рактер в радиальном направлении и скручивают обмотку в тангенциальном направлении в сторону намотки. От витка к витку эти силы уменьшаются, а на внешний виток действуют сжимающие силы и стремятся повернуть его в сторону, противоположную намотке.

ЛИТЕРАТУРА

1. З а р е ц к и й, Е. Ф. Собственные электродинамические усилия проводника с током, имеющего форму дуги окружности / Е. Ф. Зарецкий // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений). – 1978. – № 7. – С. 22–26.

2. С т р е л ю к, М. И. Численный метод расчета электродинамических усилий в системе произвольно расположенных винтообразных проводников / М. И. Стрелюк, В. В. Павловец // Электричество. – 1981. – № 5. – С. 86–88.

3. Т а м м, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: Наука, 1976. – 388 с.

4. Э л е к т р о д и н а м и ч е с к а я стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А. И. Лурье // Труды ВЭИ. – М.: Знак, 2005. – 520 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 21.11.2007

УДК 621.311

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СИГНАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А.

Белорусский национальный технический университет

Надежность функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства определяется как надежностью схемы электрических соединений и силового электротехнического оборудования, так и достоверностью измерительной информации, характеризующей включенное или отключенное состояние коммутационных электрических аппаратов (дискретные переменные) и режимные параметры (аналоговые переменные).

Недостоверность результатов измерений аналоговых переменных (электрических токов, напряжений, активных и реактивных мощностей и энергий) и результатов сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов (выключателей, разъединителей и их заземляющих ножей) приводит к неадекватной оценке дежурным диспетчерским персоналом режимов работы и фактических схем электрических соединений систем генерации, передачи и потребления электрической энергии. Это вызывает ошибочные действия оперативного персонала, что увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций и снижает экономичность работы систем электроснабжения.

Снижение аварийного недоотпуска электроэнергии при возникновении аварийных ситуаций и сокращение времени восстановления нормального электроснабжения практически невозможны при отсутствии достоверной информации о фактически имеющей место в данный момент времени конфигурации схемы электрических соединений. При этом в первую очередь важна первичная информация о состоянии двухпозиционных датчиков, контролирующих положение коммутационного оборудования первичных и вторичных цепей энергообъектов. На крупных системообразующих подстанциях требуется обеспечить контроль текущего состояния тысячи и более двухпозиционных датчиков, а на подстанциях 35–110 кВ – от нескольких десятков до нескольких сотен. Эффективный контроль этих датчиков практически невозможен без достоверных измерений аналоговых переменных: электрических токов, напряжений, мощностей, энергий [1, 2].

Предлагаемые и исследуемые в настоящей работе методы позволяют выявлять недостоверные результаты сигнализации, вызываемые:

- неисправностями первичных двухпозиционных датчиков дискретной информации, отражающей включенное или отключенное положение коммутационных аппаратов, из-за недовключения или залипания вспомогательных блок-контактов приводов аппаратов;
- ошибками монтажа цепей сигнализации;
- внутренними и внешними электромагнитными помехами, возникающими, например, при неблагоприятных атмосферных условиях;
- неисправностями программно-технических средств, осуществляющих сбор, передачу и обработку измерительной информации.

Одновременно происходит обнаружение грубых погрешностей измерений аналоговых переменных, которые технологически связаны с контролируемыми аналоговыми переменными.

Математический аппарат, используемый для обнаружения и локализации недостоверных данных, соответствует бинарной модели объекта с сетевой структурой. Необходимым условием контроля достоверности является наличие информационной избыточности. Информационную базу образуют значения дискретных переменных, характеризующие положение коммутационных аппаратов, и результаты измерений аналоговых переменных в цифровом коде [3–5].

