

УДК 629.423.24

Устойчивость автоматизированной системы управления техническим состоянием высокоскоростных электропоездов

А. С. Космодамианский¹, И. И. Лакин²

¹ Российский университет транспорта, Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

² Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, Россия, 121205, Москва, Сколково, Большой бульвар, 40

Для цитирования: Космодамианский А. С., Лакин И. И. Устойчивость автоматизированной системы управления техническим состоянием высокоскоростных электропоездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 561–571. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-561-571

Аннотация

В России создается высокоскоростная магистраль (ВСМ) Санкт-Петербург — Москва. Разрабатывается перспективный подвижной состав, от надежной работы которого зависит эффективность высокоскоростных перевозок. Требуется создание современной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), работа которой должна быть оптимизирована путем создания автоматизированной системы управления (АСУ) ТОиР. Недостаток АСУ как системы авторегулирования — риск неустойчивой работы, возникновения автоколебаний. **Цель работы:** решить задачи исключения колебаний АСУ ТОиР. **Методы:** для достижения поставленной цели предлагается использовать имитационное моделирование для подбора параметров системы и исключения возможных неустойчивых режимов работы. В качестве математической основы модели выбраны методы цепей Маркова с дискретным представлением времени, когда в соответствии с графом переходов состояние системы в каждый последующий момент времени полностью определяется ее состоянием в предыдущий момент. Для программной реализации модели выбран аппарат динамического моделирования «Сети Петри», который достаточно точно соответствуют цепям Маркова. Разработанная модель проверки устойчивости АСУ программно реализована на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel. **Результаты:** в качестве примера применения модели в статье рассмотрена система материально-технического снабжения ТОиР. Выявлено, что при некорректном выборе параметров системы возможны автоколебания запаса ремонтного комплекта на складе. Это может привести к дефициту переходного запаса и срывам в работе ТОиР. Показано, что избежать колебаний и дефицита можно за счет подбора параметров АСУ посредством итерационного моделирования — с последовательным изменением параметров системы. **Практическая значимость:** предложенный метод и разработанное программное обеспечение полезны на этапе проектирования АСУ ТОиР и при существенном изменении параметров действующей АСУ ТОиР.

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, электропоезд, надежность, техническое обслуживание и ремонт, устойчивость системы управления, математическое моделирование

Одним из важных направлений повышения качества жизни людей в мире является создание высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ), которые активно развиваются в последние 60 лет [1]. Повышение мобильности

населения — важный фактор производственно-экономического развития регионов и стран в целом. Проекты ВСМ безусловно окупаются и снимают инфраструктурные ограничения регионов, развивают бизнес, туризм и др.

В России создается первая в стране ВСМ Санкт-Петербург — Москва протяженностью 679 км [2]. Электропоезда ВСМ разрабатываются в Инжиниринговом центре железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ) [3], специально созданном ОАО «РЖД» и группой компаний «Синара» с привлечением ученых вузов, НИИ и специалистов смежных предприятий. Сборка составов будет производиться компанией «Уральские локомотивы» в городе Верхняя Пышма (Свердловская область, Екатеринбург). Первая партия электропоездов серии ЭВС360 «Белый кречет» должна состоять из 41 восьми-вагонного состава, достигающего максимальной скорости 400 км/ч [4].

Надежность — одно из главных качеств этого электропоезда [5]. Составы ВСМ должны обладать высокой надежностью [2]: коэффициент технической готовности (КТГ) должен составлять 0,95 и более, с учетом крупных ремонтов — 0,93 и более. Такую надежность невозможно обеспечить без создания современной крупноагрегатной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [6]. Для управления ТОиР обязательно создание автоматизированной системы управления (АСУ ТОиР) [7], которая представляет собой комплексную киберфизическую производственную систему (Cyber Physical Production System). АСУ ТОиР должна использовать

данные АСУ ОАО «РЖД», а также взаимодействовать с бортовой автоматизированной системой технического диагностирования для планирования объема ТОиР и потребных ресурсов с учетом фактического технического состояния оборудования составов [8].

