УДК 621.3.078.4

СИСТЕМА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА КТМ. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Д.Б. Зарва¹, А.А. Дериглазов², Э.Г. Батырбеков^{1, 3}, И.Л. Тажибаева^{1, 3}, В.М. Павлов², А.М. Ли², А.А. Мезенцев², С.В. Меркулов², Ю.Н. Голобоков²

¹Республиканское государственное предприятие «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Республика Казахстан

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия ³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Принимая во внимание сложность электротехнических процессов, протекающих в системах электропитания и обмотках электромагнитной системы токамаков, финансовую стоимость и установленную электрическую мощность используемого оборудования, возможные последствия аварийных ситуаций, связанных с системами электропитания установок такого типа, становится очевидной необходимость создания специализированных систем противоаварийной защиты, разработки и безопасной верификации соответствующих противоаварийных алгоритмов. Данная работа посвящена созданию системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса казахстанского материаловедческого токамака КТМ, разработке, формализации и верификации применяемых при этом противоаварийных алгоритмов. В результате проделанной работы проанализированы все возможные и детектируемые типы аварийных ситуаций, связанных с системой электропитания и обмотками электромагнитной системы токамака КТМ, разработаны, верифицированы и внедрены противоаварийные алгоритмы и алгоритмы приведения электротехнического оборудования КТМ в безопасное состояние. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод об эффективности работы системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ, а также о применимости использованных методов формализации и верификации алгоритмов, задающих логику работы противоаварийнот системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ, а также о применимости использованных методов формализации и верификации алгоритмов, задающих логику работы противоаварийных систем, при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности.

Ключевые слова: токамак КТМ, электротехнический комплекс, импульсное электропитание, электромагнитная система, система противоаварийной защиты и автоматики, формализация и алгоритмизация, реактивная дискретно-событийная система, конечный автомат, сети Петри.

EMERGENCY PROTECTION SYSTEM OF ELECTROTECHNICAL TOKAMAK KTM COMPLEX. ALGORITHMIC AND INFORMATION SUPPORT

D.B. Zarva¹, A.A. Deriglazov², E.G. Batyrbekov^{1, 3}, I.L. Tazhibayeva^{1, 3}, V.M. Pavlov², A.M. Lee², A.A. Mezentsev², S.V. Merkulov², Yu.N. Golobokov²

¹Republican State Enterprise «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kurchatov, Republic of Kazakhstan ²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia ³NRNU MEPhI, Moscow, Russia

Taking into account the complexity of electrotechnical processes occurring in power supply systems and coils of tokamaks electromagnetic system, the financial cost and installed electrical power of the equipment used, the possible consequences of emergency situations associated with power supply systems of such type facility - the need to create specialized emergency protection systems becomes obvious as well as create secure verification of the appropriate accident-prevention algorithms. This effort focuses on the creation of emergency protection system of electrotechnical complex of Kazakhstan's Tokamak KTM, the development, formalization, verification of the applied in such case accident-prevention algorithms. As a result of the work done all the possible and detected types of emergency situations related to power supply system and electromagnetic system coils of Tokamak KTM were analyzed, accident-prevention algorithms and algorithms of KTM electrical equipment bringing to a safe state were developed, verified and implemented. The obtained experimental data allow to make a conclusion of the efficiency in emergency protection system of the electrotechnical complex of Tokamak KTM, as well as the applicability of methods used to formalize and verify the algorithms setting the logic of the emergency discreteevent systems when solving similar problems in other fields of science and industry sectors.

Key words: tokamak KTM, electrotechnical complex, pulsed power supply, electromagnetic system, emergency protection and automation system, formalization and algorithmization, reactive discrete-event system, finite state machine, Petri net.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-74-88

введение

Установка КТМ относится к «среднемасштабным» исследовательским электрофизическим установкам с магнитным удержанием плазмы. Основное предназначение КТМ — проведение исследований материалов, из которых планируется изготовление ответственных узлов и комплектующих, обращённых к плазме, в условиях работы термоядерных реакторов будущего [1, 2]. Одной из основных технологических систем КТМ является система импульсного электропитания, предназначенная для непосредственного формирования сценариев изменения тока в обмотках электромагнитной системы токамака КТМ, а также система внешнего электроснабжения, которая служит для приёма и транспортировки мощности из питающей электросети к системе импульсного электропитания. Совместно две указанные системы представляют собой сложный электротехнический комплекс с довольно большой установленной мощностью электрооборудования (120 МВт) [3].

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА КТМ И ЕЁ АНАЛИЗ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В целях защиты оборудования электротехнического комплекса и самой установки КТМ от различных аварийных ситуаций разработана система противоаварийной защиты, представляющая собой сложную, распределённую систему, объединяющую все необходимые для ликвидации аварий исполнительные механизмы (коммутационные аппараты и иное активное электротехническое оборудование), датчики и первичные преобразователи, контролирующие параметры и режимы работы оборудования, а также различные контроллеры и микропроцессорные устройства защиты, непосредственно реализующие логику работы системы. На рис. 1 представлена структурная схема системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ.





Система ограничена «сверху», со стороны питающей сети 220 кВ элегазовым выключателем (на рис. 1 обозначен как В-220-Т-1) и его устройством управления Сириус-УВ, «снизу» — обмотками электромагнитной системы токамака КТМ.

Как видно на рис. 1, оборудование ОРУ 220 кВ, как и головной трансформатор подстанции Т-1, контролируется устройствами релейной микропроцессорной защиты Сириус-Т, Сириус-УВ и блоком синхронизации преобразовательного оборудования КТМ с питающей сетью БСПС. Вводные выключатели секций шин 10 кВ — ВВ1-10-Т1 и ВВ2-10-Т-1 контролируются блоками микропроцессорных защит Сириус-2-В. Каждый источник импульсного электропитания обмоток КТМ присоединён к шинам 10 кВ через свой отдельный выключатель (на рис. 1 ВЗ—В7, В12—В15), которые, в свою очередь, контролируются соответствующими блоками микропроцессорных защит Сириус-2-Л. Параметры и условия работы согласующих трансформаторов (на рис. 1 Т1—Т9) источников импульсного электропитания и их нагрузки контролируются специализированными устройствами микропроцессорной защиты ШЗТ.

