

Научная статья  
УДК 004.942

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-76-86

## Моделирование механизмов транспортных соединений с помощью временных сетей Петри

Надежда Юрьевна Чумакова<sup>1</sup>

✉ nadezhda.chumakova@guap.ru, orcid.org/0000-0002-8979-979X, SPIN-код: 7883-7126

Анна Алексеевна Мамонтова<sup>1</sup>

Mamontovannaa@guap.ru, orcid.org/0009-0006-1155-529X, SPIN-код: 2767-4833

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрены механизмы открытия и закрытия транспортных соединений протокола СТП-ИСС. Для механизмов построены временные ингибиторные сети Петри, позволяющие моделировать работу механизмов с различными значениями таймеров и задержек. Приведены примеры работы данных механизмов.

**Ключевые слова:** бортовые сети, протоколы передачи данных, СТП-ИСС, моделирование, сети Петри

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

**Для цитирования:** Чумакова Н. Ю., Мамонтова А. А. Моделирование механизмов транспортных соединений с помощью временных сетей Петри // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 76–86. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-76-86.

Original article

## Modeling of transport connection mechanisms using temporal Petri nets

Nadezhda Yu. Chumakova<sup>1</sup>

✉ nadezhda.chumakova@guap.ru, orcid.org/0000-0002-8979-979X, SPIN-code: 7883-7126

Anna A. Mamontova<sup>1</sup>

Mamontovannaa@guap.ru, orcid.org/0009-0006-1155-529X, SPIN-code: 2767-4833

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The article considers the STP-ISS protocol mechanisms of opening and closing transport connections. Temporal inhibitory Petri nets are constructed for the mechanisms, allowing to model the operation of mechanisms with different values of timers and delays. Examples of the operation of these mechanisms are presented.

**Keywords:** on-board networks, communication protocols, STP-ISS, modeling, Petri nets

**Acknowledgements.** The paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant agreement No. FSRF-2023-0003 "Fundamental principles of building of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

**For citation:** Chumakova N. Yu., Mamontova A. A. Modeling of transport connection mechanisms using temporal Petri nets. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(5):76–86. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-76-86.

### Введение

Сетевое оборудование, используемое в современных бортовых сетях космических аппаратов, передает и обрабатывает большое количество информационных потоков. С увеличением числа устройств в бортовых сетях возрастает не только количество передаваемой информации, но и объем требований и ограничений к сети.

Необходимо, чтобы при передаче информации накладные расходы были минимальны. В протоколе СТП-ИСС [1] – транспортном протоколе,

используемом в сетях SpaceWire [2], – для уменьшения накладных расходов используются транспортные соединения.

Важно, чтобы в оборудовании, работающем в соответствии с протоколом СТП-ИСС, все механизмы транспортных соединений, в особенности механизмы установки и закрытия соединений, были реализованы корректно, в соответствии со спецификацией протокола.

В статье представлены две модели – модель механизма открытия транспортного соединения

и модель механизма закрытия транспортного соединения. Данные модели могут быть использованы для верификации и аттестационного тестирования реализаций механизмов открытия и закрытия транспортных соединений.

В качестве инструмента для моделирования механизмов были выбраны сети Петри [3] – мощный инструмент исследования систем, с помощью которого были построены модели с необходимым уровнем детализации.

## Транспортные соединения

Протокол СТП-ИСС – это протокол транспортного уровня, разработанный для применения в сетях SpaceWire. SpaceWire – международный стандарт, описывающий построение бортовых сетей передачи, обработки и управления информацией на борту космических аппаратов [1].

Протокол СТП-ИСС позволяет передавать данные как с установкой транспортного соединения, так и без установки. Важно отметить, что транспортные соединения поддерживают передачу только двух типов данных – срочных и обычных сообщений.

Каждое транспортное соединение является однонаправленным, оно соединяет передатчик и приемник удаленных узлов сети. Один узел может поддерживать до 16 транспортных соединений: по восемь для передатчика и приемника. Для учета активных и неактивных транспортных соединений в протоколе СТП-ИСС используется специальный управляющий блок – «Менеджер транспортных соединений».

### Установка транспортного соединения

Установка соединения инициируется приложением, которому необходимо принять или передать большой объем данных.

Узел, являющийся инициатором установки соединения, называется ведущим устройством, а узел, с которым выполняется установка соединения, – ведомым устройством.

Для установки соединения используется трехфазный протокол (рис. 1).

Ведущее устройство отправляет ведомому пакет запроса установки соединения (ЗУС). После этого менеджер транспортных соединений должен взвести таймер  $T_{con}$ , в течение которого будет ожидаться пакет подтверждения установки соединения (ПУС) от удаленного узла.

В случае, если пакет ПУС не был получен до момента истечения таймера  $T_{con}$ , ведущее устройство должно повторно отправить пакет ЗУС и вновь взвести таймер  $T_{con}$ . Если таймер

$T_{con}$  истек три раза и пакет ПУС так и не был получен, то приложение должно быть проинформировано о том, что соединение не установлено (рис. 2).

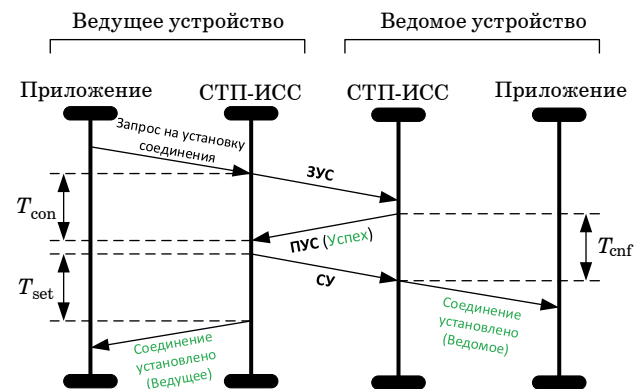
При успешном приеме пакета ЗУС ведомое устройство должно сформировать пакет ПУС. В зависимости от того, может ли быть открыто соединение, поле **Статус соединения** пакета ПУС может принимать значения:

– **Успех**, если соединение может быть установлено;

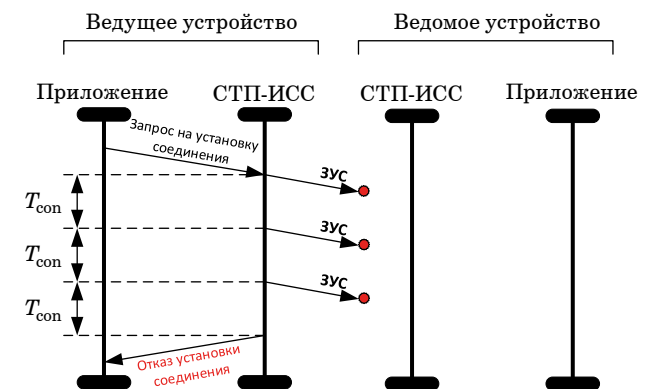
– **Отказ установки соединения**, если соединение не может быть установлено. Отказ может возникнуть по одной из следующих причин: отсутствие свободного пространства в буфере ведомого устройства, отсутствие свободного соединения в ведомом устройстве.

