовании без использования специальных тестовых программ. Теоретической предпосылкой возможности обнаружения неисправностей в системе сигнализации является информационная избыточность, достигаемая для основной массы контролируемых дискретных переменных совместным анализом результатов сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений значений связанных с ними аналоговых переменных (в первую очередь электрических токов и напряжений).

Основанные на таком принципе методы диагностирования состояния сигнализации в системах электроснабжения [1–3] показали свою работоспособность. Однако, как выявил последующий анализ [4, 5], остаются неиспользованные возможности совершенствования и дальнейшего развития этих методов, для реализации которых необходимо разработать уточненную и более полную математическую модель решаемой задачи.

**Описание контролируемых переменных и ошибок их сигнализации и измерений.** В случае, когда сигнализация положения коммутационного аппарата производится по двум измерительным каналам, в цепи одного из которых задействован замыкающий вспомогательный блок-контакт, а в другом – размыкающий, положение аппарата в терминах булевой алгебры описывается следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} K_{\text{откл}} = 1; K_{\text{вкл}} = 0, & \text{ если аппарат отключен;} \\ K_{\text{откл}} = 0; K_{\text{вкл}} = 1, & \text{ если аппарат включен.} \end{aligned} \quad (1)$$

На практике сигнализация положений коммутационных аппаратов в большинстве случаев осуществляется по одному каналу:

$$\begin{aligned} K_i &= 0, \text{ если аппарат отключен;} \\ K_i &= 1, \text{ если аппарат включен.} \end{aligned} \quad (2)$$

Измеряемые значения аналоговых входных  $x_i$  и выходных  $y_i$  переменных представляются в дискретной форме таким образом, что отсутствию переменной соответствует логический нуль, а присутствию — логическая единица:

$$\begin{aligned} x_i(y_i) &= 0, \text{ если значение аналоговой переменной не превышает порога } \alpha; \\ x_i(y_i) &= 1, \text{ если значение аналоговой переменной превышает порог } \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина порога чувствительности  $\alpha$  составляет сотые доли от номинального или максимального значения измеряемой переменной и позволяет отстроиться от случайных помех и измерительных токов (при измерениях напряжений).

Неисправности сигнализации могут быть двух типов:

ошибки типа «отключено», когда сигнализация показывает отключенное состояние при фактически включенном аппарате;

ошибки типа «включено», когда сигнализация показывает включенное состояние при фактически отключенном аппарате.

Если результаты измерений аналоговых переменных не прошли предварительно свой внутренний контроль, то их возможные ошибки при совместном рассмотрении с результатами сигнализации дискретных переменных могут быть следующими:

ошибки типа «нет сигнала», когда измерение показывает отсутствие аналоговой переменной, а на самом деле последняя присутствует;

ошибки типа «есть сигнал», когда измерение показывает присутствие аналоговой переменной во время ее фактического отсутствия.

**Формирование состояний значений переменных.** Система сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений связанных с ними аналоговых переменных представляет собой в терминах технической диагностики [6] дискретный комбинационный одноктактный объект, или объект без памяти. Координаты (переменные) этого объекта задаются на конечных множествах, а величины выходных переменных определяются только значениями входных и промежуточных переменных и не зависят от времени.

Множества входных  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_{\text{вх}}}\}$  и выходных  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_{\text{вых}}}\}$  переменных представляют в рассматриваемой задаче значения электрических токов  $I_i$  и фазных напряжений  $U_i$  в разных точках схемы электрических соединений, представленных в дискретной форме согласно (3), и имеют вид:

$$\begin{aligned} X &= \{I_{1_{\text{вх}}}, I_{2_{\text{вх}}}, \dots, I_{r_{\text{вх}}}, U_{1_{\text{вх}}}, U_{2_{\text{вх}}}, \dots, U_{s_{\text{вх}}}\}; \\ Y &= \{I_{1_{\text{вых}}}, I_{2_{\text{вых}}}, \dots, I_{r_{\text{вых}}}, U_{1_{\text{вых}}}, U_{2_{\text{вых}}}, \dots, U_{s_{\text{вых}}}\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r_{\text{вх}} (\text{вых})$  — число входных (выходных) контролируемых токов;

$s_{\text{вх}} (\text{вых})$  — то же, напряжений.