Преобразовательное оборудование системы импульсного электропитания [3] контролируется системой цифрового управления источниками импульсного электропитания (на рис. 1 контроллеры СЦУ СS, TF, PF1—PF6 и HFC). На выходе каждого источника питания предусмотрен управляемый кроубар, необходимый для шунтирования обмотки электромагнитной системы КТМ в случае превышения на вводах обмотки уровня напряжения и аварийного вывода запасённой энергии в случае потери управляемости основным преобразовательным оборудованием.

Для достижения требуемой логики работы системы в целом, а также необходимого уровня быстродействия все устройства микропроцессорной защиты, контроллеры СЦУ и контроллер системы противоаварийной защиты комплекса КТМ связаны между собой технологическими сетями различного уровня. Вся необходимая информация поступает на оперативный пульт управления дежурного подстанции КТМ — ОПУ ПС КТМ, а также на пульт оператора системы импульсного электропитания установки КТМ — пульт СИЭП. Контроллер системы противоаварийной защиты реализует функцию централизации учёта и синхронизации выдачи управляющих команд для всех противоаварийных воздействий системы.

Учитывая специфику процессов, протекающих в установках типа токамак, аварийные ситуации должны ликвидироваться по принципу минимизации возможного ущерба как от последствия самой аварии, так и от последствия ликвидации и локализации этой аварии для основного технологического оборудования установки КТМ (срыв плазмы, перенапряжения на обмотках электромагнитной системы при неконтролируемом отключении источников питания от сети и нагрузки). При этом комплекс противоаварийных мер должен быть направлен на скорейшее и эффективное устранение аварии, приведение оборудования в безопасное состояние и по возможности на сохранение при этом ресурса используемого электротехнического и коммутационного оборудования (т.е. должен быть применён принцип разумности, достаточности и селективности используемых защит). В целом для эффективной реализации противоаварийных алгоритмов большое значение имеет момент возникновения аварии (до или после начала плазменного разряда), а также локализация и степень тяжести аварии (скорость развития аварийных процессов, стойкость к воздействию токов короткого замыкания в конкретной точке системы, диэлектрическая прочность изоляции и т.п.).

В этой связи были проанализированы все возможные и детектируемые для комплекса КТМ типы аварий и с учётом всех описанных критериев, принципов и факторов, возможностей аппаратного обеспечения системы противоаварийной защиты, возможностей коммутационного и иного электротехнического оборудования разработаны оптимальные алгоритмы ликвидации аномальных режимов работы оборудования, аварийных ситуаций и их последствий.

Таким образом, при аварии выключателя B-220-T-1, отключении внешнего электропитания 220 кВ со стороны питающей электросети, превышении уставок по току для оборудования OPУ 220 кВ, исчезновении импульсов синхронизации с БСПС, отключении питания шкафа дистанционного управления головного трансформатора T-1 220/10 кВ, понижении уровня масла T-1, срабатывании газовой защиты T-1, срабатывании тепловой защиты T-1, срабатывании дифференциальной защиты T-1, превышении уставок по току для T-1 происходит отключение выключателя B-220-T-1. В случае, если авария произошла после начала старта разряда, энергия, запасённая в обмотках электромагнитной системы КТМ, не может быть выведена в сеть штатно переводом преобразователей системы импульсного электропитания в режим инвертирования. Вывод энергии происходит посредством шунтирования обмоток электромагнитной системы защитными кроубарами. Вместе с этим происходит останов всех контроллеров системы цифрового управления источниками питания со снятием управляющих импульсов с силового электрооборудования.

В случае возникновения аварийной ситуации на вводных выключателях BB1-10-T-1, BB2-10-T-1, превышения уставок по току для СШ-10-1, СШ-10-2 происходит отключение конкретного вводного выключателя. Если аварийное отключение произошло после начала старта разряда, вывод запасённой энергии из обмоток, питающихся от источников питания аварийной секции шин, происходит посредством шунтирования данных обмоток защитными кроубарами. Контроллеры системы цифрового управления источников питания аварийной секции шин переходят в режим останова со снятием управляющих импульсов с силового электрооборудования. В это же время для источников импульсного электропитания, подключённых к работоспособной секции шин, формируется сигнал на инвертирование запасённой в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть (для источника питания обмотки HFC включение чоппера звена постоянного тока инвертора).

При авариях на линейных выключателях B3—B7, B12—B15, превышении уставок по току отходящих к согласующим трансформаторам линий 10 кВ Л3—Л7, Л12—Л15, отключении питания шкафов дистанционного управления согласующих трансформаторов T1—T9, понижении уровня масла для T1— T9, срабатывании газовой защиты трансформаторов T1—T9, срабатывании тепловой защиты трансформаторов T1—T9, срабатывании дифференциальной защиты трансформаторов T1—T9, превышении уставок по току для трансформаторов T1—T9, аварии РПН трансформаторов T1—T9 происходит отключение конкретного линейного выключателя 10 кВ. В случае, если аварийное отключение выключателя произошло после начала старта разряда, вывод запасённой энергии из обмотки, питающейся от источника питания, подключённого к аварийному (отключаемому) выключателю, происходит посредством шунтирования данной обмотки защитным кроубаром. Контроллер системы цифрового управления источника питания с аварийным выключателем переходит в режим останова со снятием управляющих импульсов с силового электрооборудования. По аналогии с описанной аварией для вводных выключателей в это же время для работоспособных источников питания формируется сигнал на инвертирование запасённой в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть.

