

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ НА СЕТЯХ ПЕТРИ
ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ РОБОТЕХНИЧЕСКИХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Волхонская Елизавета Евгеньевна

аспирант

Орлов Сергей Павлович

д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»

Аннотация: В статье описывается цифровой двойник робототехнического автомобиля на базе КАМАЗ для виртуальных испытаний на этапе виртуального ввода в эксплуатацию. Цифровой двойник реализован в виде комплекса имитационных моделей на временных раскрашенных сетях Петри. Приведена структура модели на сети Петри, описывающая процесс эксплуатации автомобиля и позволяющая задавать различные вероятностные законы событий отказов и запросов на техническое обслуживание.

Ключевые слова: сети Петри, имитационное моделирование, цифровые двойники, виртуальные испытания.

**DIGITAL TWINS ON PETRI NETS FOR VIRTUAL
TESTING OF ROBOTIC VEHICLES**

Volkhonskaia Elizaveta Evgenevna

Orlov Sergey Pavlovich

Abstract: The article describes a digital twin of a KAMAZ-based robotic vehicle for virtual testing at the stage of virtual commissioning. The digital twin is based on a set of simulation models on timed colored Petri nets. The structure of the model on the Petri net describing the process of car operation is given which describes the process of car operation and allows you to set various probabilistic laws of failure events and maintenance requests.

Key words: Petri nets, simulation, digital twins, virtual tests.

Введение. Важность развития высокотехнологичной промышленности связана с использованием большого объема данных, повышения экономической эффективности и производительности труда. Поэтому в рамках концепции «Индустрия 4.0» необходимо создание цифровой промышленности на основе трех основных факторов [1, с. 3]:

- разработка и применение цифровых платформ;
- разработка и применение цифровых двойников;
- переход к киберфизическим системам.

Таким образом, для дальнейшего развития промышленного транспорта необходим переход к беспилотным, роботизированным изделиям, которые позволяют ограничить негативное влияние человеческого фактора, а также рассматривать поведение реальных объектов до их непосредственного ввода в эксплуатацию. Уже на этапе проектирования возможно исключение ограничений технологических процессов и учет особенностей процесса производства объектов.

Цифровые двойники для любого сложного технического объекта базируются на математических моделях высокого уровня с требуемыми статистическими данными, позволяющими анализировать критические ситуации, помогать стабилизировать киберфизическую систему и анализировать ее состояние с помощью измерительной подсистемы.

Обращаясь к структуре цифрового двойника роботизированного транспортного средства, можно рассматривать его как виртуальное представление в виде системы данных, моделей и программных систем численного моделирования [2, с. 47]. В этом случае инструменты системы численного моделирования изначально должны обеспечивать производственную технологичность, возможность проведения осмотров и длительную эксплуатацию. Полученный таким образом цифровой двойник позволяет детально спрогнозировать дальнейшее поведение объекта при эксплуатации и использовать его с максимальной пользой.

Сегодня цифровые двойники повсеместно применяются для различных сфер производства. Компании, связанные с сельскохозяйственной промышленностью, также заинтересованы в создании цифровых двойников для своих нужд, что позволяет более точно моделировать поведение роботизированных транспортных средств (РТС) и анализировать возникающие отказы системы.

Для создания цифрового двойника РТС необходимы:

- а) базовая модель для описания устройства роботизированного транспортного средства и принципов его функционирования,
- б) база данных параметров РТС, измеренных в различные периоды времени,
- в) аналитический блок, который дополняет модель статистическими данными на основе искусственного интеллекта или машинного обучения для оценки и прогнозирования технического состояния объекта.

На сегодняшний день роботизированные транспортные средства способны образовывать полностью автоматическую транспортную систему с оптимизированной системой построения маршрутов, конфигурацией компоновки системы, управление трафиком. В связи с ростом сложности операционной среды РТС, все более важными становятся вопросы надежности, доступности и технического обслуживания.

