

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/MEBG1583>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошкеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

МРНТИ 44.29.37

<https://doi.org/10.48081/JFGD5166>***А. К. Жумадилова***Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779>*e-mail: zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В данной статье разработаны математическая модель и программное обеспечение устройства автоматического контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю в сетях напряжением 6 – 10 кВ.

Основой для разработки устройства служат существующие методы определения параметров изоляции и тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В, обладающие существенной простотой измерений и расчета параметров изоляции и тока замыкания на землю по сравнению с другими косвенными методами.

При проектировании математической модели любого цифрового устройства широко применяются методы теории автоматов и теории графов, позволяющие синтезировать достаточно сложные модели вычислительных устройств для определенных прикладных задач.

На начальном этапе разработки математической модели составлена содержательная граф-схема алгоритма, в которой внутри условных и операторных вершин записаны логические условия и микрокоманды в содержательных терминах. На основе структурной схемы и систем уравнений выходных функций и функций переходов построена логическая схема FSM устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю, приведен программный код.

Ключевые слова: электрическая сеть, изоляция, контроль, finite-state machine, программное обеспечение.

Введение

Электробезопасность и надежность электрической сети в большой мере определяются состоянием изоляции, а именно ее сопротивлением и емкостью относительно земли. Своевременное выявление и устранение дефектов, сопровождающихся изменением активной и емкостной составляющих проводимостей изоляции, позволит предотвратить большую часть повреждений, таких как однофазные замыкания на землю [1].

Однофазные замыкания на землю нередко приводят к крупным авариям, сопровождающимся значительными ущербами, и к следующим негативным последствиям [2]:

- появление в электрической сети перенапряжения порядка 2,4-3,5 кратных по сравнению с фазным;
- возникновение явления феррорезонанса, в результате которого часто выходят из строя трансформаторы напряжения;
- опасность поражения людей электрическим током при обрыве провода и падении его на землю;
- пробой изоляции статорной обмотки двигателей, что приводит к появлению опасных витковых или междуфазных коротких замыканий;
- увеличивается опасность поражения людей шаговым напряжением или напряжением прикосновения и др.

Материалы и методы

Способ измерения активной и емкостной проводимостей изоляции приведены в работах автора [3, 4], где получены формулы определения проводимостей изоляции и тока однофазного замыкания на землю:

$$g = \frac{U_x^2 - 3U_{\phi 0}^2 - U_0^2}{2U_0^2} \cdot g_0, \quad (1)$$

$$b = \frac{g_0}{U_0^2} \sqrt{4U_{\phi 0}^2 U_0^2 - (U_x^2 - 3U_{\phi 0}^2 - 3U_0^2)^2}, \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{U_\lambda U_{\phi 0}}{U_0} \cdot g_0, \quad (3)$$

где $U_{\phi 0}$ – напряжение фазы относительно земли;

U_λ – линейное напряжение;

U_0 – напряжение нулевой последовательности.

Построим цифровую модель устройства на основе *finite-state machine* (FSM), граф-схема которого приведена на рисунке 1 [5, 6].



Рисунок 1 – Граф-схема алгоритма

Устройство принимает входные сигналы $X_1 \div X_7$, результатом работы являются выходные сигналы $Y_1 \div Y_{19}$. После выполнения условия X_2 граф-схема алгоритма разделяется на три ветви. Каждую ветвь можно представить последовательным цифровым автоматом, работающим параллельно с остальными двумя (рисунок 2).

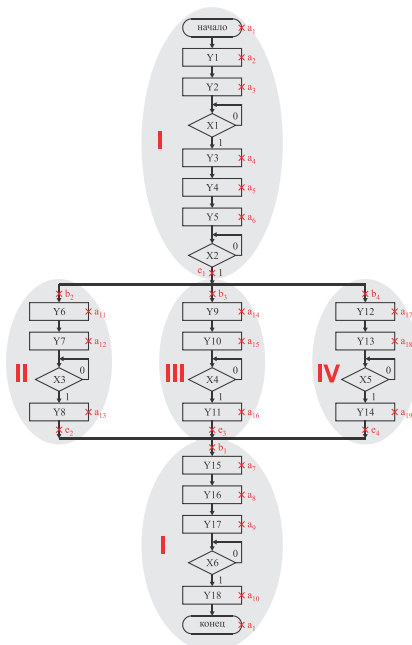


Рисунок 2 – Разделение граф-схемы алгоритма

На рисунке 2 состояниями $b_1 \div b_4$ отмечены начала ветвей, состояниями $e_1 \div e_4$ – концы, $a_1 \div a_{20}$ – состояния автомата.