В случае аварий, связанных с аномальными режимами работы преобразовательного оборудования системы импульсного электропитания, обмоток электромагнитной системы установки КТМ, а именно:

— падением ниже уровня уставки расхода охлаждающей воды через обмотки ЭМС КТМ;

превышением температуры охлаждающей воды на выходе обмоток ЭМС;

 превышением уровня уставки по времени работы источников питания электромагнитной системы КТМ (регламент задаётся перед пуском в соответствии со сценарием разряда);

 превышением уставок оборудования системы импульсного электропитания по току и напряжению;

 выявлением значительного дисбаланса токов и напряжений в параллельно и последовательно соединённых преобразователях системы и их плечах;

— превышением уровня уставки величины уравнительных токов в источниках электропитания (построены по 12-импульсной схеме выпрямления с включением уравнительных реакторов), не компенсируемых системой цифрового управления источниками питания;

— выявлением нагрева (динамический расчёт Джоулева интеграла) выше уровня уставки полупроводниковых приборов,

для всех источников импульсного электропитания формируется команда на инвертирование запасённой в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть. После этого все источники питания переходят в режим останова со снятием управляющих импульсов.

При возникновении аварийной ситуации в системе цифрового управления конкретного источника питания после начала разряда вывод запасённой энергии из обмотки, питающейся от аварийного источника питания, происходит посредством шунтирования данной обмотки защитным кроубаром. В случае превышения уровня напряжения на выходе конкретного источника питания электромагнитной системы КТМ (на клеммах обмотки) выше уровня уставки защитный кроубар срабатывает автономно. Система противоаварийной защиты отключает линейный выключатель 10 кВ, питающий согласующий трансформатор данного источника питания, и переводит систему цифрового управления этого источника питания в режим останова. Параллельно с этим на всех работоспособных источниках питания формируется команда на инвертирование запасённой в обмотках электромагнитной системы КТМ энергии в сеть. По завершении алгоритма все исправные источники питания переходят в режим останова со снятием управляющих импульсов.

Поскольку обмотки электромагнитной системы КТМ не являются сверхпроводящими, защита от потери состояния сверхпроводимости и необходимость экстренного вывода энергии в данном случае не требуются.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ СИСТЕМЫ

При анализе вербального описания алгоритмов противоаварийного управления системы электропитания токамака КТМ данная система отнесена к распределённой реактивной дискретно-событийной системе. Это обосновано топологией построения системы, логикой её работы и характером непрерывного взаимодействия между отдельными компонентами.

В целях безопасной верификации и внедрения алгоритма управления системы противоаварийной защиты токамака КТМ его необходимо формализовать и представить в виде соответствующей модели для дальнейшего её исследования. Задача формализации дискретно-событийной системы решена с использованием аппарата дискретной математики, поскольку любая дискретно-событийная система может быть описана абстрактным автоматом [4—8].

Абстрактным автоматом считается модель, описываемая кортежем $A = (X, Y, S, f_y, f_s, S_0)$, где X — множество входных сигналов, Y — множество выходных сигналов, S — множество состояний, f_y — функция выходов, f_s — функция переходов, S_0 — начальное состояние автомата [9].

Учитывая необходимость в минимизации времени реакции системы противоаварийной защиты комплекса КТМ (существующий также автомат I рода или автомат Мили «запаздывает» на один дискретный момент времени по входному сигналу по отношению к автомату Мура) и необходимость повышения устойчивости данной системы, алгоритм работы системы формализован посредством синтеза автомата Мура (автомата II рода), который описывается следующей парой уравнений: $s(t + 1) = f_s(x(t + 1) s(t)); y(t) = f_y(s(t)).$

Представление характеристических функций автомата реализовано графическим способом — построением взвешенного орграфа переходов автомата [9]. В синтезированном автомате Мура определены 51 возможное состояние ($S_i \in S$), 133 интегрированных входных переменных ($X_i \in X$) и 51 интегрированная выходная переменная ($Y_i \in Y$). Характеристические функции f_y и f_s синтезированного автомата Мура представлены графически и вместе с этим выражены через соответствие интегрированных переменных автомата значениям переменных, характеризующих входные и выходные сигналы системы противоаварийной защиты токамака КТМ.

На рис. 2 представлен фрагмент (ввиду большого размера в полном виде) орграфа синтезированного автомата Мура, задающего логику работы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ.



Рис. 2. Фрагмент орграфа синтезированного автомата Мура

Орграф отображает полное пространство состояний синтезированного автомата Мура для всех возможных детектируемых типов аварий электротехнического комплекса токамака КТМ с обозначением соответствующих интегрированных входных X и выходных Y переменных. Интегрированные переменные X и Y представляют собой вектор аварийного сообщения и вектор противоаварийных действий соответственно. Множество переменных, входящих в состав данных векторов, привязано к конкретным входным и выходным сигналам системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ. В табл. 1 дано пояснение по составу и смысловому содержанию переменных указанных векторов.