Для снижения вероятности возникновения аварий, поддержания работоспособности и требуемых функций системы необходимо выработать определенные стратегии технического обслуживания, такие как корректирующее и профилактическое техническое обслуживание. Цифровые двойники РТС удобно использовать для более точного срока прогнозирования срока полезного использования роботизированного транспортного средства. В данном случае цифровой двойник способен хранить информацию о своем физическом аналоге на протяжении всего жизненного цикла и использовать эту информацию для прогнозной аналитики с целью сокращения времени незапланированных простоев транспортных средств.

В докладе рассматривается использование цифрового двойника роботизированного транспортного средства РТС, которое направлено на имитацию процесса эксплуатации автомобиля сельскохозяйственного назначения в различных полевых условиях для предсказаний технического обслуживания РТС и появления отказов. Сеть Петри обеспечивает эффективный инструмент для достижения этой цели, поскольку позволяет анализировать статистику возникновения и режимы отказов подсистем роботизированных транспортных средств, а также анализировать стратегии развития [3, с. 100].

Имитационная модель РТС на раскрашенных временных сетях Петри. Аналитический обзор, выполненный в работе [4, с. 28], показал, что в настоящее время многие исследователи обращаются к моделям на сетях Петри

для имитации процессов технического обслуживания и ремонта сложных объектов. Используются различные модификации сетей Петри, при этом наиболее эффективными являются временные раскрашенные сети Петри TCPN (Timed Colored Petri Nets).

Формальное определение раскрашенной временной сети Петри CPN [5, с. 87]:

$$\text{CPN} = (\text{P}, \text{T}, \text{A}, \text{C}, \text{V}, \text{S}, \text{G}, \text{E}, \text{I}), \quad (1)$$

где: P - конечное множество позиций, T - конечное множество переходов, $\text{A} \subseteq \text{P} \times \text{T} \cup \text{T} \times \text{P}$ - множество направленных дуг, C – конечное непустое множество цветов, V - конечное множество типов переменных, таких что $\text{Type}[v] \in \text{C}$ для всех $v \in \text{V}$, S: $\text{P} \rightarrow \text{C}$ - это функция набора цветов для каждой позиции, G: $\text{T} \rightarrow \text{EXPR}$ – функция условий, которая назначает защиту каждому переходу, так, что $\text{Type}[G(t)] = \text{Bool}$, E: $\text{A} \rightarrow \text{EXPR}$ - функция, которая присваивает каждой дуге некоторое выражение, I: $\text{P} \rightarrow \text{EXPR}$ - это функция инициализации, которая назначает выражение инициализации каждой позиции p, такое что $\text{Type}[I(p)] = \text{C}(p)\text{MS}$.

Временная цветная сеть Петри является расширением сети, описанной выражением (1):

$$\text{TCPN} = (\text{CPN}, \Theta 1, \Theta 2, \Theta 3), \quad (2)$$

где CPN – основная раскрашенная сеть Петри, $\Theta 1$, $\Theta 2$, и $\Theta 3$ - временные задержки, приписанные местам, дугам и переходам сети соответственно.

Параметры цифрового двойника РТС будем описывать кортежем

$$R_n = (I_n, M_n, t_{1n}, t_{2n}, t_{3n}, t_{bn}, t_{an}), n=1, \dots, N, \quad (3)$$

где I_n – идентификационный номер транспортного средства, M_n - модель и модификация РТС, t_{1n} , t_{2n} , t_{3n} – время активной работы, остаточный ресурс и время до очередного технического обслуживания соответственно, t_{bn} - момент начала эксплуатации, t_{an} – время наработки РТС, N – количество РТС в рассматриваемой группе.

Цифровой двойник для виртуальных испытаний РТС представляет собой комплекс имитационных моделей, структура которых показана на рис. 1.

Каждому модулю имитации работы РТС_n соответствует подмножество назначенных производственных операций или задач Z_n. Выполнение задач определяется календарно-сетевым графиком в виде диаграммы Ганта. Каждый РТС рассматривается как восстанавливаемый элемент. Модуль ТО и Р описывает процессы технического обслуживания или ремонта транспортного средства. Модуль «Имитация запросов на ТО» позволяет задавать случайные

законы вероятностей появления событий запросов на техническое обслуживание. Модуль «Имитация отказов» реализует заданные случайные законы возникновения отказов РТС.