Дополнительная информация, обеспечивающая избыточность, может быть:

- структурной, когда дублируются измерительные цепи сигнализации коммутационного аппарата или аналоговая переменная измеряется двумя приборами;
- функциональной, обусловленной взаимными технологическими связями между положениями аппаратов и наличием или отсутствием соответствующих аналоговых переменных;
- временной, предполагающей использование допустимого по производственным условиям запаса времени для многократного повторения сообщения по каналу связи или восстановления прерванного в результате отказа вычислительного комплекса процесса обработки сообщения.

Исследуемые логические методы контроля достоверности сигнализации и измерений носят семантический характер и основываются на анализе

технологической согласованности и логичности собираемых данных. Они дополняют известные цифровые коды, применяемые в вычислительных комплексах для обнаружения и исправления ошибок, появляющихся в результате сбоев и отказов, но не учитывающих семантику измеряемой технологической информации, что увеличивает вероятность ложного спокойствия.

Сигнализация положений коммутационных аппаратов обычно осуществляется по одному измерительному каналу, в цепи которого задействованы вспомогательные блок-контакты. Положение аппарата характеризуется бинарными значениями:

$$K_i = 0, \text{ если аппарат отключен;}$$
$$K_i = 1, \text{ если аппарат включен.} \qquad (1)$$

Измерения аналоговых переменных представляются в дискретной форме таким образом, что отсутствию измеряемой величины соответствует логический нуль, а присутствию – логическая единица.

Схема информационных потоков в задачах контроля достоверности и управления оперативными переключениями коммутационной аппаратуры, в которой в известительную информацию наряду с результатами сигнализации включены результаты измерений связанных с ними аналоговых переменных, представлена на рис. 1.

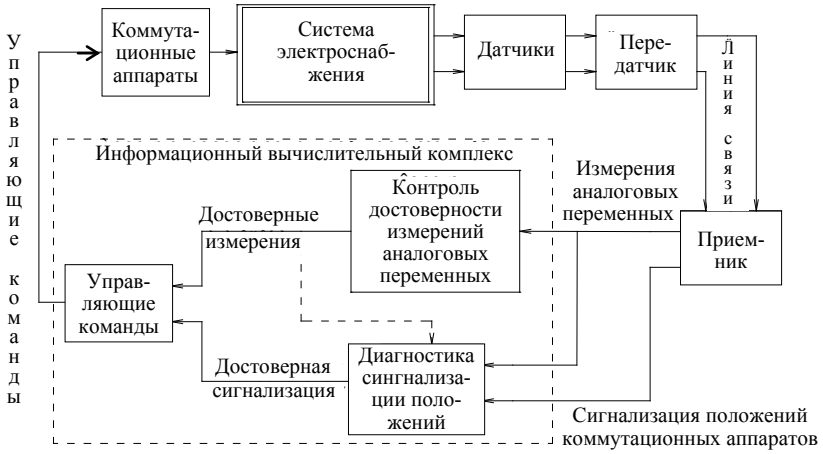

Рис. 1. Схема основных информационных потоков в системе измерений, сбора и обработки измерительной информации

При двухступенчатой структуре диагностики вначале осуществляется контроль достоверности только измеренных аналоговых переменных известными методами (по предельным значениям, по первым приращениям, с использованием уравнений связи), а затем контролируется достоверность результатов сигнализации коммутационных аппаратов путем их сопоставления с достоверными значениями аналоговых переменных.

При одноступенчатой структуре диагностики совместно анализируются значения дискретных и аналоговых переменных и одновременно обнаруживаются ошибки сигнализации и анормально большие погрешности измерений четырех типов:

• ошибки сигнализации типа «отключено», когда сигнализация показывает отключенное положение при фактически включенном аппарате;

• ошибки сигнализации типа «включено», когда сигнализация показывает включенное положение, хотя фактически он отключен;

• грубые погрешности измерений аналоговых переменных типа «нет сигнала», когда измерение показывает отсутствие сигнала (тока, напряжения, мощности), а в действительности он имеет место;

• грубые погрешности измерений аналоговых переменных типа «есть сигнал», когда измерение показывает наличие сигнала, а в действительности он отсутствует.