В середине XX века Норберт Винер ввел термин «кибернетика» [9]. Применительно к производственным системам чаще используется термин «автоматизированная система управления» [10]. Направления исследований в кибернетике разнообразны и включают в себя распознавание образов, поддержку принятия решений, разработку математического аппарата управления (алгоритмов) и многое другое. Но главными были и остаются отрицательные обратные связи, определенные Винером как основа управления [9–11] (рис. 1).

Управляющее воздействие Y (блок 3) вырабатывается по заданным алгоритмам $\varphi(\Delta)$. Они определяются спецификой технологических процессов согласно известным математическим методам [11]) путем сравнения Δ (блок 2) задания X (блок 1) с состоянием объекта управления Z (блок 4). Наличие отрицательных обратных связей — главный и обязательный признак АСУ: замкнутые системы позволяют автоматизировать процесс управления.

Современные методические подходы к построению систем управления (в том числе

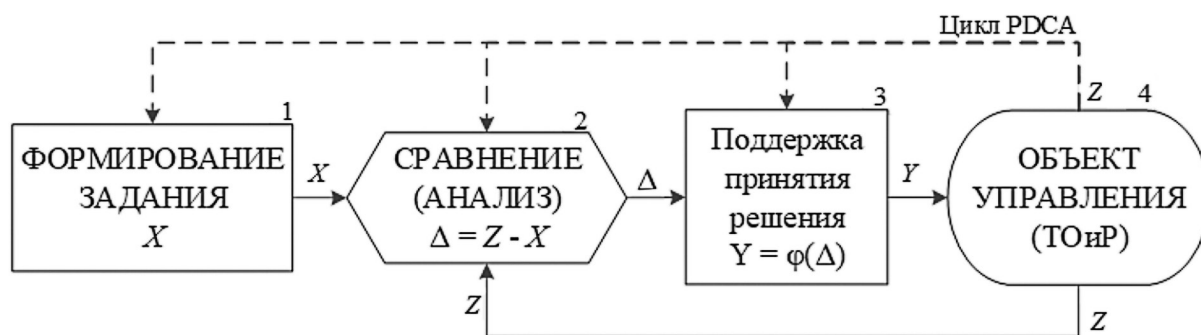


Рис. 1. Общий принцип построения АСУ

систем менеджмента качества и надежности) предполагают использование принципа постоянного улучшения Эдварда Деминга, известного также как цикл PDCA (Plan, Do, Check, Act) [12], суть которого автор образно сформулировал так: «Вы можете не меняться. Выживание не является обязанностью». На рис. 1 цикл PDCA показан пунктиром.

Важная задача АСУ — формирование достоверных исходных данных Δ . При управлении производственными процессами ТОиР сравнение Δ носит сложный характер (блок 2). Главное — это диагностика технического состояния оборудования (блок 4). Задание X (блок 1) — исправное или хотя бы работоспособное состояние состава, Z — фактическое

техническое состояние (блок 4), Y (блок 3) — рассчитанный объем ТОиР с учетом фактического технического состояния.

Автоматизация управления на базе IT-систем работы кадров, отдела труда и заработной платы, склада, финансового управления и отчетности, управления налогами и др. — решенная унифицированная задача [7]. Соответствующие пакеты программ известны как ERP- и MES-системы, реализуемые на покупных программах (SAP R/3, 1C:ERP, «Парус» и др.).

Для задачи создания АСУ предлагается использовать общую структуру управления ТОиР с выраженными обратными связями (рис. 2).