Основной имитационный модель РТС выполняет анализ процессов в РТС с учетом запросов на техническое обслуживание и ремонт при появлении отказов. Реализация цифрового двойника с помощью программной системы CPN Tools версия 4.0 [6] приведена на рис. 2.

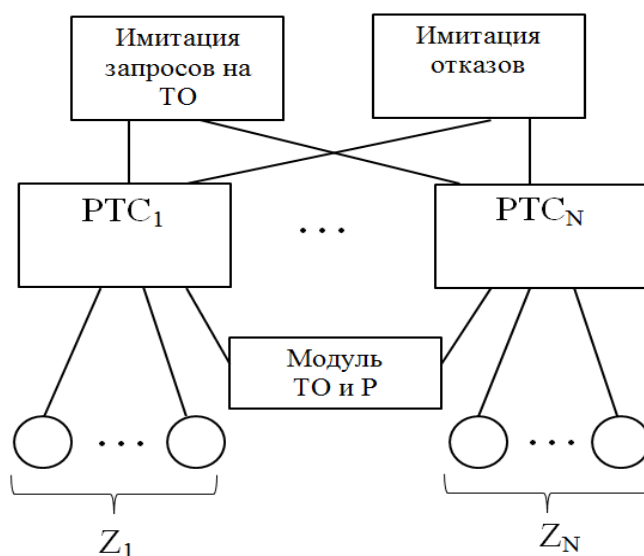
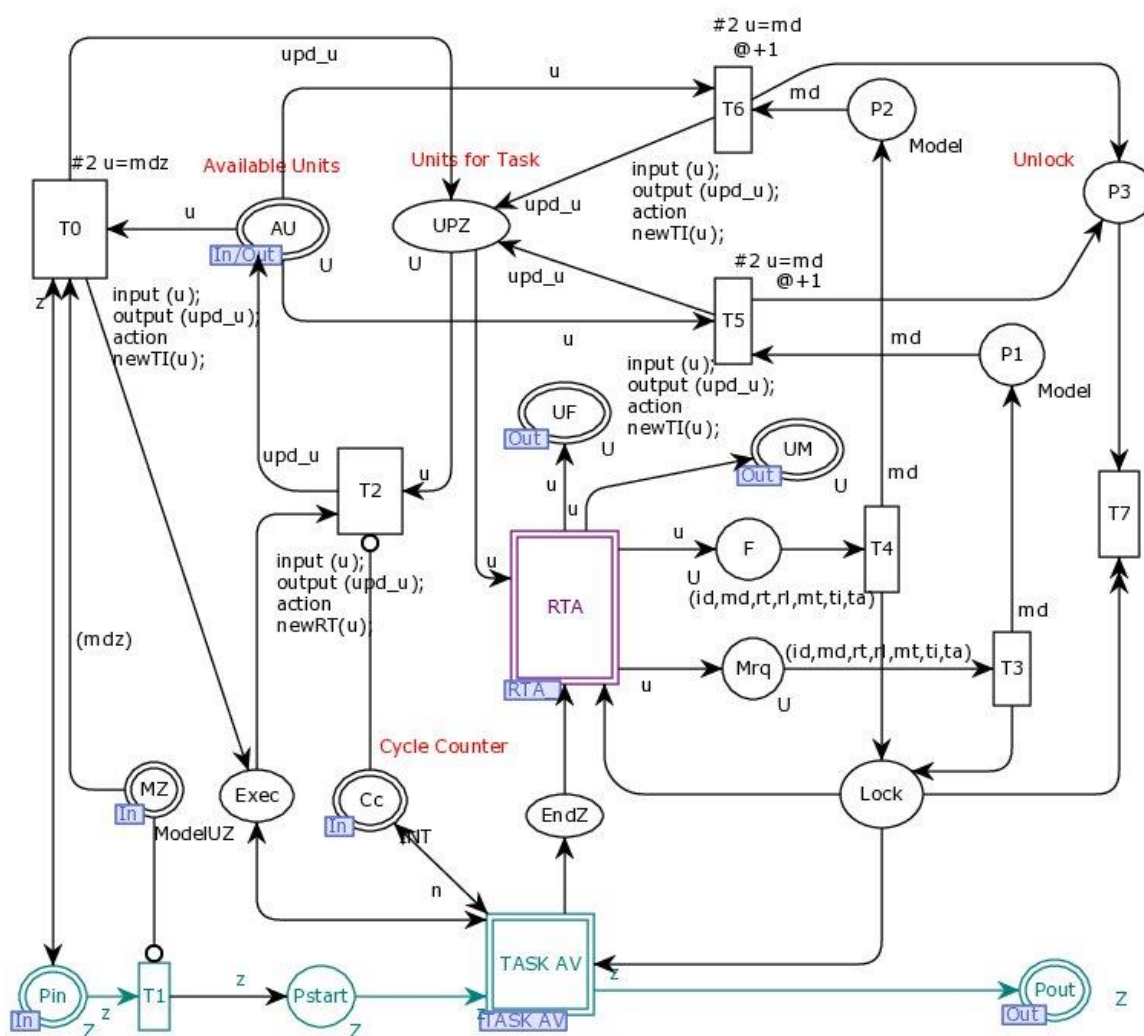