Функция проводимости  $\Phi\Pi = \{\Phi\Pi_1, \Phi\Pi_2, \dots, \Phi\Pi_N\}$  определяет электрическую связь между различными входными и выходными аналоговыми переменными ( $N$  — число состояний системы). Она зависит от конфигурации схемы электрических соединений и состояний «включено», «отключено» коммутационных аппаратов. В общем случае компоненты функции проводимости имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi\Pi_1 &= f_1(k_1, k_2, \dots, k_{n_k}); \Phi\Pi_2 = f_2(k_1, k_2, \dots, k_{n_k}); \dots; \\ \Phi\Pi_N &= f_N(k_1, k_2, \dots, k_{n_k}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $n_k$  — число дискретных переменных.

Значение  $\Phi\Pi_j = 1$  соответствует наличию электрической цепи между соответствующей входной и выходной парой аналоговых переменных, значение  $\Phi\Pi_j = 0$  — разрыву цепи.

Блок-схема постановки задачи диагностирования приведена на рис. 1.

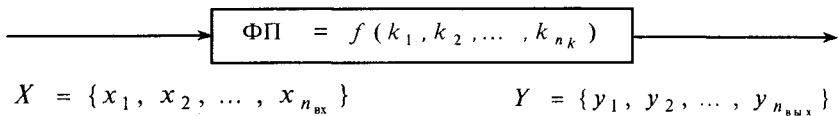


Рис. 1

Состояние системы сигнализации и измерений характеризуется функцией исправности  $Z$ , зависящей от множества входных и выходных аналоговых переменных и функции проводимости, определяющей состояния коммутационных аппаратов,

$$Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_N\} = \varphi(X, \Phi\Pi, Y). \quad (6)$$

Компоненты функции исправности, имеющие значение  $Z_j = 1$ , определяют подмножество истинных, т. е. технологически непротиворечивых и логически согласованных состояний значений аналоговых и дискретных переменных в нормальном режиме работы. Составляющие, имеющие значение  $Z_j = 0$ , соответствуют подмножеству ошибочных (противоречивых) состояний значений переменных. Технологическая непротиворечивость должна соответствовать нормальным (неаварийным) условиям работы и учитывать возможность блокировки разъединителей и заземляющих ножей.

Вместе взятые подмножества истинных и ошибочных комбинаций бинарных значений переменных образуют множество состояний системы

$$N = 2^{(n_a + n_k)}, \quad (7)$$

где  $n_a = (n_{\text{вх}} + n_{\text{вых}})$  — число аналоговых переменных.

В табл. 1 представлены в полной агрегированной форме все возможные типы истинных состояний системы сигнализации и измерений для

однородных входных (выходных) аналоговых переменных и любой конфигурации схемы электрических соединений. Все многообразие схем соединений и комбинаций положений коммутационных аппаратов, соответствующих противоречивым и непротиворечивым состояниям, обобщено в бинарных значениях функции проводимости.

Таблица 1

Типовая таблица истинности для однородной входной (выходной) информации

| Номер состояния | Входные переменные | ФП | Выходные переменные |
|-----------------|--------------------|----|---------------------|
|                 | $I_{вх}$           |    | $I_{вых}$           |
| 1               | 0                  | 0  | 0                   |
| 2               | 0                  | 1  | 0                   |
| 3               | 1                  | 1  | 1                   |
|                 | $U_{вх}$           |    | $U_{вых}$           |
| 4               | 0                  | 0  | 0                   |
| 5               | 0                  | 1  | 0                   |
| 6               | 1                  | 0  | 0                   |
| 7               | 1                  | 1  | 1                   |
|                 | $I_{вх}$           |    | $U_{вых}$           |
| 8               | 0                  | 0  | 0                   |
| 9               | 0                  | 1  | 0                   |
| 10              | 0                  | 1  | 1                   |
| 11              | 1                  | 1  | 1                   |
|                 | $U_{вх}$           |    | $I_{вых}$           |
| 12              | 0                  | 0  | 0                   |
| 13              | 0                  | 1  | 0                   |
| 14              | 1                  | 0  | 0                   |
| 15              | 1                  | 1  | 0                   |
| 16              | 1                  | 1  | 1                   |
|                 | $I_{вх}$           |    | $U_{вх}$            |
| 17              | 0                  | 0  | 0                   |
| 18              | 0                  | 0  | 1                   |
| 19              | 0                  | 1  | 0                   |
| 20              | 0                  | 1  | 1                   |
| 21              | 1                  | 1  | 1                   |
|                 | $I_{вых}$          |    | $U_{вых}$           |
| 22              | 0                  | 0  | 0                   |
| 23              | 0                  | 1  | 0                   |
| 24              | 0                  | 1  | 1                   |
| 25              | 1                  | 1  | 1                   |

