

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Э. К. Алгазинов, М. Г. Матвеев, Н. А. Тюкачев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 31.10.2011 г.

**Аннотация.** Предлагается дискретная имитационная модель системы противоаварийной защиты электрических сетей, состоящая из двух конечных автоматов: операционного автомата, имитирующего работу объекта управления и управляющего автомата. Рассмотрен пример реализации такой модели для системы автоматического повторного включения напряжения в электрической сети.

**Ключевые слова:** имитационная модель, системы противоаварийной защиты, электрические сети.

**Annotation.** It is proposed discrete simulation model of emergency protection of electrical networks consisting of two finite state machines: an operational machine that simulates the control object and control the machine. An example of the implementation of such a model system for auto-reclosing voltage of the electrical network.

**Keywords:** simulation model, system crash protection, electrical networks.

### ВВЕДЕНИЕ

Противоаварийная автоматика электрических сетей включает автоматическое повторное включение (АПВ) подачи электроэнергии, автоматическое включение резерва (АВР), релейную систему газовой защиты, релейную систему дифференциальной защиты, релейную систему резервной защиты, релейную систему токовой защиты. Процессами АПВ и АВР необходимо управлять с учетом известных требований [1] к параметрам объекта управления и управляющим действиям, а также специфических условий конкретного объекта управления. Разработку и отладку алгоритмов управления, отвечающих требованиям и условиям конкретного объекта, удобно проводить с использованием имитационной модели, позволяющей подбирать параметры алгоритмов и осуществлять проверку адекватности управляющих действий текущей ситуации на объекте.

Моделирование систем дискретного управления, к которым относятся системы противоаварийной автоматики, обычно осуществляется на основе той или иной формализации логичес-

ких правил функционирования и управления. Адекватным инструментом такой формализации могут выступать микропрограммные автоматы (МПА) [2]. МПА – управляющие автоматы (УА), формирующие последовательности сигналов, инициирующих выполнение микропрограмм в операционных автоматах (ОА), рассматриваемых как формализованное отображение объекта управления. Схема взаимодействия управляющего и операционного автоматов показана на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $u$  – вектор управляющих воздействий;  $Y$  – вектор, характеризующий выход объекта управления и одновременно, являющийся входом управляющего автомата;  $q$  – вектор внешних воздействий (в том числе уставки системы управления).

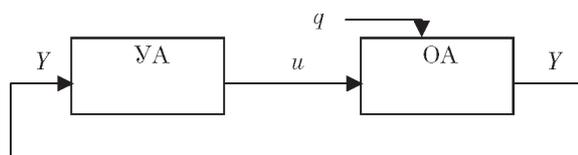


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия управляющего и операционного автоматов

Задача состоит в построении операционного автомата, адекватно имитирующего поведение объекта управления и обеспечивающего ими-

© Алгазинов Э. К., Матвеев М. Г., Тюкачев Н. А., 2011

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (ГК 16.516.11.6123).

тацию работы всей системы управления в замкнутом контуре.

### 1. ИМИТАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Пусть текущее состояние объекта управления, представляющего собой некоторую совокупность электротехнического оборудования, может быть представлено результатами измерений параметров объекта в дискретный момент времени  $t - x(t)$ . По этим результатам может быть сформирована совокупность высказываний типа: «напряжение в линии соответствует номинальному уровню», «напряжение до выключателя есть», «температура находится в допустимых пределах» и т.п. Истинность или ложность этих высказываний в текущий момент времени  $t$  определяется по результатам измерений и записывается в виде соответствующих предикатных функций

$$P_i = P(x_i(t), c) \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad (1)$$

где  $c$  – заданные параметры и уставки управления;  $n$  – количество измеряемых переменных. В общем случае, текущее состояние объекта управления будет характеризоваться кортежем бинарных переменных  $(P_1, \dots, P_n)$ , который обозначим  $S^o(t)$ . Возможное множество состояний  $\{S_j^o\}$  конечно и его мощность не может превышать  $2^n$ .

Адекватной моделью дискретного объекта управления может быть конечный автомат Мура с функцией переходов

$$S^o(t+1) = \Phi(v(t+1), S^o(t)); \quad (2)$$

и функцией выходов

$$Y(t+1) = F(S^o(t+1)). \quad (3)$$

Здесь  $v(t)$  – рассматривается как вход автомата, представляющий собой комбинацию значений управляющего сигнала  $u(t)$  и внешнего воздействия  $q(t)$ ,  $v = (u, q)$ .