Рис 1. Структура имитационных моделей для виртуальных испытаний при виртуальной эксплуатации

Мультимножество цветов в раскрашенной сети Петри описывает параметры каждого РТС в соответствии с выражением (3).

Позиция UPZ соответствует группе работающих РТС. Вложенный переход RTA (Run-Time Analyzer) является временным анализатором РТС и задает моменты перехода на техническое обслуживание или ремонт. Вложенный переход TASK AV описывает последовательность производственных задач. Переходы T0, T1, T2 определяют действия по назначению РТС на задачи. Позиции F, Mrq имитируют отказы и запросы на техническое обслуживание, которые имеют случайный характер и задаются в зависимости от вероятностных характеристик состояний отдельных агрегатов РТС. Переходы T3 и T4 осуществляют перевод РТС из резерва AU в рабочее состояние.

В результате статистических экспериментов, проводимых с помощью комплекса имитационных модулей, определяются параметры, характеризующие надежность РТС: средняя наработка на отказ, дисперсия наработки на отказ, вероятность безотказной работы в заданные моменты времени [7, с. 18]. В сети Петри на рис. 2 могут реализовываться основные законы распределения наработки до отказа: распределение Вейбулла, экспоненциальное распределение, нормальное распределение и др.



**Рис. 2. Сеть Петри для имитации функционирования
робототехнических транспортных средств**

Исходные данные для имитационных экспериментов поступают от цифровых двойников отдельных агрегатов: двигателя, трансмиссии, системы питания, тормозной системы и др. В разработанном цифровом двойнике

эксплуатации РТС возможен анализ поведения при различных сценариях дорожных и климатических условий, учитывающих качество дорожного покрытия, состояние дорожного полотна, наличие осадков в периоде эксплуатации.

Заключение. Разработанные цифровые двойники использовались при проектировании робототехнического автомобиля сельскохозяйственного назначения на базе модифицированной модели КАМАЗ 65119. Виртуальные испытания цифрового двойника позволили определить основные параметры стратегии технического обслуживания группы РТС для работы в полях Самарской области.

Список литературы

1. Sang, G.M., Xu, L., Vrieze, P., Bai, Y., Pan, F. Predictive Maintenance in Industry 4.0//Proc. of the 10th Int. Conf. on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020). – 2020. - Lecce, Italy.
2. Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля//Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2021. - № 1(29). - С. 46-57.
3. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств//Известия СПбГТИ (ТУ). – 2021. - №58(84). – С. 98-104.
4. Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A. Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities' Maintenance Process Evaluation // Applied Sciences. - 2021. – Vol. 11. - Issue 11, 5100. - 28 p.
5. Jensen K., Kristensen M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. – Berlin/Heidelberg: Springer. – 2009. – 382 p.
6. CPN Tools. Modeling with Colored Petri Nets. URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/windows/> (дата обращения 20.08.2022).
7. Балакирев В.С., Большаков А.А. Надежность и диагностика автоматизированных систем. – 2018. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та. - 144 с.

© Е.Е. Волхонская, С.П. Орлов, 2022