Построим граф FSM по правилам отметки: состоянием a_1 отмечаются первая и последняя вершины (“начало” и “конец”); состояниями a_2, a_3, \dots, a_n отмечаются все последующие операторные вершины.

На рисунке 3 представлен граф FSM устройства контроля параметров изоляции. Каждая ветвь автомата может пребывать в одном из двух состояниях [7, 8]:

- рабочее – активные переходы из состояния в состояние;

- нерабочее – ожидание начала работы ветви или ожидание конца при синхронизации.

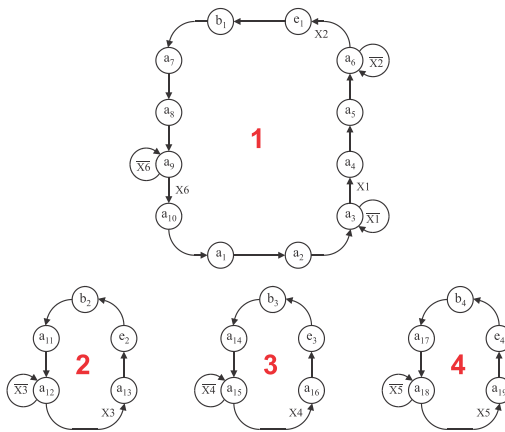


Рисунок 3 – Граф FSM устройства

Ожидание начала характерно, например, в ветвях II, III, IV, если условие $X_2 = 0$. Когда ветви II, III, IV достигнут своего конца, тогда снова запускается ветвь I, находящаяся до этого в состоянии ожидания. Автомат после состояния a_6 и выполнения соответствующего условия оказался в состоянии e_1 . В этом нерабочем состоянии он будет пребывать до тех пор, пока не перейдут в конечное состояние ветви II, III и IV. Таким образом, переход автомата из состояния b_1 в a_7 обозначится следующим образом

$$f_I^b = (a_{13} \vee e_2)(a_{16} \vee e_3)(a_{19} \vee e_4). \quad (4)$$

Таблица 1 – Структурная таблица переходов

Ветвь	Исходное состояние	Код исходного состояния	Состояние перехода	Код состояния перехода	Входной сигнал	Функция возбуждения
I	a ₁ (–)	0000	a ₂	0001	1	0001
	a ₂ (Y ₁)	0001	a ₃	0010	1	0010
	a ₃ (Y ₂)	0010	a ₃	0010	$\overline{X_1}$	0010
			a ₄	0011	X ₁	0011
	a ₄ (Y ₃)	0011	a ₅	0100	1	0100
	a ₅ (Y ₄)	0100	a ₆	0101	1	0101
			a ₆	0101	$\overline{X_2}$	0101
	a ₆ (Y ₅)	0101	e ₁	1011	X ₂	1011
			e ₁ (–)	1011	e ₁	1011
	b ₁ (–)	1010	b ₁	1010	$\overline{f_{II,III,IV}}$	1010
			a ₇	0110	$\overline{f_1^b}$	0110
	a ₇ (Y ₁₅)	0110	a ₈	0111	1	0111
	a ₈ (Y ₁₆)	0111	a ₉	1000	1	1000
	a ₉ (Y ₁₇)	1000	a ₉	1000	$\overline{X_6}$	1000
a ₁₀			1001	X ₆	1001	
a ₁₀ (Y ₁₈)	1001	a ₁	0000	1	0000	
II	b ₂ (–)	000	b ₂	000	$\overline{f_1^c}$	000
			a ₁₁	001	$\overline{f_1^c}$	001
	a ₁₁ (Y ₆)	001	a ₁₂	010	1	010
	a ₁₂ (Y ₇)	010	a ₁₂	010	$\overline{X_3}$	010
			a ₁₃	011	X ₃	011
	a ₁₃ (Y ₈)	011	b ₂	000	$\overline{f_1^b}$	000
			e ₂	100	$\overline{f_1^b}$	100
e ₂ (–)	100	e ₂	100	$\overline{f_1^b}$	100	
		b ₂	000	$\overline{f_1^b}$	000	
III	b ₃ (–)	000	b ₃	000	$\overline{f_1^c}$	000