Система сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений связанных с ними аналоговых переменных рассматривается как дискретный комбинационный однотактный объект, или объект без памяти. Координаты (переменные) этого объекта задаются на конечных множествах, а значения выходных переменных определяются значениями входных и промежуточных переменных и не зависят от времени.

Состояния системы сигнализации и измерении описываются системой логических уравнений, отражающих взаимозависимость контролируемых дискретных и аналоговых переменных. Эти логические уравнения графически представляются в виде таблиц истинности и ошибок [1, 2].

В общем виде структура математической модели системы сигнализации и измерений представлена на рис. 2.

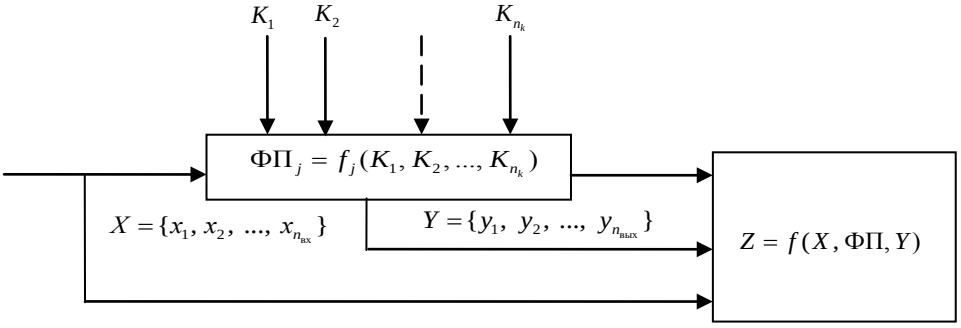

Рис. 2

Множества входных $X = \{x_1, x_2, ..., x_{n_{вх}}\}$ и выходных $Y = \{y_1, y_2, ..., y_{n_{вых}}\}$ аналоговых переменных представляют значения электрических токов и напряжений в дискретной форме. Здесь $n_{вх}$ и $n_{вых}$ – количество входных и выходных аналоговых переменных соответственно.

Для определения существования электрической связи между входными и выходными аналоговыми переменными введено понятие функции проводимости

$$\Phi\Pi = \{\Phi\Pi_1, \Phi\Pi_2, \ldots, \Phi\Pi_N\}, \quad (2)$$

где N – количество состояний системы сигнализации и измерений,

$$N = 2^{n_a + n_k}, \quad (3)$$

где n_k, n_a – количество дискретных и аналоговых переменных.

Функция проводимости зависит от конфигурации схемы электрических соединений системы электроснабжения и состояний «включено», «отключено» коммутационных аппаратов. Компоненты этой функции имеют вид

$$\Phi\Pi_j = f_j(K_1, K_2, ..., K_{n_k}), \qquad j = 1, 2, \ldots, N. \tag{4}$$

Значение $\Phi\Pi_j = 1$ соответствует наличию электрической связи между парой соответствующих входных и выходных аналоговых переменных, значение $\Phi\Pi_j = 0$ – разрыву электрической цепи.

На основе использования функций проводимости, определяющих наличие или отсутствие электрических связей между аналоговыми переменными в функции от положений коммутационных аппаратов и функций исправности, отражающих непротиворечивость или противоречивость совместно рассматриваемых дискретных и аналоговых переменных, сформированы агрегированные типовые таблицы истинных и ошибочных состояний системы сигнализации и измерений в нормальных режимах работы для однородных и разнородных входных и выходных аналоговых переменных и любой топологии схемы электрических соединений систем электроснабжения [6, 7].

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

Элементами (переменными) истинного i-го состояния $A_t = \{a_1, a_2, \ldots, a_1, \ldots, a_n\}$ являются события $a_1, a_2, \ldots, a_1, \ldots, a_n$, состоящие в том, что измеренные значения контролируемых переменных достоверны. Здесь n – общее число контролируемых переменных.