Состояния № 1–9, 12–14, 17–19, 22, 23 в табл. 1 внутренне непротиворечивы и представляют собой безусловно истинные комбинации значений переменных  $X$ ,  $Y$ , ФП. Это не исключает внешнюю противоречивость безусловно истинных состояний по отношению к неизвестной измерительной информации, не учтенной в рассматриваемой таблице. Поэтому возможна маскировка под истинные тех ошибочных состояний, которые внутренне непротиворечивы.

Состояния № 10, 11, 15, 16, 20, 21, 24, 25 в табл. 1 представляют собой условно истинные комбинации значений переменных, поскольку при  $\Phi\Pi = 1$  и  $U_{\text{вх}} = 1$  или  $U_{\text{вых}} = 1$  возможны два значения переменных  $I_{\text{вх}}$  или  $I_{\text{вых}}$  в зависимости от того, включен или отключен электроприемник.

В табл. 2 представлены в полной агрегированной форме все возможные типы ошибочных состояний системы сигнализации и измерений для однородных входных (выходных) аналоговых переменных и любой конфигурации схемы электрических соединений, технологически противоречивые независимо от любых внешних, не отраженных в таблице, факторов. При наличии соответствующей дополнительной достоверной информации некоторые условно истинные комбинации из табл. 1 также становятся противоречивыми и должны быть перемещены в табл. 2.

Таблица 2

Типовая таблица ошибок для однородной входной (выходной) информации

| Номер состояния | Входные переменные | $\Phi\Pi$ | Выходные переменные |
|-----------------|--------------------|-----------|---------------------|
|                 | $I_{\text{вх}}$    |           | $I_{\text{вых}}$    |
| 1               | 0                  | 0         | 1                   |
| 2               | 0                  | 1         | 1                   |
| 3               | 1                  | 1         | 0                   |
| 4               | 1                  | 0         | 1                   |
| 5               | 1                  | 0         | 0                   |
|                 | $U_{\text{вх}}$    |           | $U_{\text{вых}}$    |
| 6               | 0                  | 0         | 1                   |
| 7               | 0                  | 1         | 1                   |
| 8               | 1                  | 0         | 1                   |
| 9               | 1                  | 1         | 0                   |
|                 | $I_{\text{вх}}$    |           | $U_{\text{вых}}$    |
| 10              | 0                  | 0         | 1                   |
| 11              | 1                  | 1         | 0                   |
| 12              | 1                  | 0         | 1                   |
| 13              | 1                  | 0         | 0                   |
|                 | $U_{\text{вх}}$    |           | $I_{\text{вых}}$    |
| 14              | 0                  | 0         | 1                   |
| 15              | 1                  | 0         | 1                   |
| 16              | 0                  | 1         | 1                   |
|                 | $I_{\text{вх}}$    |           | $U_{\text{вх}}$     |
| 17              | 1                  | 0         | 0                   |
| 18              | 1                  | 0         | 1                   |
| 19              | 1                  | 1         | 0                   |
|                 | $I_{\text{вых}}$   |           | $U_{\text{вых}}$    |
| 20              | 0                  | 0         | 1                   |
| 21              | 1                  | 0         | 0                   |
| 22              | 1                  | 0         | 1                   |
| 23              | 1                  | 1         | 0                   |

Для случая, когда на входе (выходе) контролируются разнородные переменные ( $I$  и  $U$ ), полная таблица состояний, включающая как истинные, так и ошибочные комбинации переменных, приведена в табл. 3.