При отправке пакета ПУС с параметром **Успех** на ведомом устройстве должен быть возведен таймер  $t_{cnf}$  в течение которого будет ожидаться пакет **Соединение установлено (СУ)** от ведущего устройства.

Если пакет ПУС с параметром **Успех** получен ведущим устройством до момента истечения



• Рис. 1. Установка соединения  
• Fig. 1. Connection establishment



• Рис. 2. Отказ установки соединения  
• Fig. 2. Connection establishment failure

таймера  $t_{\text{con}}$ , то происходит остановка таймера  $t_{\text{con}}$ , производится отправка ведомому устройству пакета СУ, а также запуск таймера  $T_{\text{set}}$ , который отсчитывает время до получения пакета СУ ведомым устройством.

Если пакет СУ получен ведомым устройством до времени истечения таймера  $T_{\text{cnf}}$ , то ведомое устройство переходит в состояние **Соединение установлено – ведомое**.

Если таймер  $T_{\text{cnf}}$  истек, а пакет СУ не был получен, то ведомое устройство должно снова отправить пакет ПУС и взвести таймер  $T_{\text{cnf}}$ . Ведомое устройство должно прекратить повторную отpravку пакета ПУС, если таймер  $t_{\text{cnf}}$  истек три раза – в таком случае соединение закрывается.

Если пакет ПУС с параметром **Успех** получен ведущим устройством в состоянии **Открытие соединения** после отправки пакета СУ и до истечения таймера  $T_{\text{set}}$ , то производятся следующие действия:

- 1) остановка таймера  $T_{\text{set}}$ ;
- 2) отправка ведомому устройству пакета СУ;
- 3) запуск таймера установки соединения  $T_{\text{set}}$ .

В случае, если пакет СУ получен ведомым устройством до времени истечения таймера  $T_{\text{cnf}}$ , ведомое устройство информирует приложение о том, что соединение установлено.

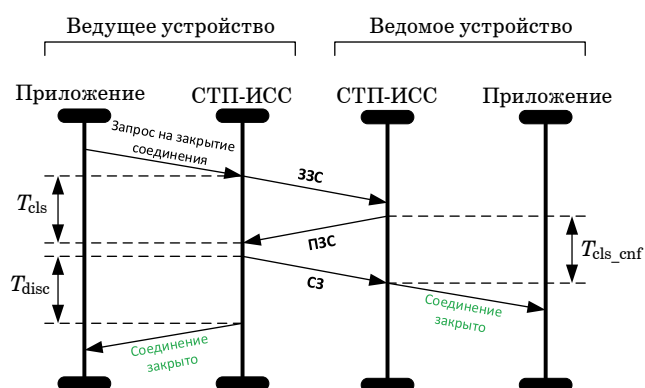
При истечении таймера  $T_{\text{set}}$  ведомое устройство находится в состоянии **Соединение установлено – ведомое**, а на ведущем устройстве соединение переходит в состояние **Соединение установлено – ведущее**.

### Заккрытие транспортного соединения

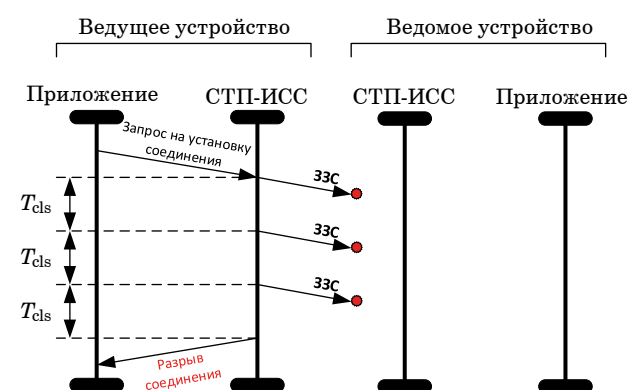
Заккрытие соединения инициируется приложением, которое являлось инициатором открытия транспортного соединения. Узел, являющийся ведомым устройством, не может стать инициатором закрытия соединения.

Для установки соединения, так же, как и для открытия соединения, используется трехфазный протокол (рис. 3).

Для закрытия соединения ведущее устройство формирует пакет запроса закрытия соединения (ЗЗС) и отправляет его ведомому устройству. После этого должен быть возведен таймер закрытия соединения  $T_{\text{cls}}$ , в течение которого будет ожидаться пакет подтверждения закрытия соединения (ПЗС) от ведомого устройства. В случае, если пакет ПЗС не был получен до истечения таймера  $T_{\text{cls}}$ , ведущее устройство должно повторно отправить пакет ПЗС и заново взвести соответствующий таймер. Если таймер  $T_{\text{cls}}$  истек три раза и при этом пакет ПЗС получен не был, соединение должно быть разорвано. Соответствующее транспортное соединение



• Рис. 3. Закрытие соединения  
• Fig. 3. Connection closing



• Рис. 4. Разрыв соединения  
• Fig. 4. Connection broken

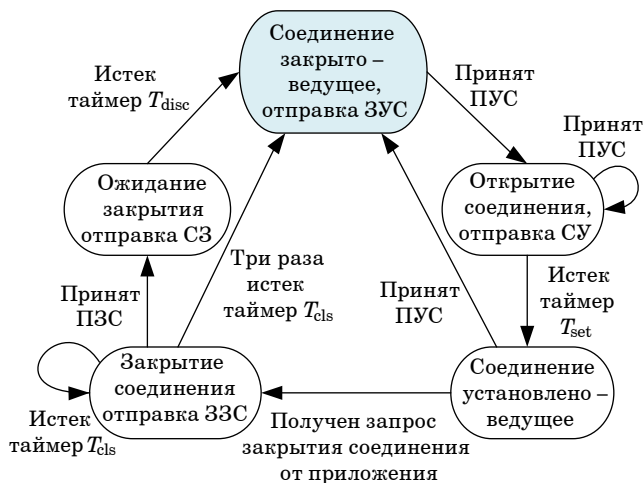
на ведущем устройстве переходит в состояние **Соединение закрыто** (рис. 4).