В процессе эксплуатации электроподвижного состава ВСМ (блок 1) формируется

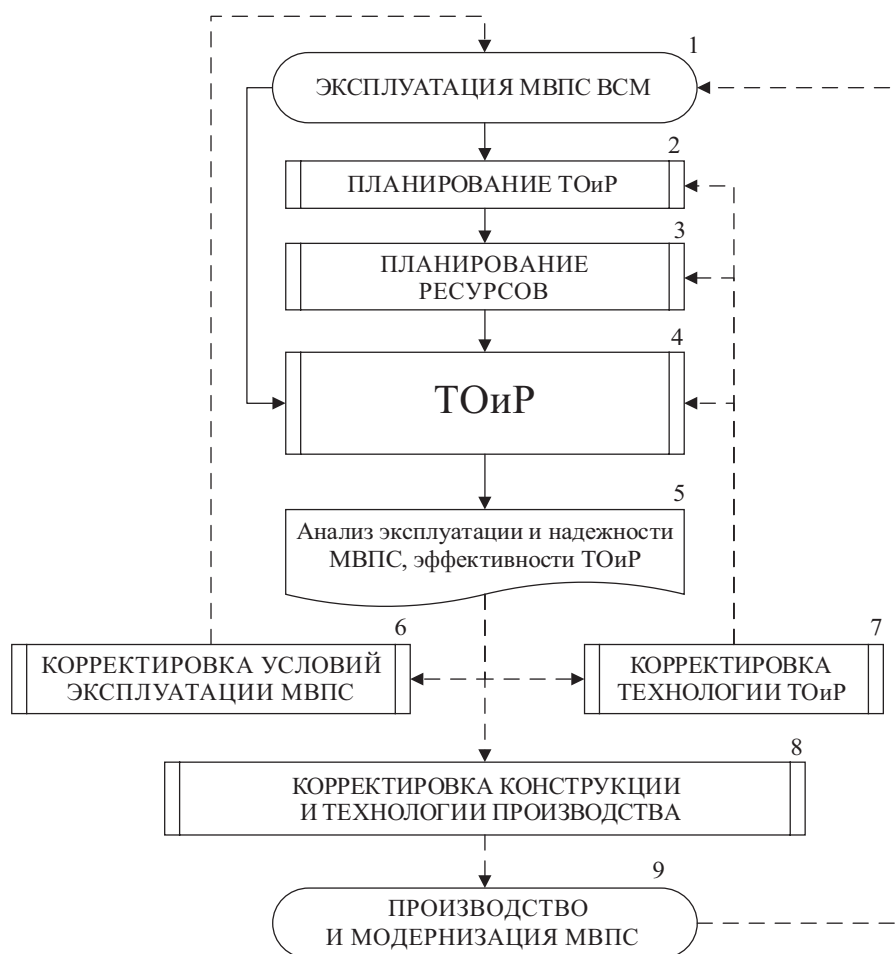


Рис. 2. Структура АСУ ТОиР

диагностическая информация о техническом состоянии оборудования по данным бортовой диагностики. Также получают данные о работе составов: пробег, населенность вагонов, интенсивность эксплуатации, другие эксплуатационные показатели. По этой информации, а также по наличию отказов и заданной периодичности планово-предупредительной системы ТОиР рассчитывается объем ТОиР (блок 2), на основании которого определяются потребные ресурсы ТОиР: трудовые, складские запасы, число ремонтных позиций и др. (блок 3). Затем осуществляется сам ТОиР (блок 4) с использованием АСУ ТОиР. Результаты эксплуатации и ТОиР периодически анализируются (блок 5) для формирования корректирующих мероприятий: изменение условий эксплуатации (блок 6) и технологии ТОиР (блок 7), конструкции составов (блок 8) как при производстве, так и при модернизации эксплуатируемого парка (блок 9).

Для анализа свойств модели АСУ ТОиР по описанному алгоритму авторами разработана имитационная математическая модель и соответствующая программа [13] на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel [14]. Программа позволяет рассматривать свойства АСУ ТОиР в различных режимах работы. В основу модели положены цепи Маркова [15] и сети Петри [16]. Фишками яв-

ляются составы, меняющие статусы согласно графу переходов (рис. 3).