Таблица 3

Типовая таблица истинных и ошибочных состояний для разнородной входной (выходной) информации

| Номер состояния | Функция исправности $Z$ |          |           |           | ФП |   |
|-----------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|----|---|
|                 | $I_{вх}$                | $U_{вх}$ | $I_{вых}$ | $U_{вых}$ | 1  | 0 |
| 1               | 0                       | 0        | 0         | 0         | 1  | 1 |
| 2               | 0                       | 0        | 0         | 1         | 0  | 0 |
| 3               | 0                       | 0        | 1         | 0         | 0  | 0 |
| 4               | 0                       | 0        | 1         | 1         | 0  | 0 |
| 5               | 0                       | 1        | 0         | 0         | 0  | 1 |
| 6               | 0                       | 1        | 0         | 1         | 1  | 0 |
| 7               | 0                       | 1        | 1         | 0         | 0  | 0 |
| 8               | 0                       | 1        | 1         | 1         | 0  | 0 |
| 9               | 1                       | 0        | 0         | 0         | 0  | 0 |
| 10              | 1                       | 0        | 0         | 1         | 0  | 0 |
| 11              | 1                       | 0        | 1         | 0         | 0  | 0 |
| 12              | 1                       | 0        | 1         | 1         | 0  | 0 |
| 13              | 1                       | 1        | 0         | 0         | 0  | 0 |
| 14              | 1                       | 1        | 0         | 1         | 0  | 0 |
| 15              | 1                       | 1        | 1         | 0         | 0  | 0 |
| 16              | 1                       | 1        | 1         | 1         | 1  | 0 |

Поскольку число возможных состояний системы для реальных схем электрических соединений подстанций и распределительных устройств весьма велико, актуален вопрос представления типовых таблиц в минимальной форме.

В минимальной форме типовая таблица истинных и ошибочных состояний для разнородной входной (выходной) информации представлена в табл. 4, где символ \* присвоен фиктивным аналоговым переменным, т. е. таким, значения которых не влияют на данную функцию исправности  $Z_j$ . Принимаем, что лежащая на пересечении каждой строки и каждого столбца функция  $Z\{x_1, y_1, \dots, x_{i-1}, y_{i-1}, x_i(y_i), x_{i+1}, y_{i+1}, \dots, x_{n_{вх}}, y_{n_{вых}}\}$  не зависит от значения переменной  $x_i(y_i)$ , если имеет место соотношение:

$$\begin{aligned}
 Z\{x_1, y_1, \dots, x_{i-1}, y_{i-1}, 0, x_{i+1}, y_{i+1}, \dots, x_{n_{вх}}, y_{n_{вых}}\} = \\
 = Z\{x_1, y_1, \dots, x_{i-1}, y_{i-1}, 1, x_{i+1}, y_{i+1}, \dots, x_{n_{вх}}, y_{n_{вых}}\}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Эквивалентная табличной форме логика истинных и ошибочных состояний может быть записана и в аналитическом виде. Например, для табл. 4 логика истинности выглядит следующим образом:

Типовая таблица истинных и ошибочных состояний для разнородной входной (выходной) информации в минимальной форме

| Номер состояния | Функция исправности Z |          |           |           | ФП |   |
|-----------------|-----------------------|----------|-----------|-----------|----|---|
|                 | $I_{ВХ}$              | $U_{ВХ}$ | $I_{ВЫХ}$ | $U_{ВЫХ}$ | 1  | 0 |
| 1               | 0                     | 0        | 0         | 0         | 1  | 1 |
| 2               | 0                     | 1        | 0         | 0         | 0  | 1 |
| 3               | 0                     | 1        | 0         | 1         | 1  | 0 |
| 4               | 1                     | 1        | 1         | 1         | 1  | 0 |
| 5               | 0                     | 0        | *         | 1         | 0  | 0 |
| 6               | 0                     | *        | 1         | *         | 0  | 0 |
| 7               | 1                     | 0        | *         | *         | 0  | 0 |
| 8               | 1                     | 1        | 0         | *         | 0  | 0 |
| 9               | 1                     | 1        | 1         | 0         | 0  | 0 |