			a ₁₄	001	f ₁ ^c	001
	a ₁₄ (Y ₉)	001	a ₁₅	010	1	010
	a ₁₅ (Y ₁₀)	010	a ₁₅	010	$\overline{X_4}$	010
			a ₁₆	011	X ₄	011
	a ₁₆ (Y ₁₁)	011	b ₃	000	f ₁ ^b	000
			e ₃	100	f ₁ ^b	100
	e ₃ (–)	100	e ₃	100	f ₁ ^b	100
			b ₃	000	f ₁ ^b	000
IV	b ₄ (–)	000	b ₄	000	f ₁ ^c	000
			a ₁₇	001	f ₁ ^c	001
	a ₁₇ (Y ₁₂)	001	a ₁₈	010	1	010
	a ₁₈ (Y ₁₃)	010	a ₁₈	010	$\overline{X_5}$	010
			a ₁₉	011	X ₅	011
	a ₁₉ (Y ₁₄)	011	b ₄	000	f ₁ ^b	000
			e ₄	100	f ₁ ^b	100
	e ₄ (–)	100	e ₄	100	f ₁ ^b	100
b ₄			000	f ₁ ^b	000	

Начало работы ветвей II, III и IV определяется условием

$$f_1^e = a_6 X_2 \vee e_1. \quad (5)$$

Условие перехода автомата в состояние b₁, когда ветви II, III и IV выйдут из состояния ожидания

$$f_{II,III,IV} = b_2 \vee b_3 \vee b_4. \quad (6)$$

Составим структурную таблицу переходов FSM устройства (таблица 1). Выходные сигналы FSM зависят только от текущего состояния, следовательно система уравнений функций выходов запишется как

$$y_1 = a_2; \quad y_7 = a_{12}; \quad y_{13} = a_{18}; \quad (7)$$

$$\begin{array}{lll}
y_2 = a_3; & y_8 = a_{13}; & y_{14} = a_{19}; \\
y_3 = a_4; & y_9 = a_{14}; & y_{15} = a_7; \\
y_4 = a_5; & y_{10} = a_{15}; & y_{16} = a_8; \\
y_5 = a_6; & y_{11} = a_{16}; & y_{17} = a_9; \\
y_6 = a_{11}; & y_{12} = a_{17}; & y_{18} = a_{10}.
\end{array}$$

Функции переходов определяются по функциям возбуждения (таблица 1), которые в свою очередь зависят от текущего состояния автомата и входных сигналов.

На основе анализа структурной таблицы переходов, составляются:

- система функций перехода для ветви I

$$\begin{aligned}
D_{11} &= a_6 X_2 \vee e_1 f_{234} \vee e_1 \overline{f_{234}} \vee b_1 \overline{f_1^b} \vee a_8 \vee a_9 \overline{X_6} \vee a_9 X_6 = \\
&= a_6 X_2 \vee e_1 \vee b_1 \overline{f_1^b} \vee a_8 \vee a_9; \\
D_{12} &= a_4 \vee a_5 \vee a_6 \overline{X_2} \vee b_1 f_1^b \vee a_7; \\
D_{13} &= a_2 \vee a_3 \overline{X_1} \vee a_3 X_1 \vee a_6 X_2 \vee e_1 f_{234} \vee e_1 \overline{f_{234}} \vee b_1 \overline{f_1^b} \vee b_1 f_1^b \vee a_7 = \\
&= a_2 \vee a_3 \vee a_6 X_2 \vee e_1 \vee b_1 \vee a_7; \\
D_{14} &= a_1 \vee a_3 X_1 \vee a_5 \vee a_6 \overline{X_2} \vee a_6 X_2 \vee e_1 f_{234} \vee a_7 \vee a_9 X_6 = \\
&= a_1 \vee a_3 X_1 \vee a_5 \vee a_6 \vee e_1 f_{234} \vee a_7 \vee a_9 X_6;
\end{aligned} \tag{8}$$

- система функций перехода для ветви II

$$\begin{aligned}
D_{21} &= a_{13} \overline{f_1^b} \vee e_2 \overline{f_1^b} = \overline{f_1^b} (a_{13} \vee e_2); \\
D_{22} &= a_{11} \vee a_{12} \overline{X_3} \vee a_{12} X_3 = a_{11} \vee a_{12}; \\
D_{23} &= b_2 f_1^e \vee a_{12} X_3;
\end{aligned} \tag{9}$$