Функция переходов определяется по правилу

$$v(t+1) \wedge S^o(t) \rightarrow S^o(t+1), \quad (4)$$

которое может быть представлено матрицей переходов размерности  $k \times l$ , фрагмент которой представлен ниже

$$\begin{matrix} & S^o_{l-1}(t) & S^o_l(t) & S^o_{l+1}(t) \\ v_{k-1}(t+1) & S^o_{k-1,l-1}(t+1) & S^o_{k-1,l}(t+1) & S^o_{k-1,l+1}(t+1) \\ v_k(t+1) & S^o_{k,l-1}(t+1) & S^o_{k,l}(t+1) & S^o_{k,l+1}(t+1) \\ v_{k+1}(t+1) & S^o_{k+1,l-1}(t+1) & S^o_{k+1,l}(t+1) & S^o_{k+1,l+1}(t+1) \end{matrix}.$$

Здесь верхняя строка и левый столбец обозначают исходные состояния и входы соответственно.

Выход  $Y$  ОА формируется на основе логического анализа результатов оценки ретроспективной последовательности состояний объекта управления и (или) интерпретации сочетаний логических значений измерений:

$$P_j^b = P(S^o(t), \dots, S^o(t-k), f(P_1, \dots, P_n)), \quad (5) \\ j = 1, \dots, m;$$

где  $m$  – количество условий и требований противоаварийной автоматики.

Таким образом предикатные функции (5) показывают соответствие ситуации на объекте и условий, сформулированных в требованиях к противоаварийной автоматике. Выход ОА представляет собой кортеж  $(P_1^b, \dots, P_m^b)$  бинарных значений (5). Выход рассматривается как более информативная характеристика ситуации на объекте, чем текущая состояние. Например, выход должен не только характеризовать текущее состояние, но и отвечать на вопрос как долго такое состояние уже существует; ситуация «выключатель выключен» однозначно может иметь место лишь при наличии напряжения до выключателя и отсутствии напряжения после него.

Такая трактовка выхода ОА (который является одновременно и входом УА) необходима для удобства построения противоаварийного алгоритма управления, отвечающего заданным требованиям и условиям.

Поскольку ОА может работать с различными задачами противоаварийной защиты, то его выход должен быть как можно более информативным и описывать наибольшее количество возможных ситуаций на объекте. Тогда задачей УА будет фильтрация из полученного входа только той информации, которая необходима для конкретного алгоритма управления.

Имитация функционирования ОА задается с помощью случайного изменения значений вектора внешнего воздействия  $q(t)$ . Компоненты вектора отображают внешние воздействия высказываниями вида: «на линии произошло короткое замыкание», «закипело трансформаторное масло» и т.п. Каждое высказывание может быть истинным или ложным. Компоненты вектора  $q(t)$  отображают соответствующее событие и принимают значения единица или нуль в зависимости от того произошло событие

или нет. Таким образом, комбинации нулей и единиц бинарного числа  $q(t)$  отображают внешние воздействия.

Для целей имитации будем считать, что случайные события проявления внешних воздействий независимы, имеют только два исхода и вероятности этих исходов ( $p$  и  $q$ ,  $p + q = 1$ ) не изменяются со временем. Тогда процесс проявления каждого события на некотором заданном промежутке времени отвечает условиям повторных испытаний по схеме Бернулли. Общее число повторных испытаний  $n$  – количество временных тактов на заданном промежутке; число проявлений события суть дискретная случайная величина, подчиняющаяся биномиальному закону распределения. Поскольку вероятность  $p$  проявления негативного внешнего воздействия, как правило, мала, можно считать, что проявление негативного внешнего воздействия подчиняется закону Пуассона.

Имитация внешних воздействий заключается в задании правила случайного изменения каждого  $i$ -го бита вектора  $q(t)$ . Будем считать, что каждый бит изменяется независимо от изменений других битов. Рассмотрим алгоритм изменения для одного бита. Пусть он может принимать значения 1 с вероятностью  $p_i$  (негативное внешнее воздействие произошло), а значение 0 с вероятностью  $q_i$ . Тогда, в соответствии с методом Монте-Карло зададим целочисленный интервал  $[0, 100]$  и разобьем его на два подинтервала в пропорции  $p_i / q_i$ . Далее с помощью генератора случайных чисел с равномерным распределением получаем числа из заданного интервала и если число попадает в подинтервал, соответствующий  $p_i$ , то в бите ставится единица, иначе нуль.

Если устранено негативное воздействие (например КЗ) произошло, т.е. в соответствующем бите появилась единица, то должна сработать противоаварийная автоматика, выработать необходимое управление и заменить единицу на нуль. Однако в реальной ситуации может оказаться, что устранение негативного воздействия потребует серии управляющих воздействий или вообще окажется неустранимым. Такая ситуация имитируется введением уровня  $p_3$  вероятности устранения трудноустранимого воздействия (например, с вероятностью 0,7) или неустранимого с нулевой вероятностью.

Управляющий автомат формируется под конкретную задачу противоаварийной защиты.