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

$$F_{ji} = \prod_{l=1}^{k_{ji}} b_l, \qquad j = 1, \ldots, M; \qquad i = 1, \ldots, H, \tag{5}$$

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 вероятность функции перехода (5) будет:

$$Q(F_{ji}) = \prod_{l=1}^{k_{ji}} q_l, \qquad j = 1, \ldots, M; \qquad i = 1, \ldots, H, \tag{6}$$

где q_l – приведенная вероятность отказа l-го канала.

Ошибочное состояние может быть определено в зависимости от непротиворечивых состояний и функций переходов (рис. 3)

$$B_j = \sum_{i=1}^{H} (A_i F_{ji}) = \sum_{i=1}^{H} \left(A_i \prod_{l=1}^{k_{ji}} b_l \right). \tag{7}$$

Обозначив вероятность события A_i через $P(A_i)$ и вероятность события a_l через p_l, определим априорную вероятность ошибочного противоречивого состояния

$$Q(B_j) = \sum_{i=1}^{H} P(A_i) Q(F_{ji}) = \sum_{i=1}^{H} \left(P(A_i) \prod_{l=1}^{k_{ji}} q_l \right). \tag{8}$$

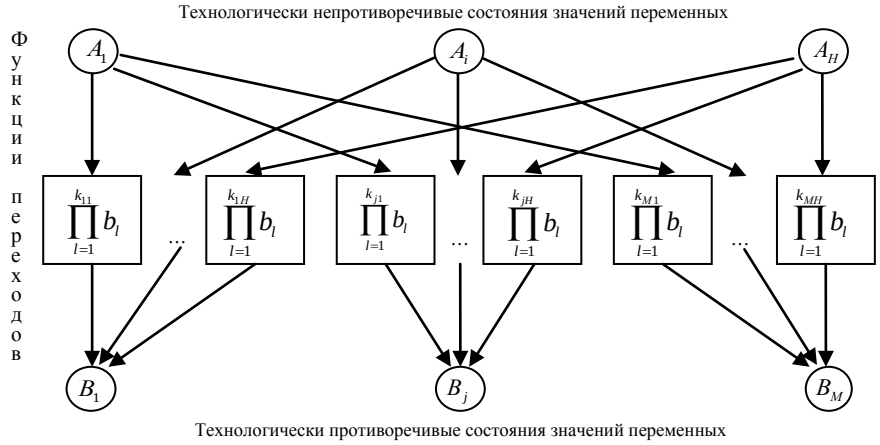

Рис. 3. Состояния системы и функции переходов от технологически непротиворечивых к технологически противоречивым состояниям

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

$$\sum_{i=1}^{H} P(A_i) + \sum_{j=1}^{M} Q(B_j) = 1. \tag{9}$$

На основе ретроспективного анализа режимов работы данной системы электроснабжения и (или) методом экспертных оценок определяем вероятности существования непротиворечивых состояний без учета возможных отказов системы сигнализации и измерений. Введя для этих вероятностей обозначение $P^*(A_i)$ и полагая, что экспертные оценки также образуют полную группу несовместных событий, имеем

$$\sum_{i=1}^{H} P^*(A_i) = 1. \tag{10}$$

Тогда априорная вероятность ошибочного состояния $Q(B_j)$

$$Q^*(B_j) = \sum_{i=1}^{H} \left(P^*(A_i) \prod_{l=1}^{k_{ji}} q_l \right). \tag{11}$$

Для соблюдения условия (11) вводится нормировочный коэффициент

$$\alpha = \frac{1}{\sum_{i=1}^{H} P^*(A_i) + \sum_{j=1}^{M} Q^*(B_j)}. \quad (12)$$

Окончательные значения нормированных априорных вероятностей существования технологически непротиворечивых и противоречивых состояний системы сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений аналоговых переменных:

$$P(A_i) = \alpha P^*(A_i);\ Q(B_j) = \alpha Q^*(B_j). \quad (13)$$

Качество рассматриваемой в работе математической модели функциональной диагностики можно оценить следующими характеристиками:

1) логической полнотой математической модели;

2) эффективностью методов диагностики, основанных на использовании данной математической модели;

3) глубиной диагностики.