- система функций перехода для ветви III

$$D_{31} = a_{16} \overline{f_1^b} \vee e_3 \overline{f_1^b} = \overline{f_1^b} (a_{16} \vee e_3);$$

$$D_{32} = a_{14} \vee a_{15} \overline{X_4} \vee a_{15} X_4 = a_{14} \vee a_{15}; \quad (10)$$

$$D_{33} = b_3 f_1^e \vee a_{15} X_4;$$

- система функций перехода для ветви IV

$$D_{41} = a_{19} \overline{f_1^b} \vee e_4 \overline{f_1^b} = \overline{f_1^b} (a_{19} \vee e_4);$$

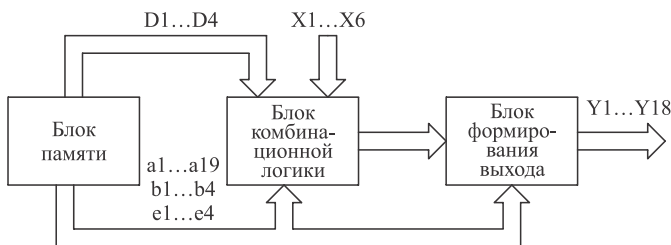
$$D_{42} = a_{17} \vee a_{18} \overline{X_5} \vee a_{18} X_5 = a_{17} \vee a_{18}; \quad (11)$$

$$D_{43} = b_4 f_1^e \vee a_{18} X_5.$$

На следующем этапе производится синтез FSM в универсальном базисе «И», «ИЛИ», «НЕ».

Результаты и обсуждение

FSM состоит из трех основных частей: регистр текущего состояния; логика переходов; логика формирования выхода. Составим структурная схему FSM разрабатываемого устройства (рисунок 4).



$D1...D4$ – функции возбуждения ветвей; $X1...X6$ – входные сигналы; $Y1...Y18$ – выходные сигналы; $a1...a19$ – состояния автомата; $b1...b4$ – состояния начала ветвей; $e1...e4$ – состояния конца ветвей

Рисунок 4 – Структурная схема FSM устройства

На основе структурной схемы и систем уравнений выходных функций и функций переходов строится логическая схема FSM, приведенная на рисунке 5.

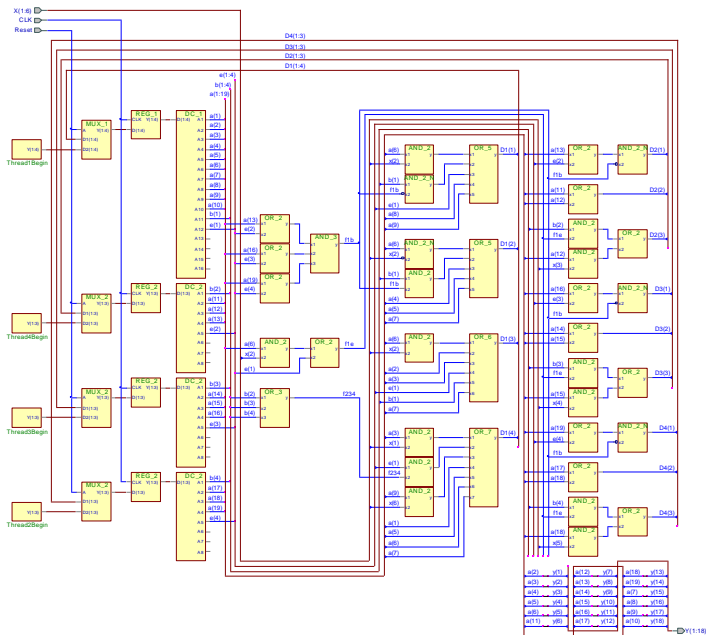


Рисунок 5 – Логическая схема FSM устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю

Память устройства организуется с помощью регистров REG, дешифраторов DC, блока сброса FSM в начальное состояние и мультиплексоров MUX.