## 2. ПРИМЕР ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИОННОГО АВТОМАТА

Рассмотрим имитационную модель объекта управления на примере системы автоматического повторного включения (АПВ). Эта система осуществляет повторное включение электропитания потребителей после его аварийного отключения, например, вследствие короткого замыкания. Повторное включение можно производить лишь при условии соблюдения соответствующих требований и правил, например, в следующем упрощенном виде:

- алгоритмы АПВ должны приходить в действие при аварийном отключении выключателя, находившегося в работе;

- алгоритмы АПВ не должны приходить в действие при срабатывании специальных защит (сработала газовая или дифференциальная защита трансформатора, сработала дифференциальная защита шин и т.п.);

- алгоритмы АПВ должны обеспечивать определенное количество повторных включений, то есть действовать с заданной кратностью;

- время действия, как правило, должно быть минимально возможным, чтобы обеспечить быстрое восстановление подачи напряжения потребителям (например, не более 0,3–0,5 сек). Вместе с тем в некоторых случаях, когда наиболее вероятны повреждения, вызванные набросами и касаниями проводов, целесообразно принимать временные задержки срабатывания АПВ до нескольких секунд;

- алгоритмы АПВ должны обеспечивать автоматический возврат в исходное положение готовности к новому действию после включения в работу выключателей.

Будем считать, что возможны два внешних воздействия:  $q_1 \in \{0, 1\}$  – создание условий для короткого замыкания (КЗ), 0 – КЗ нет, 1 – КЗ есть;  $q_2 \in \{0, 1\}$  – поломка трансформатора, 0 – поломки нет, 1 – поломка есть. Эта составляющая входного вектора определяется случайным образом в результате имитационного моделирования. Управление  $u(t)$  принимает значения: 1 – произвести повторное включение; 0 – АПВ не производится.

Обозначим входной вектор  $v = (u, q_1, q_2)$ . Заметим, что он может принимать 8 бинарных значений.

Допустим, что состояние ОА  $S^o(t)$  в момент времени  $t$  определяется вектором измеренных значений  $x = (x_1, \dots, x_4)$ , которые представляют

собой изменения параметров электрической сети или результат срабатывания соответствующих систем релейной защиты:

$x_1$  – напряжение в линии до выключателя (1 – есть, 0 – нет);

$x_2$  – напряжение в линии после выключателя (1 – есть, 0 – нет);

$x_3$  – признак срабатывания реле токовой защиты – КЗ (1 – сработала дифференциальная защита; 0 – нет);

$x_4$  – признак срабатывания реле спецзащиты (1 – сработала дифференциальная защита; 0 – нет).

Уставки  $q^*$  системы управления имеют вид

$i$  – значение счетчика временных тактов;

$k_1$  – предельное значение кратности срабатывания;

$k_2$  – предельное значение тактов временной задержки.

Матрица, задающая функцию переходов (табл. 1), будет иметь 8 строк и менее 16 столбцов, т.к. не все сочетания нулей и единиц в векторе состояний имеют физический смысл.

Так в таблице 1 видно, что при отсутствии напряжения на входе объекта ( $x_1 = 0$ ) состояние объекта остается стабильным и смены состояний не происходит. Описание этой части матрицы не требуется. При выключенном выключателе ( $x_1 = 1, x_2 = 0$ ) не могут срабатывать реле защиты, следовательно состояния  $S_{10}^o, S_{11}^o, S_{12}^o$  не имеют физического смысла. Наконец, если выключатель включен ( $x_1 = 1, x_2 = 1$ ), то бессмысленно включать его еще раз.

Таким образом, матрица переходов может быть представлена в более компактном виде. Для имитации необходимо задать начальное

состояние –  $S^o(0)$  и параметры имитации: вероятности возникновения КЗ или неисправности трансформатора –  $p_1, p_2$ , а также уровень вероятности устранения КЗ при АПВ –  $p_3$ .

Функция выходов ОА реализует условия и требования АПВ следующими логическими выражениями:

– Анализ ситуации необходимого условия включения АПВ, выключатель отключен ( $P_1^b = 0$ ), если напряжение до него есть, а после выключателя – нет, то есть предикат имеет вид логической функции –  $x_1 \rightarrow x_2$ :

$$P_1^b = x_1 \rightarrow x_2. \quad (6)$$

– Анализ достаточного условия АПВ ( $P_2^b = 0$ ), т.е. сработало реле токовой защиты, но не сработало реле дифференциальной защиты

$$P_2^b = x_3 \rightarrow x_4. \quad (7)$$

– Обеспечение срабатывания АПВ в пределах заданной кратности  $k_1$  ( $P_3^b = 0$ ); при достижении  $k_1$  возврат счетчика тактов в нулевое состояние

$$P_3^b = \begin{cases} 1, & \text{если } i \geq k_1, \text{ в ОА } i = 0; \\ 0, & \text{если } i < k_1, \text{ в ОА } i = i + 1. \end{cases} \quad (8)$$