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge \bar{U}_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge \bar{U}_{ВХ} \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}); \\
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge \bar{U}_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \overline{\Phi П}; \\
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge U_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \Phi П; \\
 I_{ВЫХ} \wedge U_{ВЫХ} &= I_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \Phi П.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Логика ошибочных состояний для табл. 4:

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge \bar{U}_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \Phi П; \\
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge U_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \overline{\Phi П}; \\
 I_{ВЫХ} \wedge U_{ВЫХ} &= I_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge \overline{\Phi П}; \\
 (I_{ВЫХ} \vee \bar{I}_{ВЫХ}) \wedge U_{ВЫХ} &= \bar{I}_{ВХ} \wedge \bar{U}_{ВХ} \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}); \\
 I_{ВЫХ} \wedge (U_{ВЫХ} \vee \bar{U}_{ВЫХ}) &= \bar{I}_{ВХ} \wedge (U_{ВХ} \vee \bar{U}_{ВХ}) \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}); \\
 (I_{ВЫХ} \vee \bar{I}_{ВЫХ}) \wedge (U_{ВЫХ} \vee \bar{U}_{ВЫХ}) &= I_{ВХ} \wedge \bar{U}_{ВХ} \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}); \\
 \bar{I}_{ВЫХ} \wedge (U_{ВЫХ} \vee \bar{U}_{ВЫХ}) &= I_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}); \\
 I_{ВЫХ} \wedge \bar{U}_{ВЫХ} &= I_{ВХ} \wedge U_{ВХ} \wedge (\Phi П \vee \overline{\Phi П}).
 \end{aligned} \tag{10}$$

### ВЫВОДЫ

1. Разработана дискретная математическая модель сигнализации положения коммутационных электрических аппаратов и функционально связанных с ними измерений аналоговых переменных, позволяющая организовать контроль достоверности измерительной информации о состоянии системы электроснабжения методами функциональной диагностики.

2. Показана возможность минимизации таблицы состояний значений сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений аналоговых переменных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анищенко В. А. Выявление ошибок сигнализации положения коммутирующей аппаратуры при помощи ЭВМ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1982. – № 9. – С. 24–28.

2. Анищенко В. А. Совместный контроль достоверности сигнализации положения коммутационной аппаратуры и измерений аналоговых переменных // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 1–2. – С. 9–13.

3. Анищенко В. А., Суле Итопа Малик. Комбинированный контроль достоверности сигнализации положения коммутационной аппаратуры и измерений аналоговых переменных // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1995. – № 3–4. – С. 52–56.

4. Анищенко В. А., Шутов А. Л. Функциональная диагностика сигнализации положения коммутационных электрических аппаратов // Электропотребление, энергоснабжение, электрооборудование: Тез. докл. всероссийской науч.-техн. конф. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 1999. – С. 14–16.

5. Анищенко В. А., Шутов А. Л. Диагностика сигнализации положения коммутационных аппаратов в системах электроснабжения // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 1. – С. 23–27.

6. Надежность и эффективность в технике. – Т. 9. Техническая диагностика / И. М. Синдеев, В. Ф. Воскобоев, Д. В. Гаскаров и др.; Под общ. ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 14.02.2000

УДК 621.311

## ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Канд. техн. наук ДУЛЕСОВ А. С.

*Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова*

Одной из важнейших задач в условиях рыночной экономики является оптимальная загрузка по мощности электроэнергетической системы (ЭЭС). Она достигается, в частности, наилучшим распределением загрузки электростанций, но лишь в том случае, когда последняя располагает резервом мощности и топлива. Решение задачи может быть достигнуто путем применения методов оптимизации.

Задача оптимизации сводится к определению экстремального значения критерия при наличии ограничений. Оптимальный режим будет достигаться за счет наиболее экономичного распределения активных мощностей между включенными на параллельную работу станциями.

В статье предлагается математическая модель, описывающая задачу и один из подходов ее реализации, основанный на методе множителей Лагранжа. Решение ориентировано на определение оптимального распределения мощностей между станциями в ЭЭС.