Для разработки программы моделирования FSM разрабатываемого устройства создается VHDL-модель автомата на основе программируемой логики [9, 10]. Листинг программы в сокращенном виде приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Листинг программного кода FSM устройства

Программный код	Пояснения
library IEEE;	

use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;	
entity Device_vhdl is port(CLK, Reset: in STD_LOGIC; X : in STD_LOGIC_VECTOR(1 to 6); Y : out STD_LOGIC_VECTOR(1 to 18)); end Device_vhdl;	<i>Объявление устройства</i>
architecture behavioral of Device_vhdl is	<i>Объявление архитектуры устройства</i>
type StateType1 is (a1, a2, a3, a4, a5, a6, e1, b1, a7, a8, a9, a10); type StateType2 is (b2, a11, a12, a13, e2); type StateType3 is (b3, a14, a15, a16, e3); type StateType4 is (b4, a17, a18, a19, e4);	<i>Новые типы переменных</i>
signal State1, NextState1: StateType1; ... signal State4, NextState4: StateType4;	<i>Переменные состояния и нового состояния</i>
signal sa1, sa2, sa3, sa4, sa5, sa6, sa7, sa8, sa9, sa10, sa11, sa12, sa13, sa14, sa15, sa16, sa17, sa18, sa19, sb1, sb2, sb3, sb4, se1, se2, se3, se4: BOOLEAN; signal f1b, f1e, f234: BOOLEAN;	<i>Переменные текущего состояния и вспомогательные состояния</i>
begin	
sa1 <= true when State1 = a1 else false; ... sa19 <= true when State4 = a19 else false; sb1 <= true when State1 = b1 else false; ... sb4 <= true when State4 = b4 else false; se1 <= true when State1 = e1 else false; ... se4 <= true when State4 = e4 else false;	<i>Определение переменной состояния</i>
f1b <= (sa13 OR se2) AND (sa16 OR se3) AND (sa19 OR se4); f1e <= (sa6 AND x(2) = '1') OR se1; f234 <= sb2 OR sb3 OR sb4;	<i>Определение вспомогательных функций</i>

<pre> y(1) <= '1' when sa2 else '0'; ... y(18) <= '1' when sa10 else '0'; </pre>	<p style="text-align: center;"><i>Назначение выходных сигналов</i></p>
<pre> NextState1 <= a2 when sa1 else a3 when sa2 or (sa3 and x(1) = '0') else a4 when (sa3 and x(1) = '1') else a5 when sa4 else a6 when sa5 or (sa6 and x(2) = '0') else e1 when (sa6 and x(2) = '1') or (se1 and f234) else b1 when (se1 and not f234) or (sb1 and not f1b) else a7 when (sb1 and f1b) else a8 when sa7 else a9 when sa8 or (sa9 and x(6) = '0') else a10 when (sa9 and x(6) = '1') else a1; NextState2 <= a11 when (sb2 and f1e) else a12 when sa11 or (sa12 and x(3) = '0') else a13 when (sa12 and x(3) = '1') else e2 when (sa13 and not f1b) or (se2 and not f1b) else b2; NextState3 <= a14 when (sb3 and f1e) else a15 when sa14 or (sa15 and x(4) = '0') else a16 when (sa15 and x(4) = '1') else e3 when (sa16 and not f1b) or (se3 and not f1b) else b3; NextState4 <= a17 when (sb4 and f1e) else a18 when sa17 or (sa18 and x(5) = '0') else a19 when (sa18 and x(5) = '1') else e4 when (sa19 and not f1b) or (se4 and not f1b) else b4; </pre>	<p style="text-align: center;"><i>Определение следующего состояния</i></p>
<pre> StateAssignmentProcess: process (CLK) is begin if rising_edge (CLK) then if Reset = '1' then State1 <= a1; </pre>	<p style="text-align: center;"><i>Процесс назначения следующего состояния</i></p>

<pre> State2 <= b2; State3 <= b3; State4 <= b4; else State1 <= nextState1; State2 <= nextState2; State3 <= nextState3; State4 <= nextState4; end if; end if; end process StateAssignmentProcess; </pre>	
end behavioral;	

Выводы

Разработана модель и программное обеспечение FSM устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю. По достоверным значениям параметров изоляции и тока однофазного замыкания на землю производится стратегия выбора решения по оптимизации режима нейтрали с целью повышения уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок и обеспечения надежности системы электроснабжения промышленных предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Санатова, Т. С., Абикенова, А. А., Жандаулетова, Ф. Р. Современные методы защиты при работе электрооборудования до и выше 1000 В : учебное пособие [Текст]. – Алматы: АУЭС, 2022. – 126 с.