Логическая полнота математической модели системы диагностики

$$\text{ЛП} = \frac{M^*}{M}, \quad (14)$$

где M – общее число противоречивых состояний значений переменных; M^* – число технологически противоречивых состояний значений переменных, вероятности которых удовлетворяют следующему условию:

$$Q(B_j) > \xi, \quad (15)$$

где ξ – порог, определяющий уровень исключаемых из рассмотрения маловероятных технологически противоречивых состояний.

Эффективность методов диагностирования ошибок сигнализации и измерений, основанных на использовании данной математической модели, может быть оценена как отношение числа ошибочных состояний, которые можно выявить с учетом (15), к общему числу ошибочных состояний (как очевидно противоречивых M, так и внешне непротиворечивых T, замаскированных под истинные, а фактически ошибочных состояний):

$$E = \frac{M^*}{M + T}. \quad (16)$$

Под глубиной диагностирования понимается количество учитываемых возможностей объяснения технологических противоречий результатов сигнализации и измерений. Она оценивается количеством непротиворечивых состояний, на основе сравнения с которыми недостоверного измеренного состояния определяются ошибочные значения измеренных дискретных и аналоговых переменных.

Возможны два подхода к организации диагностики ошибок сигнализации и измерений:

1) функциональная диагностика результатов сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов и измерений аналоговых пере-

менных путем их сравнения со значениями переменных в таблице ошибок и последующей локализацией недостоверных данных с использованием заранее сформированного словаря неисправностей;

2) функциональная диагностика результатов сигнализации положений коммутационных аппаратов и измерений аналоговых переменных путем их сравнения со значениями переменных в таблице истинности, последующей идентификацией наиболее вероятных истинных состояний и локализацией недостоверных данных в темпе процесса.

Использование словаря неисправностей требует большого объема памяти ЭВМ, но зато значительно упрощает обнаружение и локализацию недостоверных данных. Достоинством второго алгоритма является меньший объем необходимой памяти и возможность оперативной корректировки алгоритма при изменениях схемы и вероятностей истинных состояний. Однако процедура выявления ошибок в этом случае усложняется.

ВЫВОД

1. Разработана дискретная математическая модель сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов и измерений связанных с ними аналоговых переменных для функциональной диагностики достоверности измерительной информации.

2. Получены характеристики математической модели, позволяющие оценить ее логическую полноту, эффективность и глубину диагностирования достоверности измерительной информации на основе использования данной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. А н и щ е н к о, В. А. Выявление ошибок сигнализации положения коммутирующей аппаратуры при помощи ЭВМ / В. А. Анищенко // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений). – 1982. – № 9. – С. 24–28.

2. А н и щ е н к о, В. А. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В. А. Анищенко. – Минск: БГПА, 2000. – 127 с.

3. А н и щ е н к о, В. А. Совместный контроль достоверности сигнализации положений коммутационной аппаратуры и измерений аналоговых переменных / В. А. Анищенко // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 1–2. – С. 9–13.

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

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

6. А н и щ е н к о, В. А. Разработка математической модели для диагностики ошибок сигнализации положений коммутационных электрических аппаратов / В. А. Анищенко, А. Л. Шутов // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 4. – С. 6–13.

7. А н и щ е н к о, В. А. Определение количественных характеристик математической модели диагностирования ошибок сигнализации положений коммутационной электрической аппаратуры / В. А. Анищенко, А. Л. Шутов // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 5. – С. 26–33.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 8.08.2007