– Обеспечение временной задержки ( $P_4^b = 0$ ) с возвратом счетчика тактов в нулевое положение после срабатывания АПВ

$$P_4^b = \begin{cases} 1, & \text{если } i < k_2, \text{ в ОА } i = i + 1; \\ 0, & \text{если } i \geq k_2, \text{ в ОА } i = 0. \end{cases} \quad (9)$$

$$P_5^b = \begin{cases} 1, & \text{если } (P_1 = 0) \wedge (P_2 = 0) \wedge \\ & \wedge (P_3 = 0) \wedge (P_4 = 0), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

Таблица 1

Матричное задание функции переходов ОА

Входы	$S_1^o(t) \dots S_8^o(t)$	$S_9^o(t)$ 1000	$S_{10}^o(t)$ 1001	$S_{11}^o(t)$ 1010	$S_{12}^o(t)$ 1011	$S_{13}^o(t)$ 1100	$S_{14}^o(t)$ 1101	$S_{15}^o(t)$ 1110	$S_{16}^o(t)$ 1111
000		1000	–	–	–	1100	1000	1000	1000
001		1000	–	–	–	1000	1000	1000	1000
010		1000	–	–	–	1000	1000	1000	1000
011		1000	–	–	–	1000	1000	1000	1000
100		1100	–	–	–	–	–	–	–
101		1101	–	–	–	–	–	–	–
110		1110	–	–	–	–	–	–	–
111		1111	–	–	–	–	–	–	–

Выход ОА имеет вид

$$Y = (P_1^b, P_2^b, P_3^b, P_4^b, P_5^b). \quad (10)$$

Выход ОА поступает на вход УА. В данной конкретной задаче функция переходов УА задается матрицей всех возможных значений вектора  $Y$ , где каждое возможное значение вектора является строкой матрицы. Теоретически таких значений (или строк) может быть  $2^5 = 32$ . В реальной ситуации допустимых строк существенно меньше. Так в рассматриваемом примере, для реализации приведенных условий и требований АПВ достаточно задать матрицу

$$\begin{pmatrix} 1 & - & - & - & - \\ 0 & 1 & - & - & - \\ 0 & 0 & 1 & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1 & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

в которой лишь последняя строка соответствует условиям разрешения включения АПВ. Прочерки на месте элементов матрицы означают незначимость этих элементов для идентификации текущего состояния УА. Функция переходов сводится к логическому сравнению вектора  $Y$  со строками матрицы (11) и выбору состояния УА соответствующего входу.

Функция выходов УА сводится к установлению соответствия строки матрицы (11) и

**Алгазинов Э. К.** – д. ф.-м. н., профессор кафедры Информационных систем ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-724. Email: algazinov@cs.vsu.ru

**Матвеев М.Г.** – д. ф.-м. н., профессор кафедры Программирования и информационных технологий ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-470. Email: mgmatveev@yandex.ru

**Тюкачев Н.А.** – к.ф.-м. н., доцент кафедры Программирования и информационных технологий ФКН, ВГУ. Тел. (4732)208-470. Email: nik@cs.vsu.ru

компонента вектора управления  $u$ . В рассматриваемом случае вектор управления задан в следующем виде

$$u^T = (0, 0, 0, 0, 1), \quad (12)$$

где  $T$  – знак транспонирования.

Выражение (12) показывает, что лишь при выполнении всех условий и требований АПВ может быть разрешено ( $u = 1$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная имитационная модель системы противоаварийной автоматики в виде управляющего и операционного конечного автомата позволяет производить отладку алгоритмов противоаварийной защиты и оценивать параметры этих алгоритмов. Входы операционного автомата, параметры имитации, описание состояний и функцию переходов должны задавать эксперты в данной предметной области, предусматривая как можно более широкое отображение возможных состояний и входов. Функция выходов ОА определяется условиями и требованиями конкретной задачи управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. Автоматика энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

2. Макоха А.Н., Сажнюк П.А., Червяков Н.И. Дискретная математика. – М.: Физматлит, 2005.

**Algazinov E. K.** – doctor of Physics-math. Sciences, Professor of the dept. of the Information Systems, VSU, Tel. (4732)208-724

**Matveev M.G.** – doctor of Physics-math. Sciences, Professor of the dept. of the Programming and Information Systems, VSU, Tel. (4732)208-470. Email: mgmatveev@yandex.ru

**Tyukachev N.A.** – Candidat of Physics-math. Sciences, Associate Professor, the dept. of the Programming and Information Technologies, VSU. Tel. (4732)208-470. E-mail: nik@cs.vsu.ru