2 Паперный, Л. Е., Алейникова, М. В. Режимы работы нейтрали электроустановок напряжением 0,4-750 кВ [Текст]. – Минск : БНТУ, 2016. – 150 с.

3 Саятов, Ә. А., Жумадилова, А. К. Разработка устройства автоматического определения параметров изоляции электрических сетей [Текст] // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2018. – № 3. – С. 144–152.

4 Утегулов, Б. Б., Марковский, В. П., Жумадилова, А. К. Анализ сети Петри устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6-10 кВ [Текст] //

Материалы 11 МНПК «Проблемы и достижения в промышленной энергетике ПДЭ-11» в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2012». – Екатеринбург, 2012. – С. 22–27.

5 **Ожиганов, А. А.** Теория автоматов : учебное пособие [Текст]. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. – 84 с.

6 **Гуренко, В. В.** Введение в теорию автоматов : учебное пособие [Текст]. – М. : Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2013. – 62 с.

7 **Titarenko, L., Hebda, O., Barkalov, A.** Synthesis of PLA-based Moore FSM with Unconventional Presentation of State Codes [Text], IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 28, 2013. P. 250–255, <https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00025>.

8 **Barkalov, A., Titarenko, L., Kolościński, M.** EMB-based design of Mealy FSM [Text], IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 28, 2013. P. 215–220, <https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00012>.

9 **Sklyarov, V., Skliarova, Iou.** Hardware implementations of software programs based on hierarchical finite state machine models [Text], Computers & Electrical Engineering, Volume 39, Issue 7, 2013. – P. 2145–2160, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.07.019>.

10 **Martín, P., Bueno, E., Rodríguez, Fco. J., Machado, O., Vuksanovic, B.** An FPGA-based approach to the automatic generation of VHDL code for industrial control systems applications: A case study of MSOGIs implementation [Text], Mathematics and Computers in Simulation, Volume 91. – 2013. P 178–192, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.004>.

REFERENCES

1 **Sanatova, T. S., Abikenova, A. A., Zhandauletova, F. R.** Sovremennye metody zashchity pri rabote elektrooborudovaniya do i vyshe 1000 V : учебное posobie [Modern methods of protection in the operation of electrical equipment up to and above 1000 V : textbook] [Text]. – Almaty: AUES, 2022. – 126 p.

2 **Papernyi, L. E., Alenikova, M. V.** Rezhimy raboty neutrali elektroustanovok napryazheniem 0,4-750 kV [Modes of operation of the neutral of electrical installations with voltage 0.4-750 kV] [Text]. – Minsk : BNTU, 2016. – 150 p.

3 **Sayatov, Ə. A., Zhumadirova, A. K.** Razrabotka ustroistva avtomaticheskogo opredeleniya parametrov izolyatsii elektricheskikh setei [Development of a device for automatic determination of insulation parameters of electric networks] [Text] // Vestnik PGU. Energeticheskaya seriya. – 2018. – № 3. – P. 144–152.

4 **Utegulov, B. B., Markovskii, V. P., Zhumadirova, A. K.** Analiz seti Petri ustroistva kontrolya sostoyaniya izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6-10 kV [Petri net analysis of insulation condition and single-phase short circuit to ground current monitoring devices in 6-10 kV electrical networks] [Text] // Materialy 11 MNPК «Problemy i dostizheniya v promyshlennoi energetike PDE-11» v ramkakh vystavki «Energetika i elektrotehnika – 2012». – Ekaterinburg, 2012. – P. 22–27.

5 **Ozhiganov, A. A.** Teoriya avtomatov : uchebnoe posobie [State machine theory : textbook] [Text]. – Sankt-Peterburg : NIU ITMO, 2013. – 84 p.

6 **Gurenko, V. V.** Vvedenie v teoriyu avtomatov : uchebnoe posobie [Introduction to the theory of state machine : textbook] [Text]. – M. : Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2013. – 62 p.

7 **Titarenko, L., Hebda, O., Barkalov, A.** Synthesis of PLA-based Moore FSM with Unconventional Presentation of State Codes [Text], IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 28, 2013. P. 250–255. – <https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00025>.