После отправки пакета ПЗС ведомое устройство возводит таймер  $T_{\text{cls\_cnf}}$ , в течение которого от ведущего устройства ожидается пакет **Соединение закрыто** (СЗ).

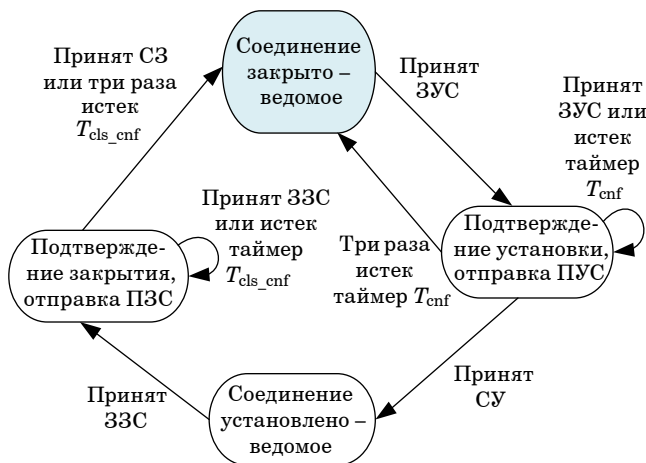
Если пакет ПЗС получен ведущим устройством до времени истечения таймера  $t_{\text{cls}}$ , то выполняется остановка таймера  $T_{\text{cls}}$ , затем происходят отправка ведомому устройству пакета СЗ и запуск таймера  $T_{\text{disc}}$ , который отсчитывает время до момента, когда ведомое устройство примет пакет СЗ. После этого транспортное соединение на ведущем устройстве переходит в состояние **Ожидание закрытия**.

В случае, если пакет ПЗС получен ведущим устройством, находящимся в состоянии **Ожидание закрытия**, и при этом пакет СЗ был отправлен, а таймер  $T_{\text{disc}}$  не истек, то производится остановка таймера  $T_{\text{disc}}$ , ведомому устройству отправляется пакет СЗ, и снова запускается таймер  $T_{\text{disc}}$ .

Если пакет СЗ получен ведомым устройством до времени истечения таймера  $T_{\text{cls\_cnf}}$ , ведомое



• Рис. 5. Машина состояний установки и закрытия транспортного соединения ведущего устройства  
• Fig. 5. State machine of the establishment and closure of the master device transport connection



• Рис. 6. Машина состояний установки и закрытия транспортного соединения ведомого устройства  
• Fig. 6. State machine of the establishment and closure of the slave device transport connection

устройство должно проинформировать приложение о том, что соединение было закрыто.

Если пакет СЗ не был получен, а таймер  $T_{cls\_cnf}$  истек, то ведомое устройство должно повторно отправить пакет ПЗС и возвести таймер  $T_{cls\_cnf}$ . В случае, если таймер  $T_{cls\_cnf}$  истек или был сброшен три раза, а пакет СЗ получен не был, то соединение должно быть разорвано. При этом транспортное соединение на ведомом устройстве переходит в состояние **Соединение закрыто**.

На рис. 5 показана машина состояний установки и закрытия транспортного соединения для ведущего устройства, на рис. 6 – для ведомого.

## Сети Петри. Временные и ингибиторные сети Петри

В данном исследовании для моделирования механизмов установки и закрытия транспортных соединений использовались сети Петри.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный мультиграф с двумя типами вершин – позициями (условиями) и переходами (действиями). Формально сеть Петри описывается четверкой  $C = (P, T, I, O)$ , где  $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$  – конечное множество позиций;  $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$  – конечное множество переходов;  $I$  – входная функция;  $O$  – выходная функция.

Позиции и переходы соединяются ориентированными дугами, причем дуга может соединять только вершины разных типов – позицию и переход. Дуги могут быть направлены как от переходов к позициям, так и наоборот. Допустимо использование кратных дуг – соединения позиции и перехода двумя и более дугами, направленными в одну сторону.

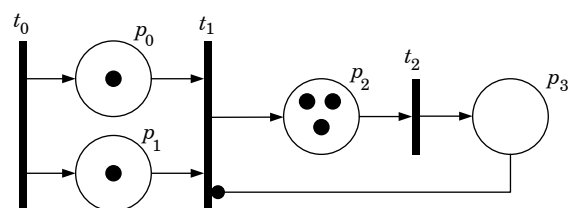
Позициям могут присваиваться фишки, символизирующие различные объекты в сети. Число и положение фишек в сети называется маркировкой. Маркировка может изменяться в процессе работы сети.

Работа сети Петри заключается в запуске ее переходов. Переход разрешен для запуска в случае, если каждая его входная позиция имеет число фишек, большее или равное числу дуг, направленных от данной позиции к данному переходу.

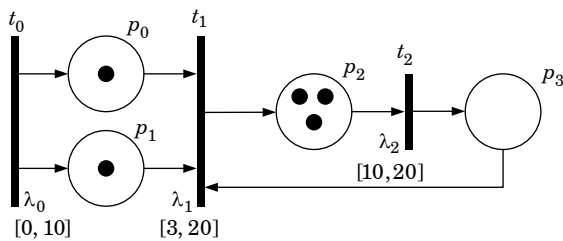
При срабатывании перехода фишки из его входных позиций удаляются (в количестве, равном числу дуг от позиций к переходу) и добавляются к выходным позициям (в количестве, равном числу дуг от перехода к позициям). В один момент времени может сработать только один любой переход из разрешенных [4].

Существует множество подклассов сетей Петри. Для моделирования механизмов установки и закрытия транспортных соединений протокола СТП-ИСС были использованы следующие подклассы сетей Петри:

1) ингибиторные сети Петри (рис. 7). Используются ингибиторные дуги, осуществляющие



• Рис. 7. Ингибиторная сеть Петри  
• Fig. 7. Inhibitor Petri net



• Рис. 8. Временная сеть Петри с жестким временем  
• Fig. 8. Timed Petri net with hard time

проверку на нулевую разметку. В случае, если переход соединен с входной позицией ингибиторной дугой, он может быть запущен только при отсутствии фишек в данной позиции. На графе ингибиторные дуги отображаются в виде дуг с небольшими кругами вместо стрелок (на рис. 7 дуга от позиции  $p_3$  к переходу  $t_1$ );

2) временные сети Петри (рис. 8). Переходы ограничены дополнительным временным условием. Существуют различные типы временных сетей Петри: с мягким временем, с жестким временем и другие. Для построения моделей механизмов установки и закрытия транспортных соединений были использованы сети Петри с жестким временем (рис. 8).

В сетях Петри с жестким временем переходы обладают задержкой срабатывания  $\lambda$ , выполняемой после того, как переход станет разрешенным. Помимо задержек, для переходов устанавливается временной интервал, в течение которого переход должен сработать –  $(\alpha, \beta)$ , где  $\alpha$  – нижний, а  $\beta$  – верхний предел срабатывания перехода, т. е. минимальное и максимальное время срабатывания перехода после того, как он стал разрешенным [4].

## Моделирование механизмов установки и закрытия транспортного соединения

### Сеть Петри для механизма установки транспортного соединения

Для моделирования работы механизма установки транспортного соединения протокола СТП-ИСС-14 построена временная ингибиторная сеть Петри (рис. 9).

В представленной сети Петри задержка срабатывания переходов составляет 1 мкс, кроме переходов, у которых явно указана задержка: переходы  $t_9, t_{18}, t_{24}, t_8, t_{16}, t_{25}$  с задержками  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  соответственно. Данные задержки представляют собой время для передачи пакетов ЗУС ( $t_8, t_9$ ), ПУС ( $t_{16}, t_{18}$ ) и СУ ( $t_{24}, t_{25}$ ) по сети.

Для моделирования истечения таймеров  $T_{\text{con}}, T_{\text{cnf}}, T_{\text{set}}$ , благодаря которым определяется актуальность принятых пакетов ЗУС, ПУС и СУ, задаются интервалы срабатывания (верхняя и нижняя границы срабатывания) для следующих переходов:

1)  $t_{11}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку пакета ЗУС по истечении таймера  $T_{\text{con}}$  при условии, что пакет ПУС не был принят. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{\text{con}}, T+T_{\text{con}}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{\text{con}}$ , где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{\text{con}}$  был взведен;

2)  $t_{21}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку ПУС по истечении таймера  $T_{\text{cnf}}$  при условии, что пакет СУ не был принят. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{\text{cnf}}, T+T_{\text{cnf}}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{\text{cnf}}$  где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{\text{cnf}}$  был взведен;

3)  $t_{15}$  – срабатывание перехода означает отправку пакета СУ после того, как пакет ПУС с параметром **Успех** был принят до истечения таймера  $T_{\text{con}}$ . Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{\text{con}}]$  – переход может сработать с момента взведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{\text{con}}$ ;

4)  $t_{23}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку СУ после повторного приема пакета ПУС до истечения таймера  $T_{\text{set}}$ . Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{\text{set}}]$  – переход может сработать с момента взведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{\text{set}}$ ;

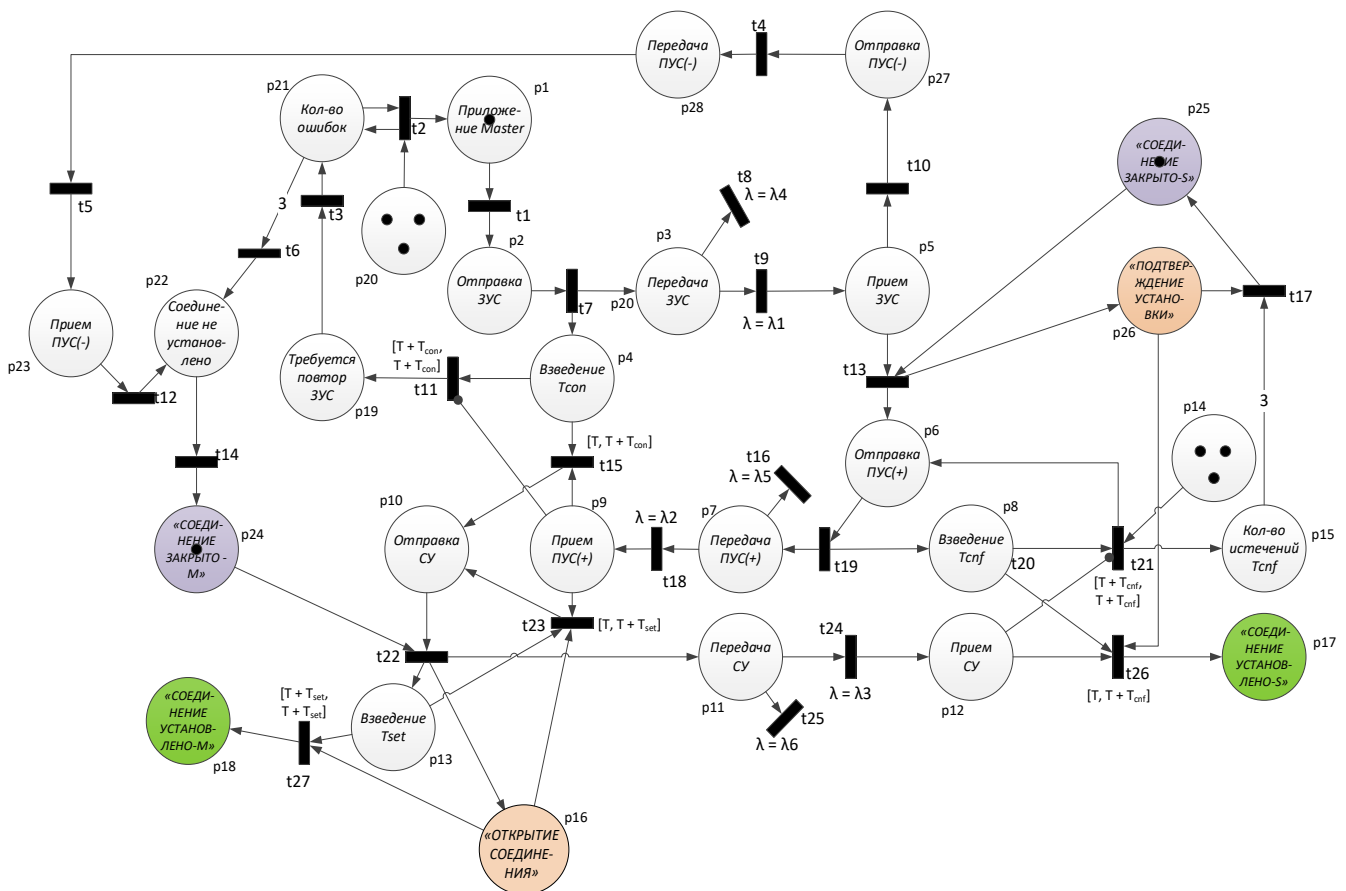
5)  $t_{26}$  – срабатывание перехода означает прием пакета СУ до истечения таймера  $T_{\text{cnf}}$  и переход ведомого устройства в состояние **Соединение установлено – ведомое**. Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{\text{cnf}}]$  – переход может сработать с момента взведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{\text{cnf}}$ ;

6)  $t_{27}$  – срабатывание перехода означает истечение таймера  $T_{\text{set}}$  и переход ведущего устройства в состояние **Соединение установлено – ведущее**. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{\text{set}}, T+T_{\text{set}}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{\text{set}}$ , где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{\text{set}}$  был взведен.

В сети Петри также предусмотрены переходы, которые иллюстрируют потерю пакетов ЗУС ( $t_8$ ), ПУС ( $t_{16}$ ), СУ ( $t_{25}$ ) при передаче по сети.

Рассмотрим позиции, представляющие собой состояния ведущего (рис. 5) и ведомого (рис. 6) устройств:

– позиция  $p_{24}$  – состояние **Соединение закрыто** для ведущего устройства. В начальной разметке в данной позиции находится фишка;



• Рис. 9. Временная ингибиторная сеть Петри для механизма установки транспортного соединения  
• Fig. 9. Timed inhibitory Petri net for transport connection establishment mechanism

– позиция  $p_{26}$  – состояние **Соединение закрыто** для ведомого устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция  $p_{16}$  – состояние **Открытие соединения** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета СУ (после срабатывания перехода  $t_{22}$ );

– позиция  $p_{26}$  – состояние **Подтверждение установки** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета ЗУС (после срабатывания перехода  $t_{13}$ );

– позиция  $p_{18}$  – состояние **Соединение установлено** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается при истечении таймера  $T_{set}$  (после срабатывания перехода  $t_{27}$ );

– позиция  $p_{17}$  – состояние **Соединение установлено** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета СУ (после срабатывания перехода  $t_{26}$ ).

Построенная сеть Петри позволяет исследовать случаи возникновения ошибок при открытии соединения. Например, когда по каким-либо причинам пакет подтверждения установки соединения (ПУС) не был получен ведущим устрой-

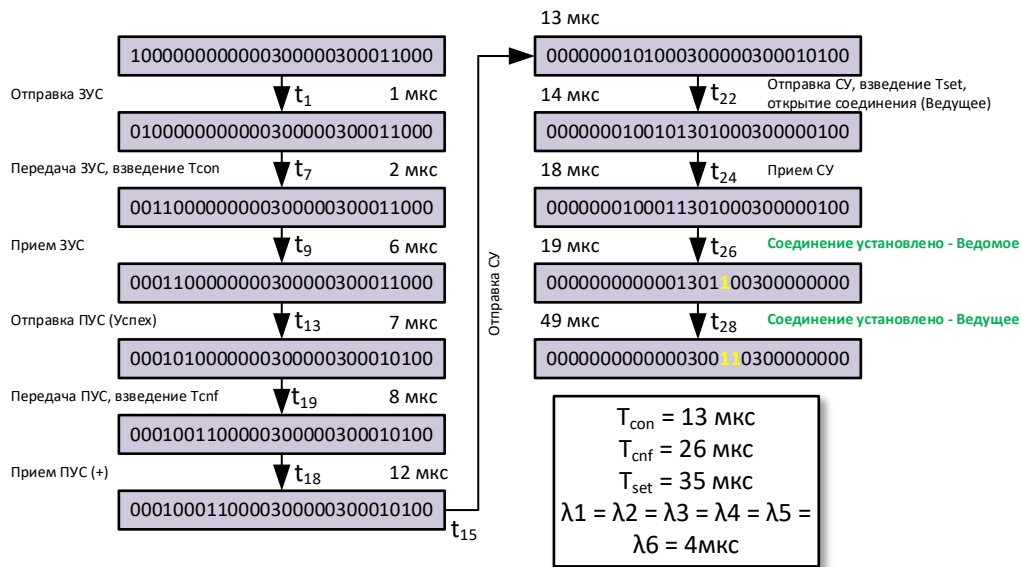
ством и соответствующий таймер  $T_{con}$  истек три раза. Для моделирования данного события в сеть добавлена позиция  $p_{20}$ , в которой в начальной маркировке находятся три фишки (возможные три ошибки). По истечении таймера  $T_{con}$  (переход  $t_{11}$ ) потребуется повторная отправка ЗУС (фишка в  $p_{19}$ ), и станет разрешенным переход  $t_2$ . При срабатывании перехода  $t_2$  из состояния  $p_{20}$  извлекается одна фишка, в состояние  $p_{21}$  (количество допущенных ошибок) добавляется одна фишка. Таким образом, срабатывание данного перехода становится возможным только три раза.

Рассмотрим пример работы временной ингибиторной сети Петри в случае успешной установки транспортного соединения. На рис. 10 показана ветка дерева достижимости временной ингибиторной сети Петри.

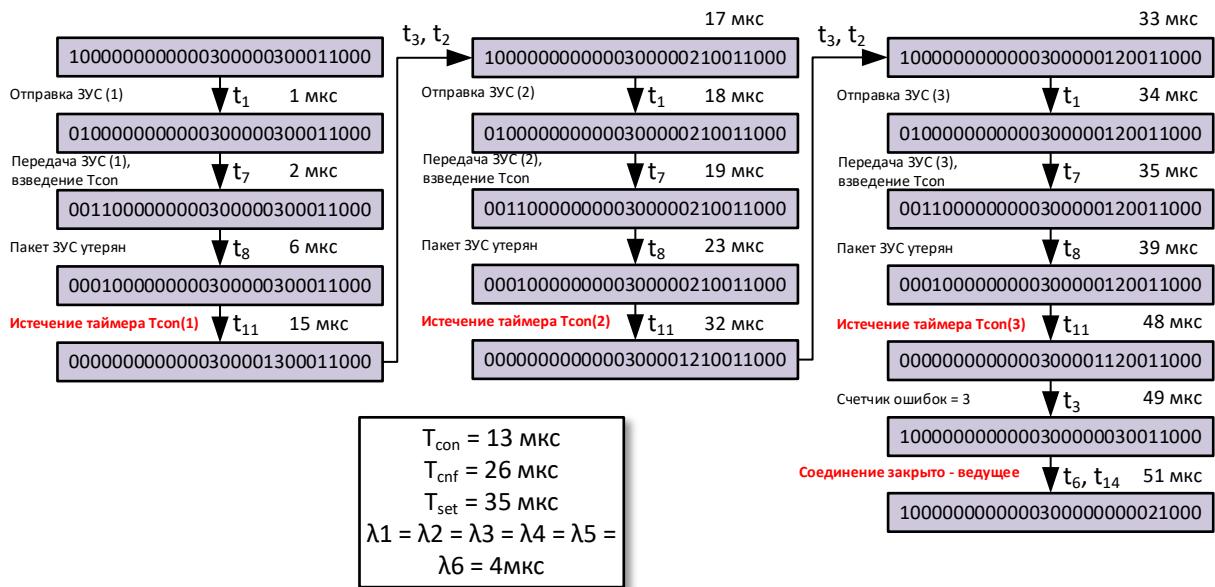
В приведенном примере установка соединения происходит со следующими параметрами:

- 1) таймер  $T_{con} = 13$  мкс;
- 2) таймер  $T_{cnf} = 26$  мкс;
- 3) таймер  $T_{set} = 35$  мкс;
- 4) время отправки пакетов ЗУС, ПУС, СУ ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$ ) составляет 4 мкс.





- Рис. 10. Ветка дерева достижимости для случая успешной установки соединения
- Fig. 10. Reachability tree branch for the case of successful connection establishment



- Рис. 11. Ветка дерева достижимости для случая возникновения ошибки
- Fig. 11. Reachability tree branch for error case

На построенной ветке дерева достижимости взведение таймера  $T_{con}$  происходит в момент времени  $T_1 = 2 \text{ мкс}$  (переход  $t_7$ ). Это означает, что пакет ПУС должен быть получен до 15 мкс ( $T_1 + T_{con}$ ). Прием пакета ПУС (переход  $t_{18}$ ) происходит в момент времени 12 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер  $T_{cnf}$  взводится в момент времени  $T_2 = 8 \text{ мкс}$  (переход  $t_{19}$ ). Это означает, что пакет СУ должен быть получен до 34 мкс ( $T_2 + T_{cnf}$ ). Прием пакета СУ (переход  $t_{24}$ ) происходит в мо-

мент времени 18 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер  $T_{set}$  взводится в момент времени  $T_3 = 14 \text{ мкс}$ . Это означает, что ведущее устройство должно ожидать до 49 мкс ( $T_3 + T_{set}$ ) для перехода в состояние **Соединение установлено – ведущее**. В момент времени 49 мкс переход срабатывает, ошибки не произошло.

На рис. 11 показана ветка дерева достижимости сети Петри, которая иллюстрирует пример возникновения ошибки при установке соедине-

ния. В данном примере пакет ЗУС был утерян (переход  $t_8$ ) три раза, поэтому пакет ПУС не был получен ведущим устройством до трехкратного истечения таймера  $T_{con}$ .

Истечение таймера иллюстрирует переход  $t_{11}$ . После истечения таймера в третий раз ведущее устройство прекращает попытку установки соединения (переходы  $t_6, t_{14}$ ).

### Сеть Петри для механизма закрытия транспортного соединения

Для моделирования работы механизма закрытия транспортного соединения протокола СТП-ИСС-14 построена временная ингибиторная сеть Петри (рис. 12).

В представленной сети Петри задержка срабатывания переходов составляет 1 мкс, кроме переходов, у которых явно указана задержка: переходы  $t_9, t_{18}, t_{24}, t_8, t_{16}, t_{25}$  с задержками  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  соответственно. Данные задержки представляют собой время для передачи пакетов ЗЗС ( $t_8, t_9$ ), ПЗС ( $t_{16}, t_{18}$ ) и СЗ ( $t_{24}, t_{25}$ ) по сети.

Для моделирования истечения таймеров  $T_{cls}$ ,  $T_{cls\_cnf}$ ,  $T_{disc}$ , благодаря которым определяется актуальность принятых пакетов ЗЗС, ПЗС и СЗ, задаются интервалы срабатывания (верхняя и нижняя границы срабатывания) для следующих переходов:

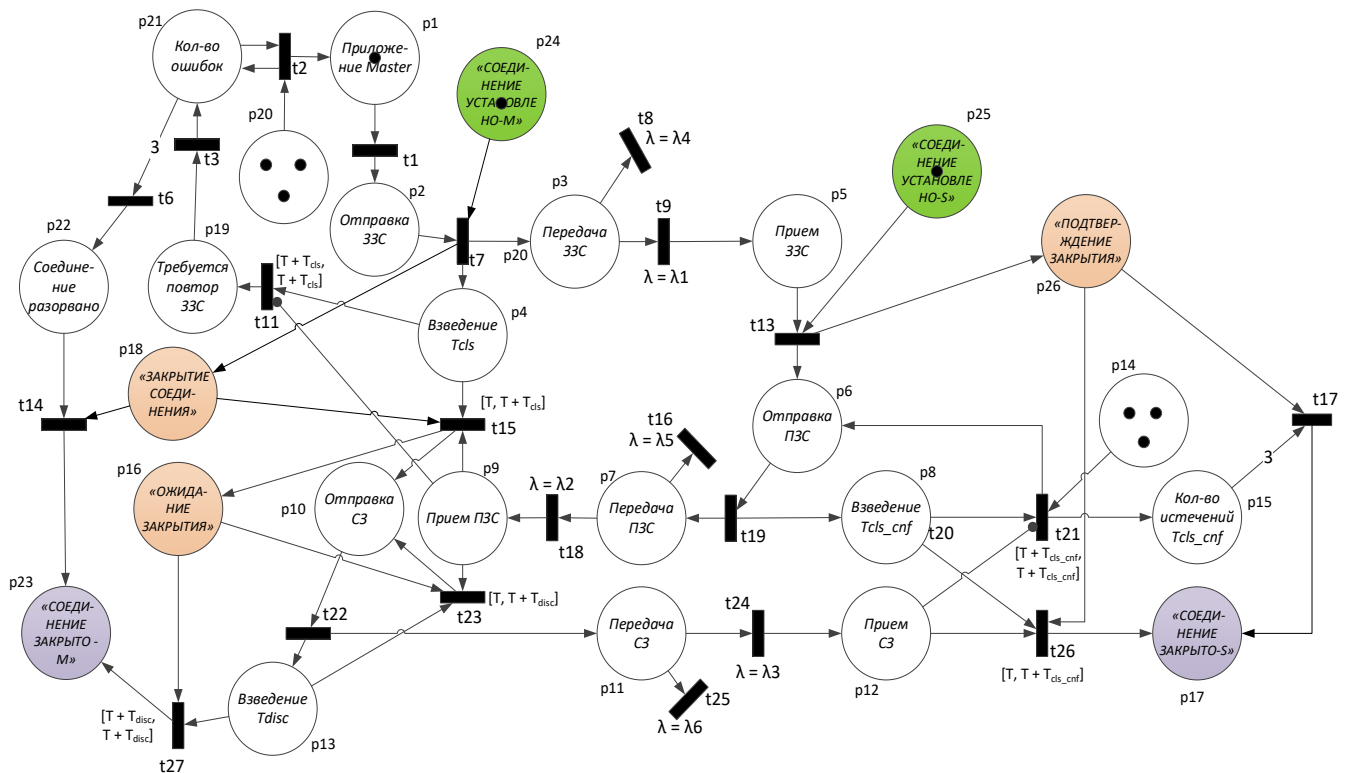
1)  $t_{11}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку пакета ЗЗС по истечении таймера  $T_{cls}$  при условии, что пакет ПЗС не был принят. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{cls}, T+T_{cls}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{cls}$ , где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{cls}$  был взведен;

2)  $t_{21}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку ПЗС по истечении таймера  $T_{cls\_cnf}$  при условии, что пакет СЗ не был принят. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{cls\_cnf}, T+T_{cls\_cnf}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{cls\_cnf}$ , где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{cls\_cnf}$  был взведен;

3)  $t_{15}$  – срабатывание перехода означает отправку пакета СЗ после того, как пакет ПЗС был принят до истечения таймера  $T_{cls}$ . Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{cls}]$  – переход может сработать с момента взведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{cls}$ ;

4)  $t_{23}$  – срабатывание перехода означает повторную отправку СЗ после повторного приема пакета (ПЗС) до истечения таймера  $T_{disc}$ . Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{disc}]$  – переход может сработать с момента взведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{disc}$ ;

5)  $t_{26}$  – срабатывание перехода означает прием пакета СЗ до истечения таймера  $T_{cls\_cnf}$  и переход



• Рис. 12. Временная ингибиторная сеть Петри для механизма закрытия транспортного соединения  
• Fig. 12. Timed inhibitory Petri net for transport connection closure mechanism



ведомого устройства в состояние **Соединение закрыто – ведомое**. Для данного перехода задана задержка  $[T, T+T_{cls\_cnf}]$  – переход может сработать с момента возведения ( $T$ ) до момента срабатывания таймера  $T_{cls\_cnf}$ ;

б)  $t_{27}$  – срабатывание перехода означает истечение таймера  $T_{disc}$  и переход ведущего устройства в состояние **Соединение установлено – ведущее**. Для данного перехода задана задержка  $[T+T_{disc}, T+T_{disc}]$  – переход сработает в момент времени  $T+T_{disc}$ , где  $T$  – время, в которое таймер  $T_{disc}$  был взведен.

В сети Петри также предусмотрены переходы, которые иллюстрируют потерю пакетов ЗЗС ( $t_8$ ), ПЗС ( $t_{16}$ ), СЗ ( $t_{25}$ ) при передаче по сети.

Рассмотрим позиции, представляющие собой состояния ведущего (рис. 5) и ведомого (рис. 6) устройств:

– позиция  $p_{24}$  – состояние **Соединение установлено – ведущее** для ведущего устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция  $p_{25}$  – состояние **Соединение установлено – ведомое** для ведомого устройства. В начальной маркировке в данной позиции находится фишка;

– позиция  $p_{18}$  – состояние **Закрытие соединения** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета ЗЗС (после срабатывания перехода  $t_7$ );

– позиция  $p_{16}$  – состояние **Ожидание закрытия** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета СЗ (после срабатывания перехода  $t_{15}$ );

– позиция  $p_{26}$  – состояние **Подтверждение закрытия** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после отправки пакета ПЗС (после срабатывания перехода  $t_{13}$ );

– позиция  $p_{23}$  – состояние **Соединение закрыто** для ведущего устройства. Фишка в данную позицию помещается при истечении таймера  $T_{disc}$  (после срабатывания перехода  $t_{27}$ ), либо после разрыва соединения (после срабатывания перехода  $t_{14}$ );

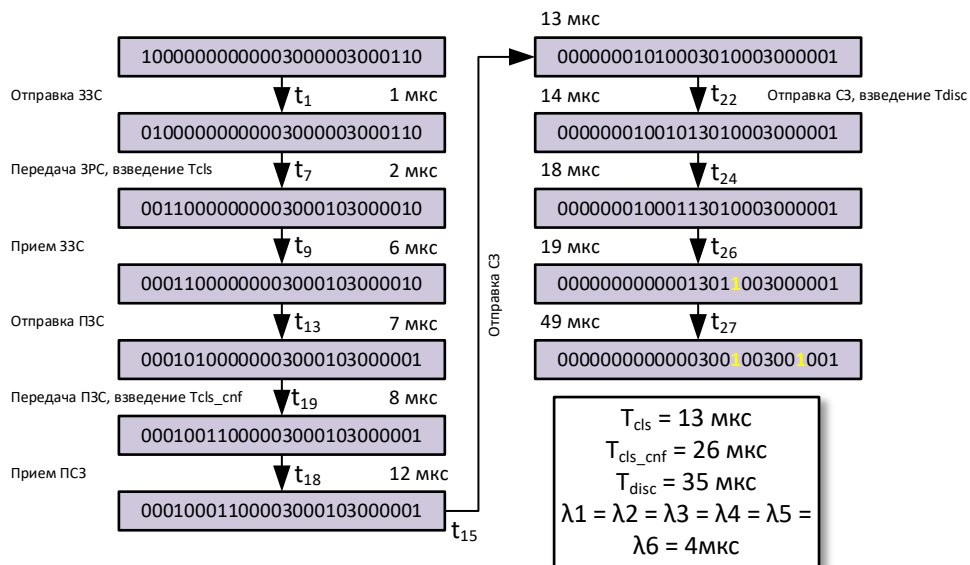
– позиция  $p_{17}$  – состояние **Соединение закрыто** для ведомого устройства. Фишка в данную позицию помещается после приема пакета СЗ (после срабатывания перехода  $t_{26}$ ), либо после трехкратного истечения таймера  $T_{cls\_cnf}$  (после срабатывания перехода  $t_{17}$ ).

Рассмотрим пример работы временной ингибиторной сети Петри в случае успешного закрытия транспортного соединения. На рис. 13 показана ветка дерева достижимости временной ингибиторной сети Петри.

В приведенном примере установка соединения происходит со следующими параметрами:

- 1) таймер  $T_{cls} = 13$  мкс;
- 2) таймер  $T_{cls\_cnf} = 26$  мкс;
- 3) таймер  $T_{disc} = 35$  мкс;
- 4) время отправки пакетов ЗЗС, ПЗС, СЗ ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$ ) составляет 4 мкс.

На построенной ветке дерева достижимости взведение таймера  $T_{cls}$  происходит в момент времени  $T_1 = 2$  мкс (переход  $t_7$ ). Это означает, что пакет ПЗС должен быть получен до 15 мкс ( $T_1 + T_{cls}$ ). Прием пакета ПЗС (переход  $t_{18}$ ) происходит в момент времени 12 мкс, поэтому ошибки не произошло.



• Рис. 13. Ветка дерева достижимости для случая успешного закрытия соединения  
 • Fig. 13. Reachability tree branch for the case of successful connection closure

Таймер  $T_{\text{cls\_cnf}}$  взводится в момент времени  $T_2 = 8$  мкс (переход  $t_{19}$ ). Это означает, что пакет СЗ должен быть получен до 34 мкс ( $T_2 + T_{\text{cls\_cnf}}$ ). Прием пакета СЗ (переход  $t_{24}$ ) происходит в момент времени 18 мкс, поэтому ошибки не произошло.

Таймер  $T_{\text{disc}}$  взводится в момент времени  $T_3 = 14$  мкс. Это означает, что ведущее устройство должно ожидать до 49 мкс ( $T_3 + T_{\text{disc}}$ ) для перехода в состояние **Соединение установлено – ведущее**. В момент времени 49 мкс переход срабатывает, ошибки не произошло.

## Заключение

В данной статье представлены две модели – модель механизма установки транспортного соединения и модель механизма закрытия транспортного соединения.

Важным элементом данных механизмов являются таймеры. Для моделирования таймеров ис-

пользовались временные сети Петри с жестким временем. Этот подкласс сетей Петри позволил смоделировать взведение и истечение различных таймеров, а также реализовать проверку актуальности принятых пакетов. Также для проверки возможности срабатывания определенных таймеров использовались ингибиторные дуги.

В построенных моделях используются различные входные параметры – значения таймеров и задержек. Благодаря этому есть возможность проверять различные сценарии работы. Построение дерева достижимости позволяет получить все возможные варианты работы механизмов при конкретных заданных параметрах. Приведены примеры сценариев работы механизмов в виде отдельных ветвей деревьев достижимости.

Представленные модели могут быть использованы для анализа, верификации и тестирования реализаций механизмов открытия и закрытия транспортных соединений. На их основе также могут быть построены модели для других механизмов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка, анализ и проектирование транспортного протокола СТП-ИСС для бортовых космических сетей SpaceWire / Ю. Е. Шейнин [и др.] // Исследования наукограда. 2016. № 1-2. С. 21–30.
2. SpaceWire Standard. ECSS-E-ST-50-12C. Space engineering SpaceWire – links, nodes, routers and networks. 2008. 137 p.
3. Оленев В. Л. Моделирование систем: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2015. 95 с.
4. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.

## REFERENCES

1. Sheynin Yu. E., Olenov V. L., Lavrovskaya I. Y., Dymov D. V., Kochura S. G. Development, analysis and design of the STP-ISS transport protocol for SpaceWire onboard space networks. Issledovaniya naukograda = Science city research. 2016;(1-2):21–30. (In Russ.).
2. SpaceWire Standard. ECSS-E-ST-50-12C. Space engineering SpaceWire – links, nodes, routers and networks. 2008. 137 p.
3. Olenov V. L. Modeling of the systems: study guide. SPb.: SUAI; 2015. 95 p. (In Russ.).
4. Kotov V. E. Petri nets. Moscow: Nauka; 1984. 160 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Чумакова Надежда Юрьевна**, старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование, бортовые вычислительные сети, коммуникационные протоколы.

**Chumakova Nadezhda Yu.**, Senior Lecturer at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling, on-board networks, communication protocols.

**Мамонтова Анна Алексеевна**, магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование, бортовые вычислительные сети, коммуникационные протоколы.

Поступила в редакцию 29.09.2024

Поступила после рецензирования 03.10.2024

Принята к публикации 10.10.2024

**Mamontova Anna A.**, Master's Student at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling, on-board networks, communication protocols.

Received 29.09.2024

Revised 03.10.2024

Accepted 10.10.2024