Переменный	O π μ σ π σ π σ π σ π σ \mathbf{V}	Переменный	O π μ σ π σ π σ π σ π σ ν σ ν τ σ τ τ τ σ τ τ τ σ τ τ τ σ τ τ σ τ τ τ σ τ τ τ τ σ τ τ τ τ τ τ τ τ σ τ	
вектор Х	Описание переменной вектора х	вектор Ү	Описание переменной вектора х	
X_1	Авария ПС 220 кВ (0—нет, 1—да)	Y_1	Отключить выключатель В-220-Т-1 ПС КТМ	
			220/10 кВ (0 — нет, 1 — да)	
X_2	Авария вводного выключателя СШ-10-1 (0 — нет,	Y_2	Отключить вводной выключатель ВВ1-10-Т-1	
	1 — да)		СШ-10-1 РУ-10 кВ (0 — нет, 1 — да)	
X_3	Авария вводного выключателя СШ-10-2 (0 — нет,	<i>Y</i> ₃	Отключить вводной выключатель ВВ2-10-Т-1	
	1 — да)		СШ-10-2 РУ-10 кВ (0 — нет, 1 — да)	
$X_4 - X_{12}$	Авария оборудования электропитания перемен-	$Y_4 - Y_{12}$	Отключить <i>i</i> -й линейный выключатель (В3—В7,	
	ным током 10/0,7/0,4 кВ/авария ШЗТ для <i>i</i> -го ис-		B12—B15) отходящей линии 10 кВ (Л3—Л7,	
	точника СИЭП (0 — нет, 1 — да)		J112—J115) (0 — нет, 1 — да)	
$X_{13} - X_{21}$	Аварийная ситуация для <i>і</i> -й обмотки ЭМС тока-	$Y_{13} - Y_{21}$	Команда на инвертирование тока нагрузки в сеть	
	мака КТМ/авария преобразовательного оборудо-		для <i>i</i> -го источника питания СИЭП (для ИП № 9	
	вания <i>i</i> -го источника СИЭП (0 — нет, 1 — да)		оомотки НГС — только включение чоппера в	
V V		V V	звене постоянного тока) (0 — нет, 1 — да)	
X22—X30	Авария системы цифрового управления (СЦУ)	Y 22— Y 30	Команда на останов (снятие управляющих им-	
	<i>t</i> -го источника Сизії (0 — нет, 1 — да)		пульсов) для <i>t</i> -то источника питания Си $(0 - 1)$	
Var Vas	Напряжание на і й обмотке ЭМС КТМ више	Var Var	Her, $I - da$	
A31—A39	Папряжение на i -и обмотке Эме к ти выше уровия устарки/краубар i го истонцика питания	131-139	$CW \supseteq \Pi (0)$ Her 1 T2)	
	уровня уставки кроуоар г-то источника питания СИЭП сработац (0 — цет 1 — ца)		CHOIL(0 - HCI, 1 - Zd)	
$X_{40} - X_{48}$	Флаги наличия тока в i -й обмотке ЭМС	Y_{40}	Выдача аварийного сигнала оператору СИЭШ и	
	КІМ/начала работы <i>i</i> -го ИІІ СИЭІІ (0 — нет, 1 —		диспетчеру ПС 220/10 КТМ (оператору БЭУ)	
77	да)	17	(0 — нет, 1 — да)	
X 49	Квитирование аварииного сигнала операторами	Y 41	Останов СПЗ, останов (снятие управляющих им-	
	сизни диспетчером пС к тм 220/10 кВ (опера-		пульсов) для всех источников питания СИЭП	
	тором БЭУ)		(0 — нет, 1 — да)	
X_{50}	Выключатель В-220-Т-1 включён (0 — нет, 1 — да)			
X_{51}	Выключатель ВВ1-10-Т-1 включён (0 — нет, 1 — да)			
X_{52}	Выключатель BB2-10-T-1 включён (0 — нет, 1 — да)			
X53—X61	<i>і</i> -й линейный выключатель отходящей линии 10 кВ			
	включён (Л3—Л7, Л12—Л15) (0 — нет, 1 — да)			

Таблица 1. Описание переменных векторов аварий и противоаварийных действий системы противоаварийной защиты (интегрированных переменных X и Y)

Начальному состоянию автомата соответствует устойчивое состояние S_0 , в котором данный автомат находится в случае отсутствия каких-либо аварийных ситуаций. При любом изменении значения входной интегрированной переменной X, характеризующей тип и локализацию аварии, автомат переходит в следующее состояние, однозначно определяющее значение компонентов выходного вектора управляющих противоаварийных воздействий — интегрированной переменной Y. Автомат под действием входного сигнала последовательно проходит цепочку необходимых состояний, в различных аварийных ситуациях совершает требуемое количество циклов через состояния S_0 и S_4 , затем по факту полного завершения противоаварийного алгоритма (в том числе алгоритма приведения оборудования системы электропитания в безопасное состояние) и квитирования соответствующих аварийных сообщений переходит в терминальное состояние S_5 . Все необходимые действия выполняются в порядке очерёдного следования автоматически, без вмешательства операторов комплекса КТМ, что позволяет реализовать алгоритм противоаварийной защиты максимально эффективно, быстро и исключить из процесса фактор возможной человеческой ошибки.

Синтезированный автомат Мура является:

— частично детерминированным, т.е. его характеристические функции определены для конкретных пар значений из множеств X и S, реализующих те или иные противоаварийные воздействия в зависимости от типа и локализации аварии (значения входного сигнала X) и текущего состояния автомата, поскольку соблюдается условие перехода только в одно конкретное состояние при воздействии определённого входного сигнала X и текущего состояния S;

— частично устойчивым, поскольку переход в последующее состояние автомата возможен только под воздействием последующего входного сигнала из множества *X*, отличающегося от значения предыдущего входного сигнала (за исключением безусловных переходов, требуемых для логического завершения цепочки противоаварийных действий).

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ, ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ В ДИНАМИКЕ, АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Поскольку основными задачами реактивной дискретно-событийной противоаварийной системы электротехнического комплекса КТМ являются минимизация времени реализации противоаварийных действий и приведение задействованного оборудования в безопасное состояние, становится очевидной необходимость распараллеливания происходящих в системе противоаварийной защиты процессов. В этой связи на основе логики синтезированного автомата Мура реализована модель, адекватно описывающая параллельно происходящие в системе противоаварийной защиты процессы, а также позволяющая оценить время реализации противоаварийных действий для всех детектируемых типов аварий.

Основной подход при изучении поведения реактивных дискретно-событийных систем в динамике заключается в разработке и верификации их модели с использованием математического аппарата сетей Петри [10—12]. В настоящее время одним из расширений теории сетей Петри, позволяющим качественно моделировать процессы, происходящие в реальных реактивных дискретно-событийных системах, и учитывать темпоральные зависимости различного рода, является расширение в виде формализма раскрашенных временных сетей Петри.

Согласно [13, 14] временная раскрашенная сеть Петри — это кортеж $TCPN = (\Sigma, P, T, F, C, W, G, M_0, Time)$, где Σ — непустое конечное множество цветов (атрибуты фишек); P — непустое конечное множество позиций сети; T — непустое конечное множество переходов сети; F — отношение инцидентности (конечное множество дуг); $C:P \to \Sigma$ — функция, ставящая в соответствие каждой позиции $p \in P$ свой цвет (атрибут); W — функция, ставящая в соответствие тип выражения дуг, описанных с помощью некоторого языка типизированных выражений L с типом позиции, с которой связана эта дуга; G — защитная функция, сопоставляющая каждому переходу $t \in T$ выражение булевского типа (true, false); M_0 — функция, задающая начальную маркировку сети; Time — функция временных интервалов.

Большое внимание развитию теории временных раскрашенных сетей Петри уделено коллективом исследователей под руководством профессора Курта Йенсена (Kurt Jensen) [15—17]. При его непосредственном участии разработана мощная программная среда CPN Tools, позволяющая моделировать и изучать иерархические временные раскрашенные сети Петри.

С целью верификации логики работы системы, изучения её динамических свойств, проведения статистического анализа времени реализации противоаварийных действий для всех детектируемых типов аварий и принятия решения о достаточности запаса системы по быстродействию модель реактивной дискретно-событийной системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ была построена и изучена с помощью программного комплекса CPN Tools. Временные задержки учитывались для всего используемого в распределённой системе оборудования, включая коммутационные аппараты, цифровые устройства защиты, технологические контроллеры и т.п., т.е. на всём пути прохождения сигналов системы. Пример применения аппарата временных раскрашенных сетей Петри с использованием программной среды CPN Tools при моделировании подобных систем и с подобными исходными данными авторам неизвестен.

С целью оптимизации модели, уменьшения пространства состояний и разгрузки её графического представления моделирование реализовано для двух (источники питания обмоток TF и CS) из девяти источников питания электромагнитной системы токамака КТМ, питающихся от двух независимых секций шин 10 кВ. Это позволило верифицировать логику работы системы для всех возможных детектируемых типов аварий, а также провести статистический анализ времени реализации противоаварийных действий без потери качественных и количественных данных. Полное пространство состояний системы, отображённое ранее в виде синтезированного автомата Мура, может быть получено в модели CPN Tools простым масштабированием соответствующих вершин орграфа модели, векторов аварий и векторов противоаварийных действий для оставшихся семи источников импульсного электропитания. Типы смоделированных в CPN Tools аварий и присвоенные им для удобства дальнейшего обозначения номера:

- № 1. Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 2. Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 3. Авария ПС 220 кВ (В-220-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке ТF);
- № 4. Авария РУ 10 кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 5. Авария РУ 10 кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 6. Авария РУ 10 кВ СШ-10-1 (ВВ1-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке ТF);
- № 7. Авария РУ 10 кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 8. Авария РУ 10 кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 9. Авария РУ 10 кВ СШ-10-2 (ВВ2-10-Т-1) после начала разряда (ток присутствует в обмотке ТF);
- № 10. Авария системы питания переменным током ИП СS (В12) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 11. Авария системы питания переменным током ИП СS (B12) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 12. Авария системы питания переменным током ИП СS (B12) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- № 13. Авария системы питания переменным током ИП ТF (В3) до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 14. Авария системы питания переменным током ИП ТF (В3) после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 15. Авария системы питания переменным током ИП ТF (В3) после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- №16. Авария на обмотке CS/преобразовательном оборудовании ИП CS до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 17. Авария на обмотке CS/преобразовательном оборудовании ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 18. Авария на обмотке CS/преобразовательном оборудовании ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- № 19. Авария на обмотке TF/преобразовательном оборудовании ИП TF до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 20. Авария на обмотке TF/преобразовательном оборудовании ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 21. Авария на обмотке TF/преобразовательном оборудовании ИП TF после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- № 22. Авария СЦУ ИП CS до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 23. Авария СЦУ ИП СЅ после начала разряда (ток присутствует в обмотке СЅ);
- № 24. Авария СЦУ ИП CS после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- № 25. Авария СЦУ ИП ТF до начала разряда (ток в обмотках отсутствует);
- № 26. Авария СЦУ ИП ТГ после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);
- № 27. Авария СЦУ ИП ТГ после начала разряда (ток присутствует в обмотке ТГ);
- № 28. Напряжение на обмотке CS превысило уставку после начала разряда (ток отсутствует в обмотке TF);
- № 29. Напряжение на обмотке CS превысило уставку после начала разряда (ток присутствует в обмотке TF);
- № 30. Напряжение на обмотке TF превысило уставку после начала разряда (ток отсутствует в обмотке CS);
- № 31. Напряжение на обмотке TF превысило уставку после начала разряда (ток присутствует в обмотке CS);

Внешние аварии (в начальную разметку сети не загружаются):

- № 32. Внешняя авария для ИП ТF;
- № 33. Внешняя авария для ИП CS.

На рис. 3 представлен орграф синтезированной модели системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ в среде CPN Tools.



Рис. 3. Орграф синтезированной модели системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ в среде CPN Tools

Начальная разметка сети реализуется размещением во «входном» буфере BUFF IN (FAIL) фишки красного цвета типа TFAIL, содержащей в себе вектор, характеризующий тип и локализацию конкретной аварии (сигналы с датчиков и первичных преобразователей, от цифровых защитных устройств и технологических контроллеров и т.п.). После размещения фишки в буфер BUFF IN (FAIL) она продвигается по сети по дугам красного цвета посредством срабатывания конкретных разрешённых переходов в зависимости от значения переменных вектора аварии (мультимножества TFAIL). Во время срабатывания переходов генерируются фишки типа TACTION, содержащие в себе вектор конкретного противоаварийного действия. Значение переменных фишек типа TACTION отвечает за тип и локализацию противоаварийного действия (сигналы на конкретные исполнительные механизмы и активное оборудование электротехнического комплекса). Фишки типа TACTION перемещаются по дугам синего цвета в «выходной» буфер системы противоаварийной защиты BUFF OUT (ACTION).

Терминальным буфером (позицией) сети для красных фишек является буфер END, для синих — BUFF OUT (ACTION). Из данных буферов посредством срабатывания переходов SEND MSGF(A) фишки типа TFAIL и TACTION преобразуются в фишки типа STRING, содержащие сообщение о типе и месте локализации аварии, типе и месте локализации противоаварийного действия. Далее посредством срабатывания переходов SEND MSGF(A) TIME к фишкам типа STRING, преобразованным из фишек типа TFAIL и TACTION, добавляется временная метка для обеспечения возможности идентификации времени задержки прохождения аварийного сигнала и времени задержки прохождения сигналов противоаварийных действий.

Для наиболее качественного статистического анализа при моделировании принято, что одна единица модельного времени (MTU) соответствует 1 мкс реального времени поведения системы. Временные за-

держки на дугах и переходах сети реализованы с учётом паспортных данных о времени срабатывания и отклика исполнительных механизмов (коммутационных аппаратов), активного электротехнического оборудования, устройств микропроцессорной защиты, технологических контроллеров и прочего задействованного оборудования, при этом задержки моделируются с использованием математического аппарата теории вероятностей. В частности, при генерации случайных величин используется нормальное распределение вероят-

ностей, которое задаётся следующей функцией плотности вероятности: $f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp(-(x-\mu)^2/2\delta^2)$,

где μ — математическое ожидание; δ — среднеквадратическое отклонение или при возведении в квадрат δ^2 — дисперсия распределения, а также равномерное распределение вероятностей с функцией плотности

вероятности на отрезке [a, b] при $a, b \in R$: $f(x) = \frac{1}{b-a}$, если $x \in [a, b]$, и f(x) = 0, если $x \notin [a, b]$.

На рис. 4 представлен орграф синтезированной модели системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ в среде CPN Tools по завершении полного цикла имитационного моделирования.

W CPN Tools (Version	4.0.0			
CPN Tools (Version 4 Tool box Auxiliary Create Declare Hierarchy Monitoring Net Simulation State space Style View Development Help Options YKTM.cpn	4.0.0 MSG FAIL STRIN(1'"220 kV SUBSTATION FAIL - 121224 n 1'"812 OFS" else if # y5 mcs"++ SFAIL * else ff # x23 f = yes SEND MSF TIME delTime.toString(time()) MSG FAIL TIME MSG FAIL TIME STRIN(1'"812 FAIL - 85146 mcs"++ 1'"812 FAIL - 85212 mcs"++ 1'"812 FAIL - 85213 mcs"++ 1'"682 FAIL - 85213 mcs"++ 1'"682 FAIL - 8508 mcs"++ 1'"CS EXT FAIL - 3134 mcs'++ 1'CS EXT FAIL - 3134 mcs'++ 1'CS EXT FAIL - 4535 mcs'++	MSG ACTION string = yes then 1 * CS INV ON* else if #y1 = yes then 1 * CS OVERVOLT* else if # SEND MSGA TIME str^* - * ^ ModelTime.t MSG ACTION TIME 130 STRING	1"ALL CROWB ON - 85092 mcs"++ 1"ALL CROWB ON - 85109 mcs"++ 1"ALL SDC OFF - 121224 mcs"++ 1"ALL SDC OFF - 121224 mcs"++ 1"ALL SDC OFF - 121204 mcs"++ 1"B12 OFF - 49910 mcs"++ 1"B12 OFF - 49926 mcs"++ 1"B12 OFF - 49950 mcs"++ 1"B12 OFF - 49964 mcs"++ 1"B12 OFF - 50019 mcs"++ 1"B12 OFF - 50019 mcs"++ 1"B12 OFF - 50019 mcs"++ 1"B12 OFF - 49869 mcs"++ 1"B12 OFF - 49867 mcs"++ 1"B12 OFF - 49817 mcs"++ 1"B13 OFF - 49917 mcs"++	ly2 se
Step: 523 Time: 121419	1 "CS EXT FAIL - 30395 mcs"++ 1""CS EXT FAIL - 51345 mcs"++		1"83 OFF - 50021 mcs"++ 1"83 OFF - 50043 mcs"++	
(1		6		

Рис. 4. Орграф модели системы противоаварийной защиты электроэнергетического комплекса КТМ в среде CPN Tools: показания счётчиков программного шага и модельного времени (Step и Time) (*a*), содержимое буферов MSG FAIL и ACTION TIME по завершении полного цикла имитационного моделирования (б)

Как видно на рис. 4, полный цикл противоаварийных действий для всех возможных типов аварий реализован за 523 программных шага и 121 419 единиц модельного времени. В процессе моделирования все 59 фишек красного цвета типа TFAIL (31 загружена изначально и 28 сгенерированы в процессе моделирования как внешние по отношению к конкретному источнику питания аварии) конвертированы в фишки типа STRING и размещены в терминальном буфере аварийных сообщений с меткой времени MSG FAIL TIME. Всего сгенерировано 130 фишек синего цвета типа TACTION (векторы противоаварийных действий), которые конвертированы в фишки типа STRING и размещены в терминальном буфере общений о противоаварийных действиях с меткой времени MSG ACTION TIME.

Имитационное моделирование позволило верифицировать логику работы и охарактеризовать синтезированную модель на основе временной раскрашенной сети Петри как:

— ограниченную, поскольку для конкретного числа фишек, размещённых в начальной разметке, получено конкретное число фишек в терминальных буферах сообщений MSG FAIL TIME и MSG ACTION TIME (в модели не происходит неконтролируемой циклической генерации фишек и число достижимых маркировок конечно);

— живую, поскольку при анализе всех возможных вариантов начальной разметки сети наблюдалось срабатывание полного количества используемых в модели переходов, достижимую, так как для всех вариантов начальной разметки сети существуют последовательности срабатывания переходов, приводящие к завершению логической цепочки противоаварийных действий (тупиковые ветки отсутствуют);

— необратимую, поскольку по завершении реализации всех противоаварийных алгоритмов автоматический возврат в исходное состояние сети невозможен (согласно логике работы моделируемой системы противоаварийной защиты входной буфер аварий BUFF IN (FAIL) по завершении реализации противоаварийных действий и приведения оборудования в безопасное состояние должен быть пуст).

Логика выдачи сигналов противоаварийных действий в модели CPN Tools (в том числе селективность применённых защит) соблюдается для всех типов смоделированных аварий и реализуется в соответствии с синтезированным ранее автоматом Мура.

Для анализа статистических свойств модели, касающихся времени реализации конкретных противоаварийных алгоритмов, в начальную разметку сети загружались по девять векторов аварий с одинаковым значением внутренних переменных (фишек типа TFAIL) для полного количества векторов (типов аварий), представленных в табл. 2. После загрузки начальной разметки проводилось по девять опытов имитационного моделирования до полной реализации всех противоаварийных действий и накопления требуемого количества статистических данных. Количество проводимых опытов для каждого типа аварий выбрано исходя из общего количества источников импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ (9 шт.). Всего для накопления статистических данных реализовано 297 опытов имитационного моделирования.

Среднее значение времени реализации противоаварийного алгоритма рассчитывалось по формуле $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$, где *n* — количество опытов, равное девяти, x_i — соответствующее время реализации проти-

воаварийного алгоритма для каждого конкретного опыта.

Анализ статистических данных модели показал, что максимальное усреднённое для девяти опытов время реализации противоаварийного алгоритма, равное 141,1 мс, наблюдается при аварии № 27, связанной с выходом из строя контроллера СЦУ источника импульсного электропитания обмотки ТF после старта разряда. Минимальное усреднённое для девяти опытов время реализации противоаварийного алгоритма, равное 2,1 мс, наблюдается при аварии № 33 — внешней по отношению к источнику импульсного электропитания обмотки CS аварии.

Основным требованием, предъявляемым к быстродействию систем противоаварийной защиты (систем релейной защиты и автоматики), является обеспечение возможности локализации аварии и реализации противоаварийных действий за время меньше, чем время термической стойкости повреждённых электрических цепей и их элементов при протекании в них сквозных токов короткого замыкания [18—21]. Для линий электропередач напряжением 110—220 кВ при возникновении короткого замыкания для сохранения оборудования и устойчивости энергосистемы рекомендованы локализация и отключение повреждённого участка цепи за временной интервал 150—300 мс. В сетях 6—35 кВ допускается время отключения повреждённых участков 1,5—3 с [21]. Таким образом, в случае возникновения аварии № 27 с самым длительным усреднённым циклом реализации противоаварийного алгоритма, равным 141,1, запаса быстродействия моделируемой системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса КТМ хватает для локализации и ликвидации аварии с временем меньше, чем нижняя граница (150 мс), для самого требовательного сегмента сети системы электроснабжения комплекса КТМ с напряжением 220 кВ.

По завершении монтажа и наладки системы противоаварийной защиты электротехнического комплекса токамака КТМ были проведены замеры времени прохождения сигналов и реализации противоаварийных действий. Замеры проведены для всех возможных и идентифицируемых групп аварий для случаев с максимальными усреднённым временем реализации противоаварийных действий (циклов) согласно данным, полученным при имитационном моделировании. Так, в группах аварий выделены аварии № 2, 3, 6, 8, 11, 15, 16, 17, 18, 23, 27, 28 и 29. Сопоставление модельных и экспериментально полученных данных приведено в табл. 2.

При проведении экспериментов на первичных преобразователях (датчиках) системы противоаварийной защиты с использованием генератора сигналов имитировались недопустимые уровни измеряемых сигналов, соответствующие условиям возникновения аварии конкретного типа и требующие реализации конкретных противоаварийных действий. Далее с помощью осциллографа регистрировалось время прохождения сигналов по системе противоаварийной защиты и время реакции исполнительных механизмов и их микропроцессорных устройств управления (силовых преобразователей, коммутационных аппаратов и т.п.).

№ ава- рии	Полное время реализации цикла, полученное при моделировании, мкс (среднее для девяти опытов моделирования)	Полное время реализации цикла, полученное экспе- риментально, мкс (среднее для девя- ти источников питания)	Относи- тельная ошибка, %	Описание противоаварийных действий, входящих во время противо- аварийного цикла и протекающих параллельно
2 3	120 688 120 688	119 397 119 397	1,08 1,08	Противоаварийный цикл: отключение выключателя В-220-Т-1, включение всех кроубаров, останов всех контроллеров СЦУ
6	121 152	119 397	1,47	Противоаварийный цикл: отключение вводного выключателя ВВ1- 10-Т-1, включение кроубара источника питания ТF, останов контрол- лера СЦУ источника питания TF Параллельно: инвертирование для источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS
8	120 518	119 397	0,94	Противоаварийный цикл: отключение вводного выключателя BB2- 10-T-1, включение кроубара источника питания CS, останов контрол- лера СЦУ источника питания CS Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF
11	120 669	122 450	1,45	Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В12, включение кроубара источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF
15	120 588	122 450	1,52	Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В3, включение кроубара источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF Параллельно: инвертирование для источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS
16 17	2919 2919	3650 3650	20,02 20,02	Противоаварийный цикл: инвертирование и останов СЦУ для всех источников питания
23	2 919 140 688	3650 139 038	20,02 1,19	Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя В12, включение кроубара источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера СЦУ источника питания TF
27	141 088	139 038	1,47	Противоаварийный цикл: отключение линейного выключателя ВЗ, включение кроубара источника питания ТF, останов контроллера СЦУ источника питания TF Параллельно: инвертирование для источника питания CS, останов контроллера СЦУ источника питания CS
28	120 669	114 235	5,63	Противоаварийный цикл: включение кроубара источника питания CS, отключение линейного выключателя B12, останов контроллера СЦУ источника питания CS
29	120 669	114 235	5,63	Противоаварийный цикл: включение кроубара источника питания CS, отключение линейного выключателя B12, останов контроллера CЦУ источника питания CS Параллельно: инвертирование для источника питания TF, останов контроллера CЦУ источника питания TF

Т а блица 2. Время реализации противоаварийных алгоритмов, полученных при моделировании и экспериментально на реально действующей системе противоаварийной защиты



Рис. 5. Диаграмма сопоставительного анализа модельных и экспериментально полученных данных: — время по модели, мкс; — измеренное время, мкс

На рис. 5 показана диаграмма, отражающая соответствие модельных и экспериментально полученных данных.

Расчёт относительной ошибки, полученной при имитационном моделировании проводился по формуле $\delta T_i = |(x_i - x_i')/x_i| \cdot 100\%$, где x_i — полное время реализации противоаварийного алгоритма, полученное экспериментально, x_i' — полное время реализации противоаварийного алгоритма, полученное при имитационном моделировании. Максимальное значение $\delta T_{i \text{ макс}}$ составило 20,02% для аварий № 16, 17 и 18, что объясняется отсутствием учёта в модели транспортных задержек коммуникационных модулей и технологической сети, объединяющей контроллеры СЦУ по причине их незначительного влияния на время реализации про-

тивоаварийных алгоритмов в целом. Среднее значение δT_i при этом составило 6,2%, что говорит о довольно хорошей корреляции модельных и экспериментально полученных данных.

выводы

Разработаны, формализованы и верифицированы с помощью имитационного моделирования соответствующие алгоритмы реализации противоаварийных действий и приведения оборудования электротехнического комплекса КТМ в безопасное состояние. Имитационное моделирование осуществлено на основе логики синтезированного автомата Мура, в программной среде CPN Tools с помощью математического аппарата временных раскрашенных сетей Петри с учётом временных задержек прохождения сигналов в системе. Временные задержки моделировались с помощью математического аппарата теории вероятностей. В результате работы внедрена система противоаварийной защиты электротехнического комплекса казахстанского материаловедческого токамака КТМ. По результатам наладки внедрённой системы противоаварийной защиты получены экспериментальные данные, хорошо коррелирующие с данными статистического анализа, полученными при имитационном моделировании, что позволяет судить об адекватности и применимости используемого подхода при решении схожих задач в других областях науки и отраслях промышленности. Полученные временные задержки реализации противоаварийных действий в системе противоаварийной защиты не превышают нижний порог лимита по локализации аварий в самом требуемом сегменте сетей электротехнического комплекса КТМ — сегменте сети с напряжением 220 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Назарбаев Н.А., Школьник В.С., Батырбеков Э.Г., Березин С.А., Лукашенко С.Н., Скаков М.К. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние. Курчатов, РГП «Национальный ядерный центр РК», 2016, с. 35—60.
- 2. Азизов Э.А., Тажибаева И.Л., Велихов Е.П., Школьник В.С. и др. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. Алматы: Изд-во «Glory К», 2006, 236 с.
- Зарва Д.Б., Дериглазов А.А., Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Павлов В.М., Ли А.М., Мезенцев А.А., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 59—70.
- 4. Вельдер С.Э., Лукин М.А., Шалыто А.А., Яминов Б.Р. Верификация автоматных программ. СПб: Наука, 2011. 244 с.
- 5. Гилл А. Введение в теорию конечных автоматов (серия «Теоретические основы технической кибернетики»). М.: Наука, 1966. 272 с.
- 6. **Мелихов А.Н.** Ориентированные графы и конечные автоматы (серия «Теоретические основы технической кибернетики»). — М.: Наука, 1971. 416 с.
- 7. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Изд. дом «Вильямс» (http://www.williamspublishing.com), 2008. 528 с.

- 8. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. СПб: Питер, 2003. 208 с.
- 9. Гуренко В.В. Введение в теорию автоматов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 62 с.
- 10. Захаров Н.Г., Рогов В.Н. Синтез цифровых автоматов. Учебное пособие по дисциплинам «Теория автоматов», «Прикладная теория цифровых автоматов». — Ульяновск: УлГТУ, 2003. 136 с.
- 11. **Котов В.Е.** Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
- 12. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
- 13. Бухтияров И.В. Сети Петри как инструмент спецификации специализированной сервис-ориентированной информационной среды для производства программных продуктов. В сб.: Доклады ТУСУРа, 2014, № 4 (34), декабрь 2014, с. 100—108.
- 14. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.
- Jensen K. An introduction to the practical use of coloured Petri Nets. In: Lectures on Petri Nets II: Applications. ACPN 1996. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1492. Eds W. Reisig, G. Rozenberg. Berlin, Heidelberg: Springer, 29 July 2005, p. 237—292.
- Jensen K. An introduction to the theoretical aspects of coloured Petri Nets. In: A Decade of Concurrency Reflections and Perspectives. REX 1993. Lecture Notes in Computer Science, vol. 803. Eds J.W. de Bakker, W.P. de Roever, G. Rozenberg. Berlin, Heidelberg: Springer, 07 June 2005, p. 230—272.
- Jensen K. Coloured Petri Nets: A high level language for system design and analysis. In: High-level Petri Nets. Eds. K. Jensen, G. Rozenberg; Berlin, Heidelberg: Springer, 1991, p. 44—119.
- 18. **Приказ** Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года № 230 «Об утверждении Правил устройства электроустановок» (с изменениями по состоянию на 25.12.2017).
- 19. Правила устройства электроустановок РФ. Приказ Минэнерго России от 08.07.2002 № 204. Раздел З. Защита и автоматика.
- 20. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД 153-34.0-20.527-98. Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России».
- 21. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.



Денис Борисович Зарва, начальник Управления инвестиционных проектов; Национальный ядерный центр, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 2, здание 054 Б, Республика Казахстан zarva@nnc.kz



Алексей Алексеевич Дериглазов, инженер-проектировщик; Инженерная школа ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия aad3@tpu.ru



Эрлан Гадлетович Батырбеков, генеральный директор, д.ф.м.н., профессор; Национальный ядерный центр Республики Казахстан, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 2, здание 054 Б, Республика Казахстан; НИЯУ «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия batyrbekov@nnc.kz





Ирина Лашкаровна Тажибаева, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора филиала ИАЭ НЯЦ; исполнительный директор; Центр безопасности ядерных технологий, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 10, Республика Казахстан; НИЯУ «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия tazhibayeva@ntsc.kz

Алексей Михайлович Ли, программист; Инженерная школа ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия alee@tpu.ru



Вадим Михайлович Павлов к. техн. н., доцент; Инженерная школа ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия pavlov@tpu.ru



Антон Алексеевич Мезенцев, к. техн. н., доцент; Инженерная школа ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 63405 Томск, пр. Ленина 30, Россия mezentsev.anton@gmail.com



Степан Вадимович Меркулов, инженер-проектировщик; Инженерная школа ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия stepan@tpu.ru



Юрий Николаевич Голобоков, инженер; Центр информационных технологий Информационно-аналитического управления, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия golobokov@tpu.ru

> Статья поступила в редакцию 19 ноября 2018 г. После доработки 14 декабря 2018 г. Принята к публикации 18 декабря 2018 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 74—88.