

Рагузин А.С., Губанов Н.Г. Моделирование системы поддержания единого времени на основе иерархической раскрашенной сети Петри // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017)
<http://naukovedenie.ru/PDF/72TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 004.032.322

Рагузин Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Россия, Самара¹
Аспирант
E-mail: ras-83@mail.ru

Губанов Николай Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Россия, Самара
Декан факультета «Автоматики и информационных технологий»
Кандидат технических наук
E-mail: dek_fait@samgtu.ru

Моделирование системы поддержания единого времени на основе иерархической раскрашенной сети Петри

Аннотация. Авторы продолжают исследование процесса поддержания единого времени в подсистемах автоматизированной системы технологического управления на энергообъектах электросетевой компании. В статье рассмотрена задача построения модели системы, отражающей описание данного процесса на примере распределительной сетевой компании, с помощью математического аппарата раскрашенных сетей Петри. Основой для проведения исследования послужила необходимость дать системное описание процессу поддержания единого времени на предприятиях распределительного комплекса электроэнергетики, позволяющее формализовать процесс синхронизации шкал времени, и отсутствие в литературе описания подобных моделей.

Разработанная модель отражает структуру оперативно-технологического управления компании, в ней применены алгоритмы синхронизации шкал времени и мониторинга процесса синхронизации, предложенные в других статьях авторов по данной тематике. Моделирование выполнено в специальной компьютерной моделирующей системе CPN Tools. Приведено описание модели и дан ее анализ на основе имитации поведения сети.

Разработанная модель позволяет: изменять масштабирование времени с целью улучшения реалистичности модели; исследовать динамические характеристики изучаемой системы; анализировать работу алгоритмов синхронизации и мониторинга; реализовывать различное поведение системы, в том числе нештатные ситуации.

Ключевые слова: модель системы поддержания единого времени; синхронизация шкал времени; мониторинг процесса синхронизации; раскрашенная сеть Петри; CPN Tools

¹ 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

В статьях [12, 13] были рассмотрены вопросы организации системы синхронизации шкал времени (ССШВ) и системы мониторинга процесса синхронизации (СМПС). По мнению авторов, эти две подсистемы являются основными составляющими системы поддержания единого времени (СПЕВ) на энергообъектах электросетевой компании.

Укрупненная диаграмма компонентов ССШВ РСК в виде сетевой структуры ведущих и ведомых узлов, соединённых каналами передачи данных, отражающая структуру оперативно-технологического управления (ОТУ) РСК представлена на рисунке 1. Структура ССШВ в большинстве случаев определяется топологией сети передачи данных, и в общем виде представляет собой схему дерева, а на различных участках линейную цепь, либо схему «звезда».

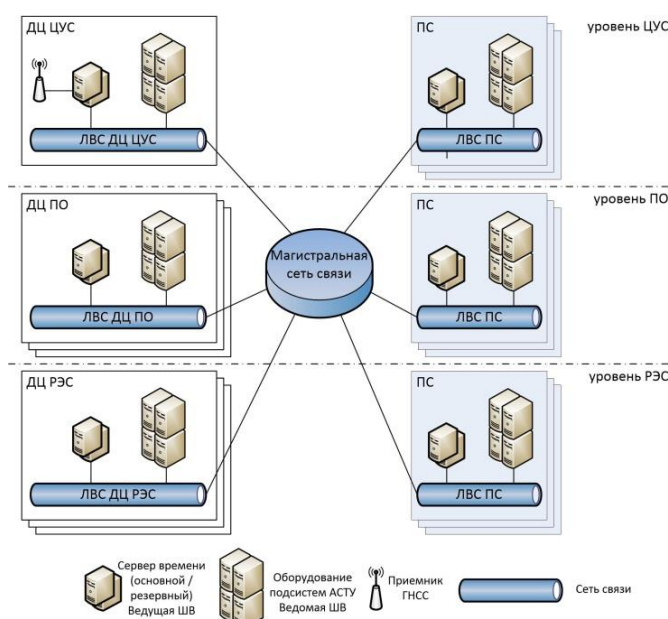


Рисунок 1. Укрупненная диаграмма компонентов ССШВ (разработано авторами): ДЦ - диспетчерский центр; ЦУС - центр управления сетями; ПО - производственное отделение; РЭС - район электрических сетей; ПС - подстанция; ЛВС - локальная вычислительная сеть

Серверы времени в ДЦ на уровне центра управления сетями (ЦУС) имеют возможность синхронизировать свои локальные ШВ по технологиям GPS/ГЛОНАСС с государственным эталоном времени и считаются эталонными. Серверы на последующих уровнях ОТУ синхронизируют свои ШВ друг с другом последовательно по цепочке от сервера с эталонной ШВ. Отдельные устройства и устройства в составе программно-технических комплексов в ДЦ и на подстанциях (ПС) имеют возможность синхронизировать свои локальные ШВ с серверами, находящимися на одном с ними энергообъекте.

На основе рисунка 1 построена упрощенная схема СПЕВ (рисунок 2), содержащая по одному элементу каждого типа на каждом уровне ОТУ. Передача меток времени между узлами системы осуществляется через сеть Ethernet, для простоты на схеме описанной коммутатором SW, в клиент-серверном режиме работы.

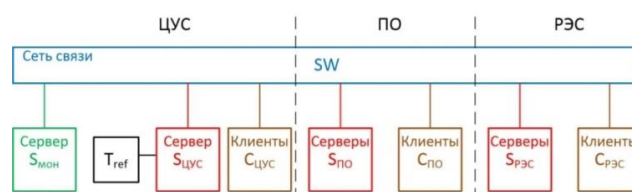


Рисунок 2. Схема СПЕВ (разработано авторами)

Схема информационного взаимодействия компонентов СПЕВ приведена на рисунке 3. Все узлы системы отправляют статистическую информацию о процессе синхронизации на центральный сервер мониторинга, что обеспечивает контроль эффективности работы ССШВ.

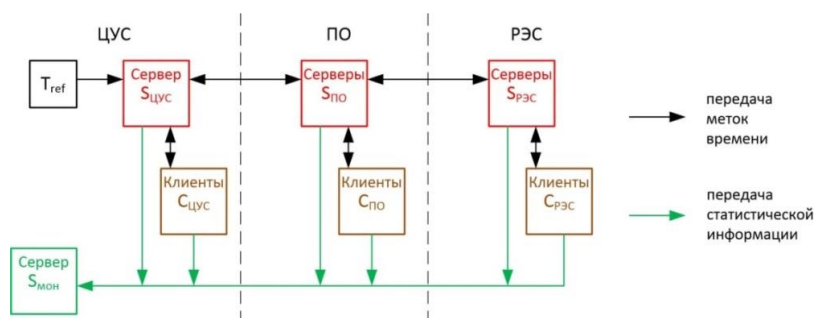


Рисунок 3. Схема информационного взаимодействия компонентов СПЕВ (разработано авторами)

Модель схемы СПЕВ РСК на основе математического аппарата иерархических раскрашенных сетей Петри представлена на рисунке 4. Моделирование выполнено в специальной моделирующей системе CPN Tools, уровень предоставляемого сервиса которой позволяет классифицировать ее, как промышленную моделирующую систему [2, 9].

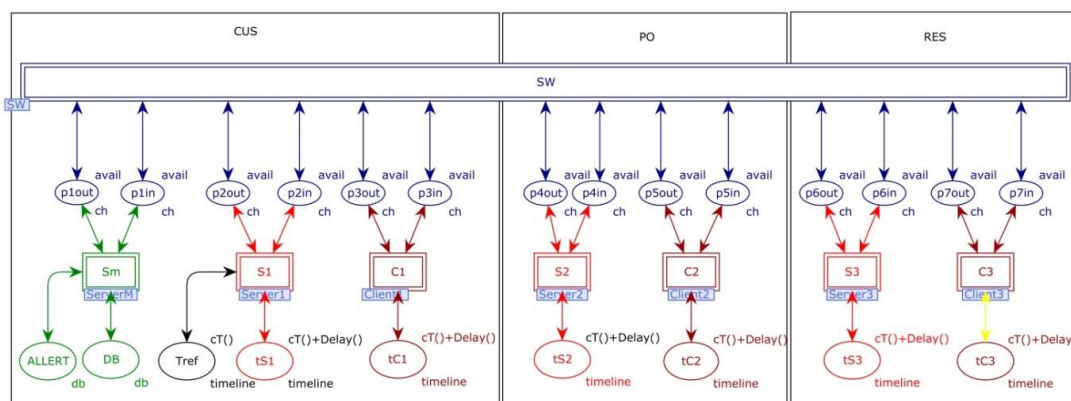


Рисунок 4. Сеть Петри - модель СПЕВ (разработано авторами)

Модель состоит из позиций, изображённых эллипсами, переходов, изображённых прямоугольниками, и дуг. Динамические элементы модели, представленные фишками, расположены в позициях и перемещаются по сети в результате срабатывания переходов [8]. Модель отражает процесс установления единого времени для всех узлов системы, алгоритм которого описывается функциональной схемой, представленной в [11].

Модель является иерархической и подразумевает замену основных элементов (коммутатора, серверов и клиентов) вложенными сетями (подмоделями): коммутатора (SW), сервера мониторинга (Sm), сервера с эталонной ШВ (S1), прочих серверов (S2, S3) и клиентов (C1-C3).

Основой модели коммутатора (SW), представленной на рисунке 5, послужила модель коммутатора из [6]. Модель имеет отдельные входные (p*in) и выходные (p*out) буферы пакетов для каждого порта, и общий буфер для коммутируемых пакетов (Buffer). Позиции p*in и p*out являются контактными позициями с моделью верхнего уровня. Применен полнодуплексный режим работы. Двухнаправленные дуги используются для моделирования процедур обнаружения несущей. Одна дуга проверяет состояние канала, в то время как другая выполняет передачу пакета. Позиция слияния RouteTable представляет множество позиций RT1-RT7 и моделирует статическую таблицу маршрутизации, где каждая из фишек представляет одну запись в этой таблице. Переходы In* и Out* моделируют обработку входящих и исходящих пакетов соответственно и вносят в процесс обмена метками времени соответствующие задержки.

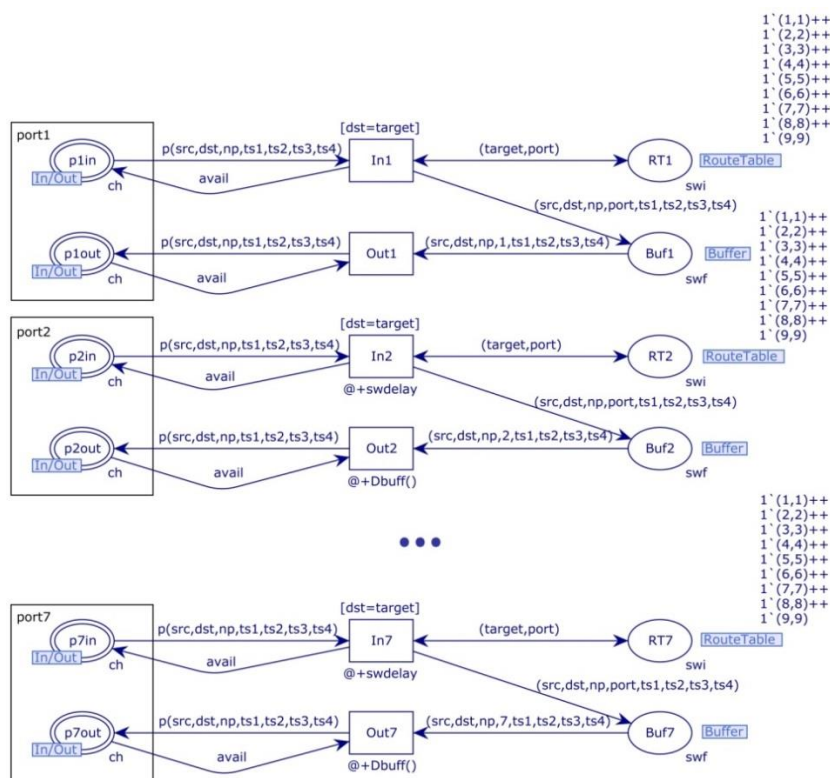


Рисунок 5. Модель коммутатора SW (разработано авторами)

Модели клиентов C1-C3 практически идентичны и представлены на рисунке 6 моделью клиента C1. Различия моделей состоят в значении фишек в позициях IP и DST, указывающих на соответственно собственный IP адрес и IP адрес устройства, с которым будет осуществляться синхронизация.

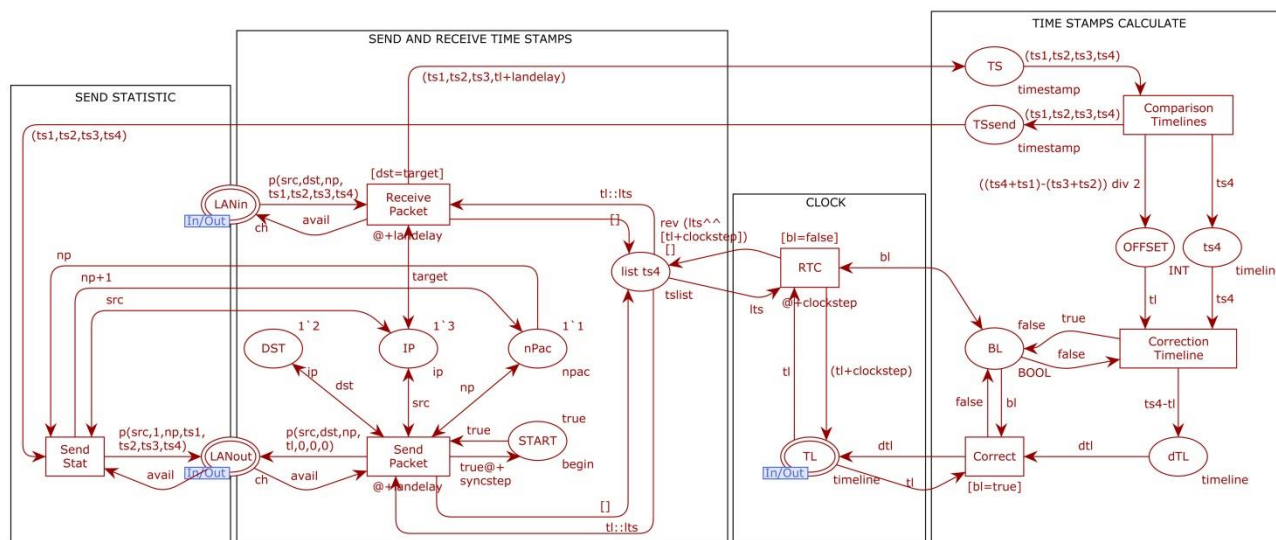


Рисунок 6. Модель клиента C1 (разработано авторами)

Позиции LANin, LANout и TL являются контактными и передают входящие пакеты, исходящие пакеты и показания локальной ШВ соответственно на верхний уровень модели. Элементы модуля CLOCK моделируют формирование локальной ШВ. Элементы модуля SEND AND RECEIVE TIME STAMPS моделируют отправку ведущему устройству запроса и получение от него ответа в соответствии с методом двунаправленной передачи [11]. В модуле TIME STAMPS CALCULATE вычисляется смещение локальной ШВ от ведущей (OFFSET), на значение которого затем корректируется локальная ШВ. Элементы модуля SEND STATISTIC отправляют статистическую информацию о процессе синхронизации на сервер мониторинга [10]. В представленной модели реализована отправка информации о значении смещения OFFSET.

Модели серверов S2 и S3 так же, как и модели клиентов, практически идентичны и представлены на рисунке 7 моделью сервера S2. Функции модулей CLOCK, TIME STAMPS CALCULATE и SEND STATISTIC аналогичны модулям в модели C1. А функционирование модуля SEND AND RECEIVE TIME STAMPS отличается от аналогичного в модели C1 тем, что выполняет еще и отправку ответа на запрос клиента о синхронизации.

Модель сервера S1 (рисунок 8) более проста, чем модели других серверов, так как сервер S1 только отвечает на запросы других узлов, а сам синхронизирует свою ШВ от эталонного источника времени Tref.

Модель сервера мониторинга Sm представлена на рисунке 9. В модуле ANALITICS происходит запись поступившей статистической информации о процессе синхронизации в базу данных, а также мониторинг за одним из критериев оценки точности работы системы синхронизации - превышением ошибки времени между ведомой и ведущей ШВ некоторого заданного контрольного значения (allertoffset).

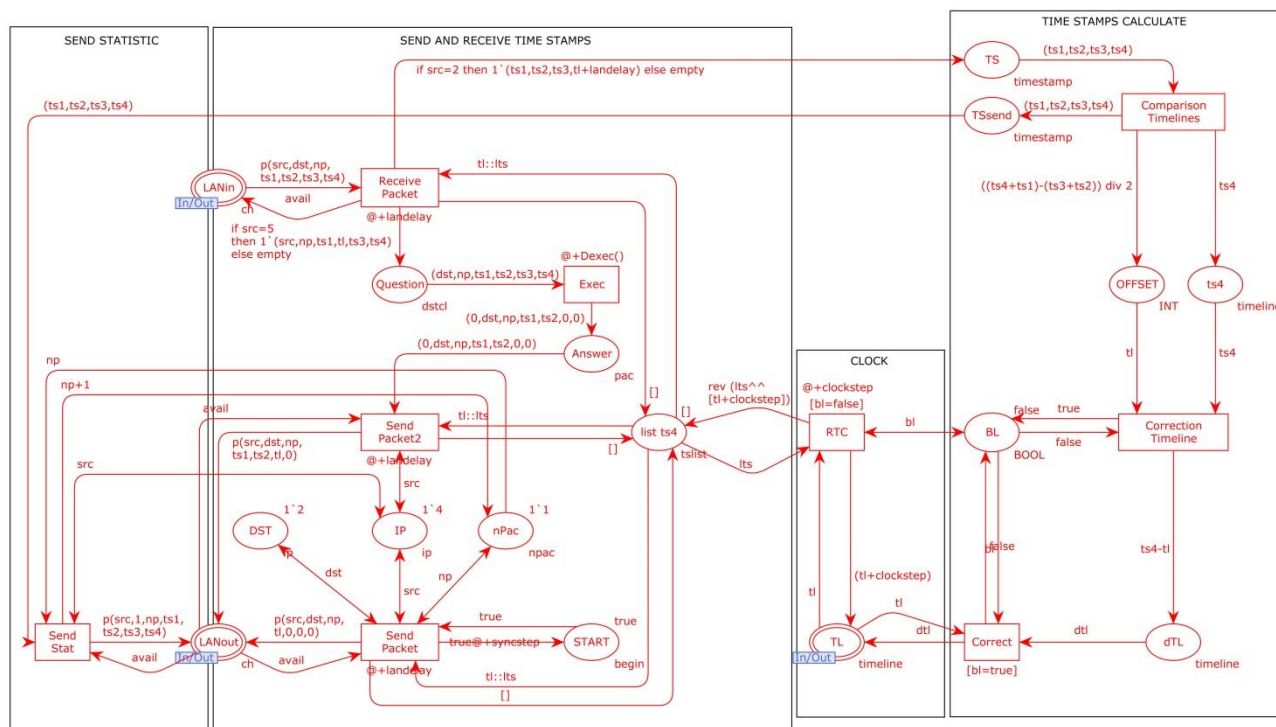


Рисунок 7. Модель сервера S2 (разработано авторами)

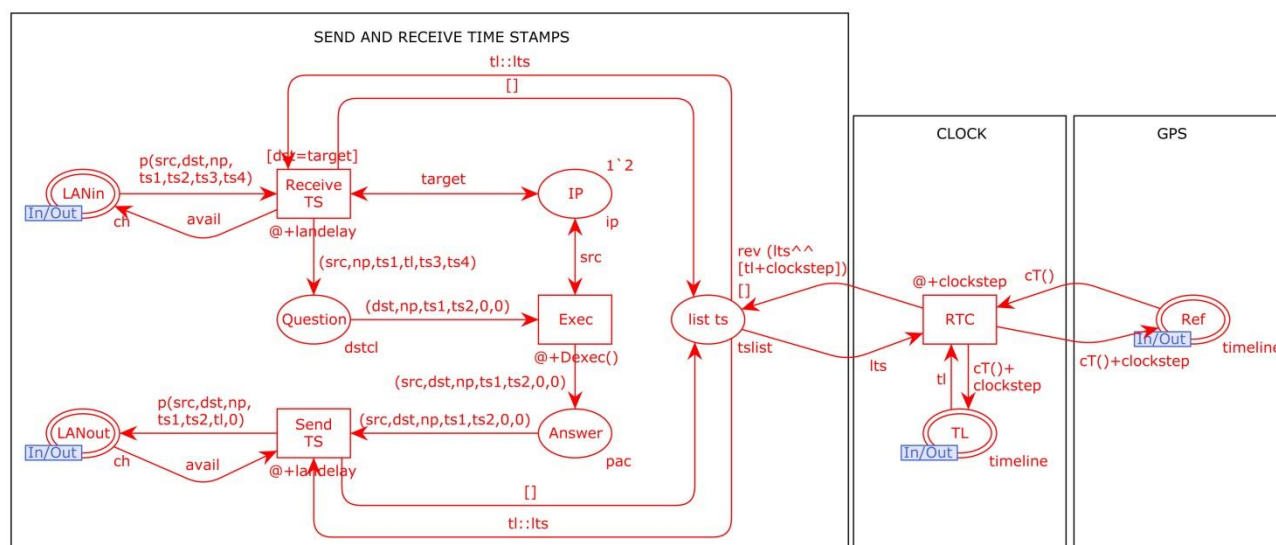


Рисунок 8. Модель сервера S1 (разработано авторами)

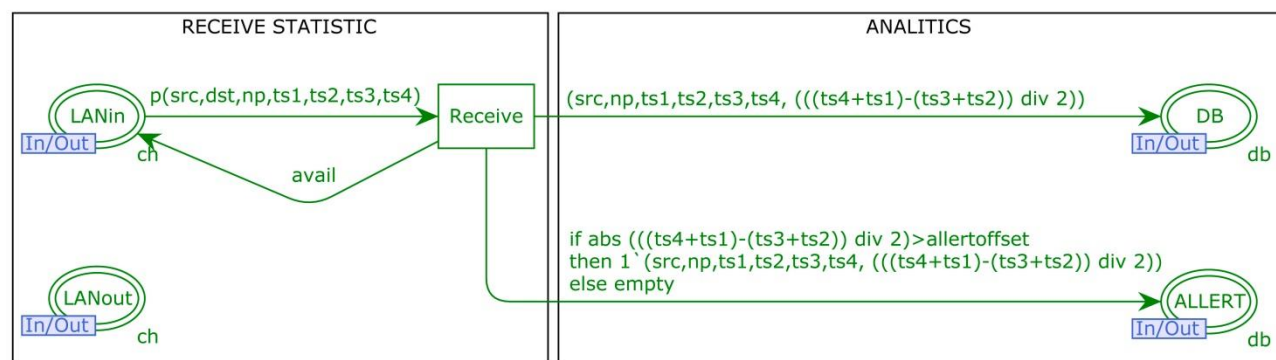


Рисунок 9. Модель сервера мониторинга Sm (разработано авторами)

Описания множеств цветов (colset), переменных (var), величин (val) и функций (fun), используемых в модели, представлены на рисунке 10.

```
colset BOOL = bool;
colset INT = INT;
colset timeline = INT timed;
colset timestamp = product INT * INT * INT * INT timed;
colset begin = BOOL timed;
colset ip = INT;
colset portnum = INT;
colset npac = INT;
colset pac = product ip * ip * npac * timeline * timeline * timeline * timeline timed;
colset ch = union p: pac + avail timed;
colset swi = product ip * portnum;
colset swf = product ip * ip * npac * portnum * timeline * timeline * timeline * timeline timed;
colset dstcl = product ip * npac * timeline * timeline * timeline * timeline;
colset db = product ip * npac * timeline * timeline * timeline * timeline * INT;
colset tslist = list timeline;
var lts: tslist;
var bl: BOOL;
var src, dst, target: ip;
var np: npac;
var tl, dtl, q, ts1, ts2, ts3, ts4: timeline;
var port: portnum;
val clockstep = 10;
val syncstep = 10000;
val landelay = 10;
val swdelay = 5;
val allertoffset = 100;
colset Delta = int with 100..5000;
fun Delay() = Delta.ran();
colset dex = int with 100..200;
fun Dexec() = dex.ran();
colset buff = int with 10..100;
fun Dbuff() = buff.ran();
fun cT() = intInf.toInt(!CPNTime.model_time);
```

- стандартное множество логического типа;
- стандартное целочисленное множество;
- временное целочисленное множество показаний ШВ;
- временное составное множество меток времени ts1-ts4;
- логическое множество запуска цикла синхронизации;
- целочисленное множество IP адресов;
- целочисленное множество номеров портов;
- целочисленное множество номеров пакетов
- временное составное множество содержания пакета;
- временное множество объединения состояний канала связи;
- составное множество статической таблицы маршрутизации;
- временное составное множество пакетов в буфере коммутатора;
- составное множество обработки пакета;
- составное множество базы данных статистики;
- множество цветов список показаний ШВ;
- переменная список показаний ШВ;
- логическая переменная коррекции ШВ;
- переменные IP адресов;
- переменная номер пакета;
- переменные меток времени;
- переменная номер порта;
- величина шага увеличения ШВ;
- величина запуска цикла синхронизации;
- величина задержки пакета при приеме-передаче в устройстве;
- величина задержки пакета при приеме в коммутаторе;
- контрольная величина смещения ШВ для мониторинга;
- целочисленное множество первоначальной ошибки ШВ;
- функция первоначальной ошибки ШВ;
- целочисленное множество задержки обработки пакета сервером;
- функция задержки обработки пакета сервером;
- целочисленное множество задержки пакета в буфере коммутатора;
- функция задержки пакета в буфере коммутатора;
- функция получения текущего модельного времени;

Рисунок 10. Множества цветов модели (разработано авторами)

Время в разработанной модели измеряется в единицах модельного времени (MTU), которое не имеет размерности, и представляется натуральным числом. Масштабирование времени (таблица 1) представляет большой интерес для реалистичности модели. Для представленной модели минимальная временная величина MTU равна 10 и соответствует 1 мс.

Таблица 1

Масштабирование времени (составлено автором)

Параметр	Переменная / Элемент модели	Реальное время, мс	Модельное время, ед.
Задержка приема пакета коммутатором	Swdelay / In*	0,5	5
Задержка передачи пакета коммутатором	Dbuff() / Out*	1..10	10..100
Задержка чтения пакета сетевым адаптером	Landelay / Receive (Send) Packet	1	10
Задержка записи пакета сетевым адаптером	landelay / Receive (Send) Packet	1	10
Время обработки запроса сервером	Dexec() / Exec	10..20	100..200
Временной интервал между запросами синхронизации	syncstep / START	1000	10000
Шаг ШВ устройства	clockstep / RTC	1	10

Сделано допущение, что шкалы времени всех узлов стабильны и идентичны $\Delta\theta = 0$ [11]. На точность синхронизации ШВ оказывают влияние лишь задержки в канале передачи данных,

определяемые вероятностным распределением в определенных диапазонах (таблица 1, рисунок 10).

Прежде, чем проводить анализ модели, была выполнена ее отладка, включающая проверку синтаксиса и пошаговое моделирование. Синтаксис модели проверяется автоматически системой CPN Tools при ее создании. Пошаговое моделирование выполнялось до момента, когда каждый из узлов системы провел по одному циклу синхронизации и корректировки локальной ШВ, и полностью отразило работу предложенных в [10, 11] алгоритмов работы системы. При этом была произведена проверка такого свойства модели, как живость, т.е. возможность срабатывания любого перехода при функционировании модели.

Система CPN Tools предоставляет два основных способа анализа моделей: имитация поведения сети и формирование пространства состояний. Пространство состояний разработанной модели намного сложнее, чем множество достижимости или граф достижимых маркировок классической сети Петри, так как маркировка позиций в ней представлена вектором временных мультимножеств. Кроме того, пространство состояний разработанной модели является бесконечным, так как переходы модели можно запустить бесконечное множество раз. В модели широко используются случайные функции, поэтому наибольший интерес представляют ее статистические свойства, нежели пространство состояний.

Полученные в результате данные средних значений смещения времени на ведомых узлах в течение 100000 (около 16 с модельного времени) и 10000000 (около 1646 с модельного времени) шагов выполнения модели представлены в таблице 2.

Увеличение длительности времени моделирования (стационарный режим) не вызывает существенное изменение ее статистических характеристик, т.е. модель сбалансирована. Смещение времени между ведущей и ведомой ШВ с каждым последующим циклом синхронизации уменьшается, что подтверждает результаты исследования [11], показавшее, что при каждом обновлении данных синхронизации обеспечивается экспоненциальное затухание значения ошибки времени. При этом правильный выбор единицы измерения модельного времени является ключевым вопросом для построения адекватной модели, также как вычисление временных задержек элементов модели.

Таблица 2

Результаты имитации поведения модели (составлено автором)

Узел модели	Среднее значение смещения OFFSET, мс				
	Клиент1	Сервер2	Клиент2	Сервер3	Клиент3
Имитация 100 000 шагов	74	134	57	95	53
Имитация 10 000 000 шагов	< 1	2	<1	1	<1

Таким образом, разработанная модель является адекватной, а результаты работы могут быть использованы при исследовании динамических характеристик систем поддержания единого времени, анализе работы алгоритмов синхронизации и мониторинга, а также для изучения поведения систем, в том числе в нештатных ситуациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисочкин, В.В. Время как обязательный параметр в системе мер метрологического обеспечения учета энергоресурсов / В.В. Борисочкин // Метрология электрических измерений в электроэнергетике: сборник докладов 11-й научно-практической конференции-выставки, апрель 2008. - М., 2008. - С. 68-70.

2. Воевода, А.А. Моделирование сетей Петри в CPN Tools / А.А. Воевода, Д.О. Романников // Сборник научных трудов НГТУ. - 2008. - №3 (53). - С. 49-54.
3. Геворкян, В.М. Проблема синхронизации времени в устройствах системы контроля и измерения электрической энергии / В.М. Геворкян, И.А. Яшин // Вестник МЭИ. - 2008. - №5. - С. 94-100.
4. Гуревич, В.И. Интеллектуальные сети: новые перспективы или новые проблемы? / В.И. Гуревич // Электротехнический рынок. - 2010. - №6 (36). - С. 62-66.
5. Егоров, В. Интеллектуальные технологии в распределительном электросетевом комплексе / В. Егоров, С. Кужеков // ЭнергоРынок. - 2010. - №6. - С. 26-28.
6. Зайцев, Д.А. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелева; Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова. - Одесса, 2006. - 60 с.
7. Котов, В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. - М.: Наука, 1984. - 160 с.
8. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / пер. с англ. М.В. Горбатовой, В.Л. Торхова, В.Н. Четверикова под редакцией В.А. Горбатова. - М.: Мир, 1984. - 264 с.
9. Романников, Д.О. Об использовании программного пакета CPN Tools для анализа сетей Петри. / Д.О. Романников, А.В. Марков // Сборник научных трудов НГТУ. - 2012. - №2 (68) - С. 105-116.
10. Рагузин, А.С. Имитационное моделирование в задачах построения систем синхронизации времени / А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2015. - №3 (47). - С. 69-75.
11. Рагузин, А.С. Методы моделирования системных задач при построении системы синхронизации времени региональной электросетевой компании / А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII Международной конференции (22-25 июня 2015 г. Самара, Россия). - Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. - С. 370-375.
12. Рагузин, А.С. Мониторинг синхронизации времени информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании / А.С. Рагузин, М.А. Шишков, А.Ф. Носенко // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. - Екатеринбург: УрФУ, 2012. - Т2. - С. 58-61.
13. Рагузин, А.С. Синхронизация времени гетерогенных информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании / А.С. Рагузин, М.А. Шишков, А.Ф. Носенко // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды международной научно-технической конференции: сборник статей. В 3 т. - Самара: СамГТУ, 2011. - Т2. - С. 7-12.
14. Шайе, Т. Точная синхронизация времени для задач автоматизации / Т. Шайе, С. Юхансен, Т. Лекстад, Э. Холмайде // АББ Ревю. - 2003. - №2. - С. 9-14.

Raguzin Alexey Sergeevich

Samara state technical university, Russia, Samara

E-mail: ras-83@mail.ru

Gubanov Nikolay Gennadievich

Samara state technical university, Russia, Samara

E-mail: dek_fait@samgtu.ru

Modeling the system for maintaining a single time in a hierarchical colored Petri net

Abstract. The authors continue to research the process of maintaining a single time in the subsystems of the automated system of technological control at the power facilities of the power grid company. The article describes the task of constructing a model of the system for maintaining a single time of a distribution grid company using the colored Petri nets. It is necessary to do this in order to give a systematic description of the process of maintaining a single time at the enterprises of the distribution complex of the electric power industry, which will allow us to formalize the process of synchronization of time scales. There is no description of such models in the literature.

The developed model contains the structure of the operational and technological management of the company, it uses algorithms for synchronizing time scales and monitoring the synchronization process, proposed in other articles of the authors on this topic. Simulation is performed in a special computer simulation system CPN Tools. The description of the model is given and its analysis is given on the basis of simulating the behavior of the network.

The developed model allows the following: change the time scaling to improve the realism of the model; to study the dynamic characteristics of the system; to analyze the work of synchronization and monitoring algorithms; implement various behavior of the system, including contingencies.

Keywords: model of the system for maintaining a single time; synchronization of time scales; monitoring the synchronization process; colored Petri net; CPN Tools