8 **Barkalov, A., Titarenko, L., Kolopieńczyk, M.** EMB-based design of Mealy FSM [Text], IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 28, 2013, P. 215–220, <https://doi.org/10.3182/20130925-3-CZ-3023.00012>.

9 **Sklyarov, V., Skliarova, Iou.** Hardware implementations of software programs based on hierarchical finite state machine models [Text], Computers & Electrical Engineering, Volume 39, Issue 7, 2013, P. 2145–2160, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.07.019>.

10 **Martín, P., Bueno, E., Rodríguez, Fco. J., Machado, O., Vuksanovic, B.** An FPGA-based approach to the automatic generation of VHDL code for industrial control systems applications: A case study of MSOGIs implementation [Text], Mathematics and Computers in Simulation, Volume 91, 2013, P. 178–192, – <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.07.004>.

Поступило в редакцию 26.08.24

Поступило с исправлениями 06.09.24

Принято в печать 10.09.24

А. К. Жұмадирова

Торайғыров университет,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

26.08.24 ж. баспаға түсті.

06.09.24 ж. түзетулерімен түсті.

10.09.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ОҚШАУЛАУ КҮЙІН ЖӘНЕ БІР ФАЗАЛЫ ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАЛУ ТОҒЫН БАҚЫЛАУ ҚҰРЫЛҒЫСЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада кернеуі 6 – 10 кВ желілерде оқшаулау күйін және жерге бір фазалы тұйықталу тоғын автоматты бақылау құрылғысының математикалық моделі мен бағдарламалық жасақтамасы әзірленді.

Құрылғыны әзірлеудің негізі кернеуі 1000 В-тан жоғары оқшауланған бейтарап үш фазалы электр желілерінде оқшаулау және жерге тұйықталу тоғының параметрлерін анықтаудың қолданыстағы әдістері болып табылады, олар басқа жанама әдістермен салыстырғанда оқшаулау мен жерге тұйықталу тоғының параметрлерін өлшеу мен есептеудің айтарлықтай қарапайымдылығына ие.

Кез-келген сандық құрылғының математикалық моделін жобалау кезінде белгілі бір қолданбалы есептер үшін есептеу құрылғыларының жеткілікті күрделі модельдерін синтездеуге мүмкіндік беретін автоматтар теориясы мен графиктер теориясының әдістері кеңінен қолданылады.

Математикалық модельді дамытудың бастапқы кезеңінде алгоритмнің мазмұнды графигі жасалады, онда шартты және операторлық шыңдар ішінде логикалық шарттар мен микрокомандалар мазмұндық терминдермен жазылады. Шығу

функциялары мен өтпелі функциялардың теңдеулерінің құрылымдық схемасы мен жүйелеріне сүйене отырып, оқшаулау күйін және бір фазалы жерге тұйықталу тогын бақылау құрылысының FSM логикалық схемасы құрылады, бағдарламалық код берілген.

Кілтті сөздер: электр желісі, оқшаулау, бақылау, finite-state machine, бағдарламалық жасақтама.

A. K. Zhumadirova

²Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 26.08.24

Received in revised form 06.09.24

Accepted for publication 10.09.24

MATHEMATICAL MODEL OF THE INSULATION CONDITION AND SINGLE-PHASE SHORT CIRCUIT TO GROUND CURRENT MONITORING DEVICE

In this article, a mathematical model and software for the device for automatic monitoring of the state of insulation and single-phase earth fault current in networks with a voltage of 6-10 kV have been developed.

The basis for the development of the device is the existing methods for determining insulation parameters and ground fault current in three-phase electric networks with an isolated neutral voltage above 1000 V, which have significant simplicity in measuring and calculating insulation parameters and ground fault current compared with other indirect methods.

When designing a mathematical model of any digital device, methods of automata theory and graph theory are widely used, which allow synthesizing fairly complex models of computing devices for certain applied tasks.

At the initial stage of the mathematical model development, a meaningful graph diagram of the algorithm was compiled, in which logical conditions and micro commands are written inside conditional

and operator vertices in meaningful terms. Based on the block diagram and systems of equations of output functions and transition functions, a logical circuit of the FSM device for monitoring the state of insulation and current of a single-phase earth fault is constructed, and the program code is given.

Теруге 10.09.2024 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4277

Сдано в набор 10.09.2024 г. Подписано в печать 30.09.2024 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4277

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайгыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайгыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz