

## Применение сетей Петри для исследования сетевых систем управления

© С. Юнесс, Е.С. Лобусов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Использование коммуникационных сетей в системах управления предоставляет возможность передачи информации, удаленного управления различными объектами, модификаций и обслуживания. Промежуток времени между считыванием измерений с датчика и отправлением управляющего сигнала на исполнительный механизм зависит от характеристик сети (топологии и схем маршрутизации), и эта временная задержка может сильно повлиять на общую производительность сети. Задержки, искажения и потеря передаваемых данных не только ухудшают производительность сетевой системы управления (ССУ), но и дестабилизируют ее. В связи с этим рассмотрено применение сетей Петри в качестве метода моделирования ССУ на примере проектирования системы управления активной подвеской автомобиля. Были сопоставлены сети с топологией типа «звезда» и «общая шина», в результате чего выявлено, что ССУ с топологией «общая шина» функционируют на 40 % быстрее по сравнению с сетевыми системами, имеющими топологию «звезда».*

**Ключевые слова:** сетевая система управления, сети Петри, активная подвеска автомобиля

**Введение.** Распределенная топология датчиков и приводов, а также возможность обеспечивать связь между объектами, расположенными далеко друг от друга, сделали коммуникационные сети неотъемлемой частью систем управления.

Включение коммуникационной сети в состав системы управления усложняет проектирование ССУ, требует других методов разработки, анализа и моделирования с учетом процессов дискретизации. Такая интеграция вызывает появление дополнительных временных задержек в контурах управления и повышает вероятность потери пакетов данных. В зависимости от ситуации временные задержки могут привести к серьезному снижению производительности системы.

Существуют различные методы анализа сетевых систем управления, наиболее известными и распространенными из них являются сети Петри. Они во многих работах рассматриваются с целью их использования для моделирования протоколов сетей связи. Но поскольку моделированию всей сетевой системы не уделяется должного внимания, в настоящей статье будет проанализировано применение сетей Петри для моделирования ССУ активной подвески колесной машины.

Цель статьи — показать, что сети Петри являются подходящим математическим методом моделирования системы управления с сетевым соединением ее частей.

**Сетевая система управления.** Система управления, в которой контур управления замкнут через коммуникационную сеть, — сетевая система управления. Особенность ССУ заключается в том, что обмен информацией между ее компонентами осуществляется посредством передачи пакетов данных через сеть [1].

На рис. 1. показаны четыре основных элемента ССУ: датчики для получения информации, контроллеры для формирования закона управления и соответствующих команд управления, приводы для выполнения управляющих команд, коммуникационная сеть, обеспечивающая обмен информацией.



Рис. 1. Сетевая система управления

Наиболее важная особенность ССУ состоит в том, что она соединяет киберпространство с физическим пространством, благодаря чему можно дистанционно выполнять несколько различных задач. Кроме того, ССУ не требуют использования кабельных соединений, что снижает сложность и общую стоимость проектирования систем управления и их последующего внедрения в производство. В ряде случаев эти функциональные и экономические преимущества становятся решающим фактором, определяющим выбор в пользу ССУ. Кроме того, ССУ легко модифицировать и модернизировать, не внося существенных изменений в структуру систем, а просто добавляя к ним датчики, исполнительные механизмы и контроллеры, имеющие относительно низкую стоимость. ССУ охватывают широкий спектр отраслей потенциального применения: космическая и наземная разведка, автоматизация производства, дистанционная диагностика и поиск неисправностей, робототехника, системы управления летательными аппаратами и автомобилями [2]. Однако при использовании этих ССУ, обладающих многочисленными преимуществами, возникают и различные проблемы, требующие решения: создание новых методов управления, различных видов исполнительных механизмов, обеспечение надежности и безопасности связи, повышение пропускной способности, разработка протоколов передачи данных и

соответствующих им диагностических и отказоустойчивых стратегий управления, сбор данных в режиме реального времени и эффективная обработка информации, поступающей с датчиков.

Для соединения регулятора, датчиков и исполнительных механизмов с целью передачи данных между различными частями ССУ используются коммуникационные сети следующих типов:

- промышленные, например, CAN (англ. Controller Area Network — спецификация промышленной сети для автоматизации транспорта и машиностроения), LAN (Local Area Network — сетевая платформа для автоматизации различных процессов и функций зданий) и др.;
- IP / Ethernet;
- беспроводные сети и беспроводные протоколы связи (Bluetooth, ZigBee, Z-Wave). Для данного типа коммуникационных сетей часто применяется термин *беспроводная сетевая система управления*.

**Сети Петри.** Математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем — это сети Петри [3], которые представляют собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов — позиций и переходов, соединенных между собой дугами (рис. 2). Вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети.

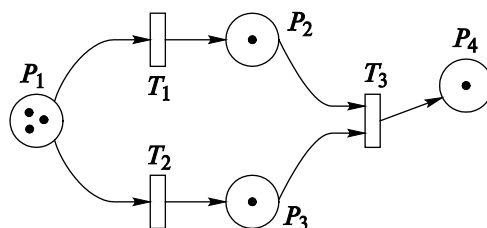


Рис. 2. Сети Петри

Сети Петри представляют собой совокупность множеств  $S = \{P, T, I, O, M_0\}$ , где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, P_n\}$  — конечное множество, его элементы называются позициями,  $i = 1, n > 0$ ;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_j, T_m\}$  — конечное множество, элементы которого называются переходами,  $j = 1, m > 0$ ;  $P \cap T = \emptyset$ ;  $I$  — множество входных функций,  $I : T \rightarrow P$ ;  $O$  — множество выходных функций,  $O : T \rightarrow P$ ;  $M_0$  — первоначальная маркировка.

Моделирование в сетях Петри осуществляется на событийном уровне. Определяются действия, происходящие в системе, состояние, предшествовавшее этим действиям, и какое состояние примет система после выполнения определенного действия. Выполнение событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ

результатов выполнения позволяет судить о том, в каких состояниях находилась или не находилась система, а какие состояния в принципе не могут быть достигнуты [4, 5].

Сети Петри можно считать эффективным методом анализа и моделирования систем управления благодаря следующим преимуществам [6, 7]:

1) простота моделирования таких характеристик сложной системы, как параллелизм, асинхронизм и синхронизм, возникающие конфликты, взаимные исключения, системные блокировки, легкость процедуры назначения приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом;

2) возможность генерировать контрольный управляющий код непосредственно из графического представления сетей Петри;

3) проверка системы на взаимоблокировки, переполнение емкости и другие свойства;

4) получение информации о состоянии системы, которая позволяет осуществлять контроль, мониторинг и восстановление системы в режиме реального времени;

5) проведение планирования, поскольку сетевая модель Петри позволяет назначать приоритеты передаваемым по сети пакетам данных, а также накладывать ограничения на выполнение дискретных событий;

6) использование графической моделью малочисленных, но в то же время эффективных примитивов, что значительно упрощает ее понимание.

Сети Петри, как и многие модели, могут быть дополнены необходимым функционалом для повышения мощности моделирования. Они бывают следующих видов: расширенные; временные и стохастические; высокоуровневые и цветные [8].

Таблица 1

Сети Петри и IDEF

Критерий	Сети Петри	IDEF
Простота	Довольно простые даже для сложных моделей	Очень простые, но не для очень сложных моделей
Полномочия представительства	Очень широкие	Не очень широкие
Иерархическая структура	Вероятная	Вероятная
Формализм	Существует сильный формализм)	Не существует или существует очень мало (разработка)
Стандартизация	Стандартизация отсутствует	Используется существующая, много версий
Программное обеспечение	Многочисленное	Многочисленное

Для сравнения сети Петри и IDEF (*англ.* Integrated DEFinition — методология семейства для решения задач моделирования сложных систем, позволяющая отображать и анализировать модели деятельности широкого спектра сложных систем в различных разрезах) по шести критериям они представлены в табл. 1.

**Активная подвеска автомобиля.** Подсистема подвеса — одна из самых важных в автомобиле: действует как некоторая связь между экипажем и дорогой. У нее две основные функции [9]:

- изолировать экипаж от воздействия дороги;
- поддерживать тесный контакт между дорогой и автошинами.

Автомобильные подвески обычно классифицируются как пассивные, полуактивные (адаптивные) и активные.

В пассивной подвеске параметры пружины и амортизатора определяют динамическое поведение автомобиля. Полуактивная подвеска использует демпфер с переменными параметрами, в то время как активная (рис. 3) в дополнение к пассивным элементам имеет приводы. Эти приводы создают вспомогательную силу, которая помогает изолировать кузов автомобиля от воздействий, вызванных дефектами дорожного покрытия.

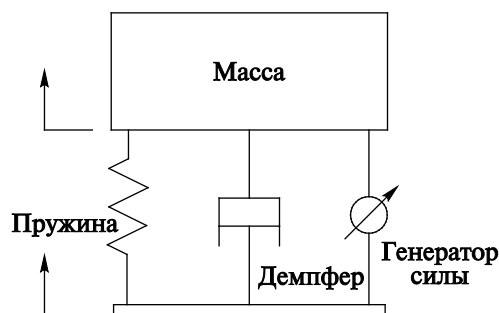


Рис. 3. Активная подвеска

Система управления активной подвеской — один из примеров сетевой системы управления, в которой множество входных и выходных сигналов должны передаваться по сети центральному контроллеру для контроля выполняемых действий и управления подвеской. Смоделированная система управления активной подвеской [10], состоящей из пружин, амортизаторов и силовых приводов, приведена на рис. 4.

В этой модели кузов автомобиля (или поддрессоренная масса) может свободно перемещаться вдоль оси  $Z$ , вращаться вокруг оси  $Y$  (угол тангажа  $\varphi$ ) и оси  $X$  (угол крена  $\theta$ ). Подвеска соединяет поддрессоренную массу с четырьмя неподдрессоренными массами (передние левые, передние правые, задние левые и задние правые колеса), которые могут свободно перемещаться относительно поддрессоренной массы в вертикальном направлении.

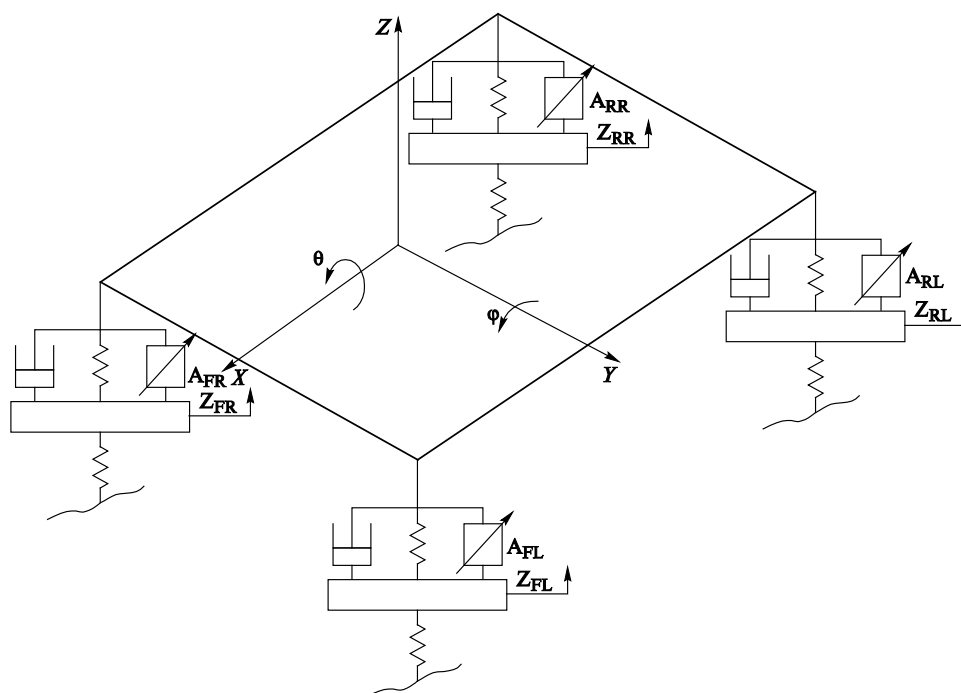


Рис. 4. Модель активной подвески

**Моделирование сетевой активной подвески с использованием сетей Петри. Сеть с топологией типа «звезда» и протоколом «ведущий — ведомый».** На рис. 5 представлена сетевая система управления активной подвеской, реализованная по топологии сети типа «звезда».

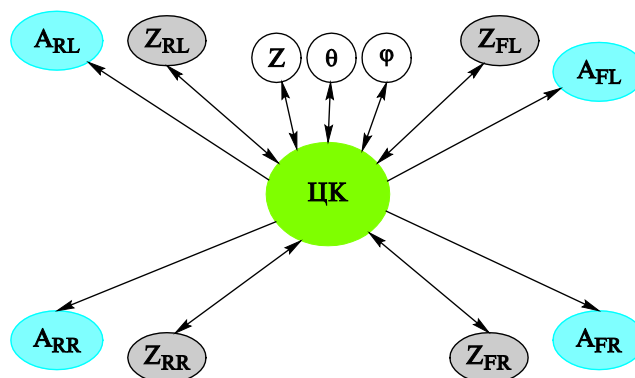


Рис. 5. Сетевая система управления активной подвеской по топологии «звезда»:

● — датчики; ● — приводы; ЦК — центральный контроллер; FL — передний левый; FR — передний правый; RL — задний левый; RR — задний правый

Данная модель характеризуется следующим:

- сеть имеет топологию типа «звезда» с протоколом «ведущий — ведомый» (англ. master / slave);
- модель состоит из семи датчиков, четырех исполнительных механизмов и центрального контроллера;
- две позиции (передатчик и приемник) моделируют каждый датчик; центральный контроллер смоделирован с помощью четырех позиций (передатчика, приемника, аккумулятора и вычислителя), каждый силовой привод смоделирован лишь одной позицией, так как он является только принимающим устройством.

На рис. 6 показана схема процесса моделирования системы на основе сетей Петри. Значения аббревиатур и сокращений для рис. 6 представлены в табл. 2.

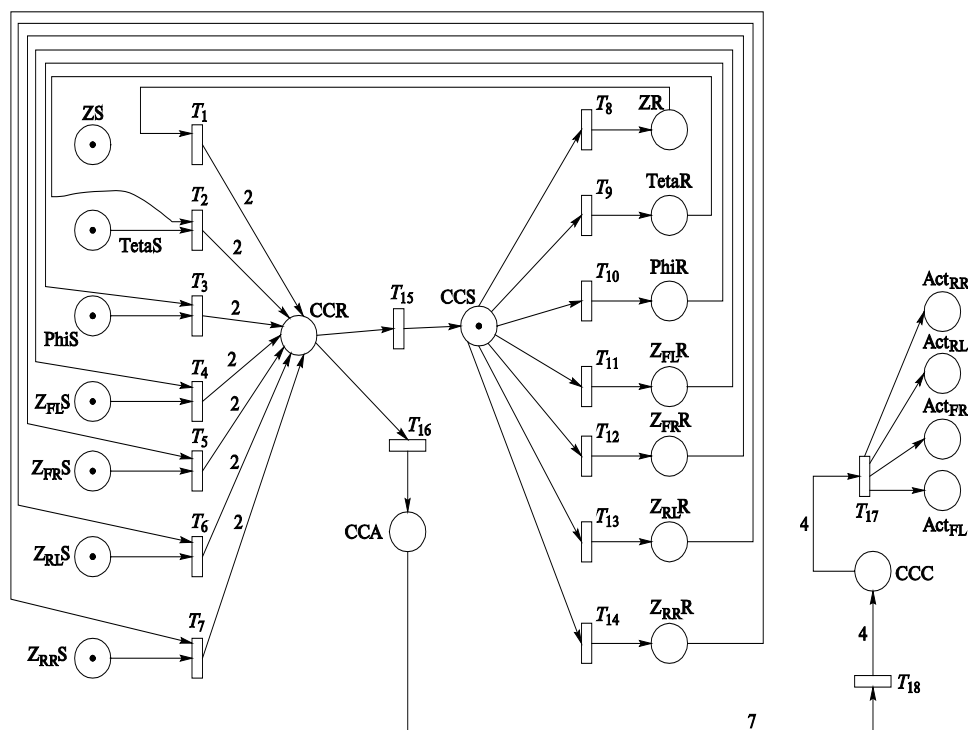


Рис. 6. Модель сетей Петри для системы с топологией типа «звезда»

## Наименования позиций и их значения

Наименование позиции	Значение	Наименование позиции	Значение
ZR	Приемник датчика Z	ZS	Передачик данных, снятых с датчика Z
Tetar	Приемник датчика Theta	Tetas	Передачик данных, снятых с датчика Theta
Phir	Приемник датчика Phi	Phis	Передачик данных, снятых с датчика Phi
Z <sub>FL</sub> R	Приемник датчика Z <sub>FL</sub>	Z <sub>FL</sub> S	Передачик данных, снятых с датчика Z <sub>FL</sub>
Z <sub>FR</sub> R	Приемник датчика Z <sub>FR</sub>	Z <sub>FR</sub> S	Передачик данных, снятых с датчика Z <sub>FR</sub>
Z <sub>RL</sub> R	Приемник датчика Z <sub>RL</sub>	Z <sub>RL</sub> S	Передачик данных, снятых с датчика Z <sub>RL</sub>
Z <sub>RR</sub> R	Приемник датчика Z <sub>RR</sub>	Z <sub>RR</sub> S	Передачик данных, снятых с датчика Z <sub>RR</sub>
CCR	Приемник центрального контроллера	CCS	Передачик центрального контроллера
CCA	Регистр центрального контроллера	CCC	Вычислитель центрального контроллера
Act <sub>FL</sub>	Гидравлический привод на передней левой стороне автомобиля	Act <sub>RL</sub>	Гидравлический привод на задней левой стороне автомобиля
Act <sub>FR</sub>	Гидравлический привод на передней правой стороне автомобиля	Act <sub>RR</sub>	Гидравлический привод на задней правой стороне автомобиля

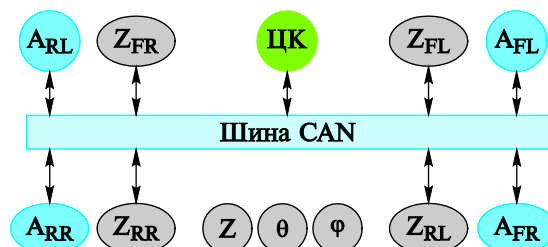
Последовательность действий, осуществляемых элементами сети, следующая:

- 1) CCS направляет запрос ZR для передачи информации с датчика Z;
- 2) ZR получает запрос; информация с датчика Z будет передана с ZS на CCR;
- 3) после получения информации CCR отправляет ее CCA и передает CCS, что информация была получена;
- 4) CCS отправляет запрос на получение информации с другого датчика, например с Theta, и т. д.;
- 5) после завершения процесса передачи информации в CCA всеми датчиками, CCA отправляет данные CCC для формирования команды каждому приводу;
- 6) CCC должен сформировать четыре команды: по одной для каждого привода, а когда результаты будут получены, должен одну за другой направить команды приводам.



**Сеть с топологией типа «общая шина» и протоколом CAN.**

Структура сети, построенной по топологии типа «общая шина» с протоколом CAN последовательной передачи данных, приведена на рис. 7.



**Рис. 7.** Структура сети, построенной по топологии «общая шина», для сетевой активной подвески:

● — датчики; ● — приводы; ЦК — центральный контроллер; FL — передний левый; FR — передний правый; RL — задний левый; RR — задний правый

Отметим наиболее важные свойства протокола CAN.

1. Нет «ведущего», узел с более высоким приоритетом имеет право использовать общую шину и отправлять данные, когда шина свободна. Каждый узел постоянно «просматривает» шину, принимая, и обрабатывая только предназначенные именно для него сообщения.

2. Если доступ к шине требуется сразу нескольким узлам, то сначала будет передано сообщение с наиболее высоким приоритетом.

3. Каждый из узлов перед передачей сообщения проверяет, работает ли узел с более высоким приоритетом.

4. Если работает узел с более высоким приоритетом, то он возвращается в состояние приемника и пытается передать сообщение в другое время. Это свойство имеет особое значение при использовании в системах управления реального времени, поскольку значение приоритета жестко определяет время ожидания.

Схема процесса моделирования системы на основе сетей Петри показана на рис. 8. Такая модель состоит из семи датчиков и четырех приводов, каждый из которых моделируется одной позицией (см. рис. 8). Две позиции — регистр ССА и вычислитель ССС — моделируют центральный контроллер. Шина смоделирована двумя позициями: шина CAN (см. рис. 8, CAN BUS) и свободная шина (см. рис. 8, BUS Free). Приоритетность будет выполняться с помощью пяти позиций:

PS<sub>1</sub>, PS<sub>2</sub>, PS<sub>3</sub>, PS<sub>4</sub> и PSN.

Приоритетность узлов при передаче сообщений будет определяться следующим образом:

$$Z^1, \text{Theta}^2, \text{Phi}^3, ZFL^4, ZFR^5, ZRL^6, ZRR^7, CCC^8,$$

где 1–8 — приоритетность для каждого узла сети.

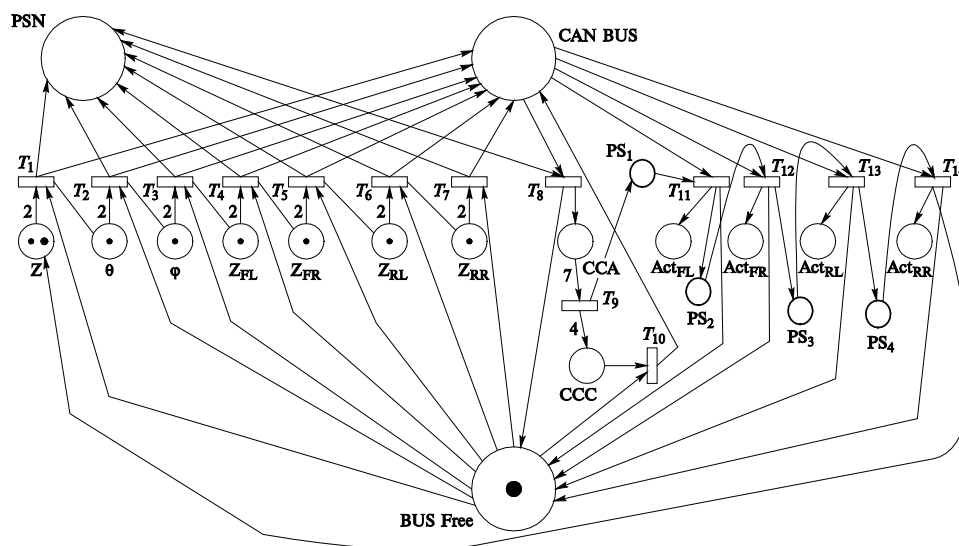


Рис. 8. Модель сети Петри для топологии сети «общая шина»

Последовательность действий, осуществляемых элементами сети, следующая:

1) датчик Z отправляет данные на шину, где все узлы имеют доступ к получаемым сообщениям. На этом этапе данные предназначены только для узла: ССА, который получает информацию с датчиков, и Theta, потому что теперь он имеет наиболее высокий приоритет для отправки сообщения при условии, что шина свободна. Процесс продолжается до тех пор, пока все датчики не отправят свои данные;

2) когда все семь сообщений от семи датчиков будут получены ССА, регистр центрального контроллера отправит их ССС, который должен сформировать четыре команды для четырех исполнительных механизмов и отправить их приводам одну за другой по шине;

3) датчик Z сможет отправить новую информацию и начать следующий цикл передачи данных.

Авторы настоящей статьи считают, что, во-первых, использование сетей Петри для моделирования ССУ позволяет более детально рассмотреть различные топологии и протоколы сети, в то время как другие методы моделирования касаются только задержек в передаче

данных по сети. Во-вторых, в приведенном примере каждый узел топологии типа «звезда» ожидает от главного узла запроса на отправку сообщения, и значит, число сообщений составит  $7 \cdot 2 + 4 = 18$ . Но при использовании топологии типа «общая шина» с протоколом передачи данных CAN отсутствует главный узел, и, следовательно, число сообщений составит  $7 \cdot 2 + 4 = 11$ . Таким образом, использование топологии типа «общая шина» позволяет ускорить процесс передачи данных на 40 %.

**Заключение.** В настоящей статье были рассмотрены основные определения и некоторые свойства сетей Петри и сетевых систем управления, приведена модель системы управления активной подвеской, спроектированная на базе сетей Петри, более подробно описан принцип работы системы при двух различных топологиях сети. Проведенные исследования показали, что сети Петри как метод моделирования позволяют проанализировать поведение передачи связи сети в системе управления. Результаты, полученные при моделировании, свидетельствуют о том, что для системы управления активной подвеской топология типа «общая шина» предпочтительнее типа «звезда», так как обеспечивает на 40 % более быструю передачу информации по сети.

В последующем сети Петри будут использоваться для моделирования централизованной и децентрализованной сетевой системы управления с целью установления различий между этими двумя методами и определения их влияния на систему управления.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alur R., Arzen K.E., Henzinger.T.A. *Handbook of networked and embedded control systems*. Springer Science & Business Media, 2007, vol. 1, pp. 200–210.
- [2] Reif K., Schmidt K., Gesele F., Reichelt S. Networked control systems in motor vehicles. *ATZ elektronik worldwide*, 2008, vol. 3 (4), pp. 18–23.  
DOI: 10.1007/BF03242181
- [3] Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Switched ethernet response time evaluation via colored petri net model. *International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling*, IEEE, Alexandria, Egypt, August 28, 2006, pp. 68–77.
- [4] Bago P.N., Marijan S. Modeling Bus Communication Protocols Using Timed Colored Petri Nets — The Controller Area Network Example. *Ninth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools*. Elektrotehnika, Temeljne tehničke znanosti, Aarhus, Denmark, October 20–22, 2008, pp. 103–121.
- [5] Seatzu C., Giua A. A systems theory view of Petri nets. *Advances in control theory and applications*. Springer, 2007, pp. 99–127.  
DOI: 10.1007/978-3-540-70701-1\_6
- [6] Marsal G., Denis B., Faure J.M., Frey G. Evaluation of response time in Ethernet-based automation systems. *Eleventh IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'06)*. Prague, September 20–22, 2006, pp. 380–387.

- [7] Zhou J.Qx. *Petri net modeling and performance analysis of can fieldbus. Doctoral dissertation*. New Jersey Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, 1998, pp. 72–81.
- [8] Hu H., Cui R., Wei X., VHDL implementation of CAN fieldbus modeling based on Petri nets. *Electronic Measurement & Instruments. Ninth International Conference, IEEE (ICEMI'09)*. Beijing, China, 2009, August 16–19, vol. 1, pp. 1070–1073.
- [9] Gaid M. B., Cela A., Hamam Y. Optimal integrated control and scheduling of systems with communication constraints. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2005, pp. 854–859.
- [10] Ikenaga S., Lewis F.L, Davis L. Active suspension control of ground vehicle based on a full-vehicle model. *American Control Conference, IEEE*, Chicago, Illinois, USA, 2000, June 28–30, vol. 6, pp. 4019–4024.

Статья поступила в редакцию 18.02.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Юнесс С., Лобусов Е.С. Применение сетей Петри для исследования сетевых систем управления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1885>

**Юнесс Сарем** — аспирант второго курса кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: saremfy82@yahoo.com

**Лобусов Евгений Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: evgeny.lobusov@yandex.ru

## The use of Petri nets in the study of networked control systems

© S. Yuness, E.S. Lobousov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The use of communication networks in control systems has several important advantages, such as the ability of information transfer and remote control of various objects, the possibility of modifications and maintenance. On the other hand, the time between reading measurements from the sensor and sending a control signal to the actuator depends on the network characteristics (topology and routing scheme), and such a time delay can greatly affect the overall network performance. Delays, distortions and loss of transmitted data not only degrade the performance of the network management system, but also destabilize it. The paper considers the use of Petri nets as a method for modeling networked control systems (NCS) on the example of designing an active suspension control system for a car. When modeling, the star and common bus topologies were used, the comparison of which revealed that control systems with the common bus topology function 40% faster than systems with the star topology.*

**Keywords:** networked control system, Petri nets, active suspension

### REFERENCES

- [1] Alur R., Arzen K.E., Henzinger.T.A. *Handbook of networked and embedded control systems*. Springer Science & Business Media, 2007, vol. 1, pp. 200–210.
- [2] Reif K., Schmidt K., Gesele F., Reichelt S. Networked control systems in motor vehicles. *ATZ elektronik worldwide*, 2008, vol. 3 (4), pp. 18–23.  
DOI: 10.1007/BF03242181
- [3] Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Switched ethernet response time evaluation via colored petri net model. *International Middle Eastern Multiconference on Simulation and Modelling*, IEEE, Alexandria, Egypt, August 28, 2006, pp. 68–77.
- [4] Bago P.N., Marijan S. Modeling Bus Communication Protocols Using Timed Colored Petri Nets — The Controller Area Network Example. *Ninth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools*. Elektrotehnika, Temeljne tehničke znanosti, Aarhus, Denmark, October 20–22, 2008, pp. 103–121.
- [5] Seatzu C., Giua A. A systems theory view of Petri nets. *Advances in control theory and applications*. Springer, 2007, pp. 99–127.  
DOI: 10.1007/978-3-540-70701-1\_6
- [6] Marsal G., Denis B., Faure J.M., Frey G. Evaluation of response time in Ethernet-based automation systems. *Eleventh IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'06)*. Prague, September 20–22, 2006, pp. 380–387.
- [7] Zhou J.Qx. *Petri net modeling and performance analysis of can fieldbus*. Doctoral dissertation. New Jersey Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, 1998, pp. 72–81.
- [8] Hu H., Cui R., Wei X., VHDL implementation of CAN fieldbus modeling based on Petri nets. *Electronic Measurement & Instruments. Ninth International Conference, IEEE (ICEMI'09)*. Beijing, China, 2009, August 16–19, vol. 1, pp. 1070–1073.

- [9] Gaid M. B., Cela A., Hamam Y. Optimal integrated control and scheduling of systems with communication constraints. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2005, pp. 854–859.
- [10] Ikenaga S., Lewis F.L, Davis L. Active suspension control of ground vehicle based on a full-vehicle model. *American Control Conference, IEEE*, Chicago, Illinois, USA, 2000, June 28–30, vol. 6, pp. 4019–4024.

**Yunes S.**, post-graduate student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: saremfy82@yahoo.com

**Lobousov E.S.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: evgeny.lobusov@yandex.ru