Из любого состояния (статуса) графа можно попасть в другой статус — граф модели неразложим и сильно связан (сократить его нельзя). В любое состояние можно попасть за конечное число шагов по дням D и минутам t . Модель является периодической, так как всегда $\Delta t > 1$. Все статусы графа являются возвратными, так как всегда есть возможность перейти к другим статусам. Случайные процессы задаются в блоке 6: задержка рейса из-за отказа, неплановый ремонт, удлинение планового ТОиР. При этом основными параметрами являются интенсивности отказов от различных видов ТОиР и другие параметры, задаваемые до начала моделирования. В последующий момент времени $t + 1$ состояние модели определяется функцией перехода f от состояния в момент времени t :

$$S_{t+1} = f(S_t) = f(S_{t-1}) = \dots = f(S_{t_0}). \quad (1)$$

Состояние модели S определяется состоянием S_{tr} (техническим состоянием, местонахождением, пробегом и др.), совокупностью составов $Tr_i \in Tr$, состоянием (занятостью) ремонтных позиций $RP_i \in RP$ с наличием ожидания ремонта (очереди). У полигона имеется расписание поездов на сутки TT с неизменным состоянием $S_{TT} = \text{const}$, являющееся основанием для привязки составов Tr_i к поездам расписания —

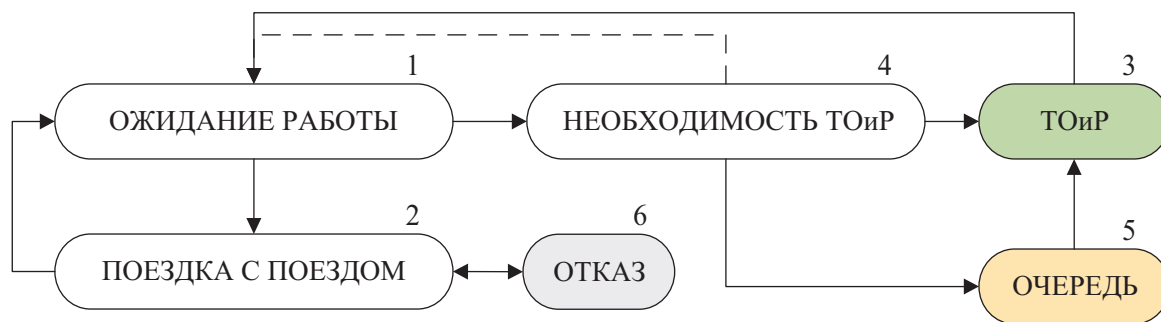


Рис. 3. Граф переходов модели ТОиР

формируется поминутное дневное движение поездов $S_D = f_D(DDD)$. Состояние модели S_Σ определяется совокупностью состояний ее компонентов:

$$S_{\Sigma, t+1} = f_\Sigma(S_{Tr, t}, S_{RP, t}, S_{TT, t}, S_{D, t}). \quad (2)$$

Расписание поездов определяется с точностью до минуты, поэтому минимальный шаг дискретной модели должен быть:

$$\Delta t_M = (t + 1) - t = 1 \text{ мин.} \quad (3)$$

При необходимом шаге согласно расписанию в 1 мин. имеется еще дневная дискретность d согласно повторению расписания:

$$\Delta t_D = (t_d + 1) - t_d = 1 \text{ день.} \quad (4)$$

В АСУ, как в системе с обратными связями, возможны проблема устойчивости [10, 11, 17], риск возникновения колебаний и даже автоколебаний. На рис. 4 приведены примеры пере-

ходного процесса при достижении заданного параметра.

Для АСУ разработан ряд критериев математического определения устойчивости системы: алгебраические, Рауса, Гурвица, Михайлова, Найквиста и др. [11]. Но киберфизическая система управления АСУ ТОиР является прерывной и нелинейной. АСУ не поддается непрерывному дифференцированию, что делает практически неприменимыми методы определения устойчивости. Представляется целесообразным имитационное моделирование с определением возможных колебаний системы согласно теории массового обслуживания с использованием цепей Маркова и сетей Петри. В результате моделирования должны быть определены параметры, при которых АСУ будет устойчива в достижении установившегося режима с допустимыми статическими и динамическими ошибками.

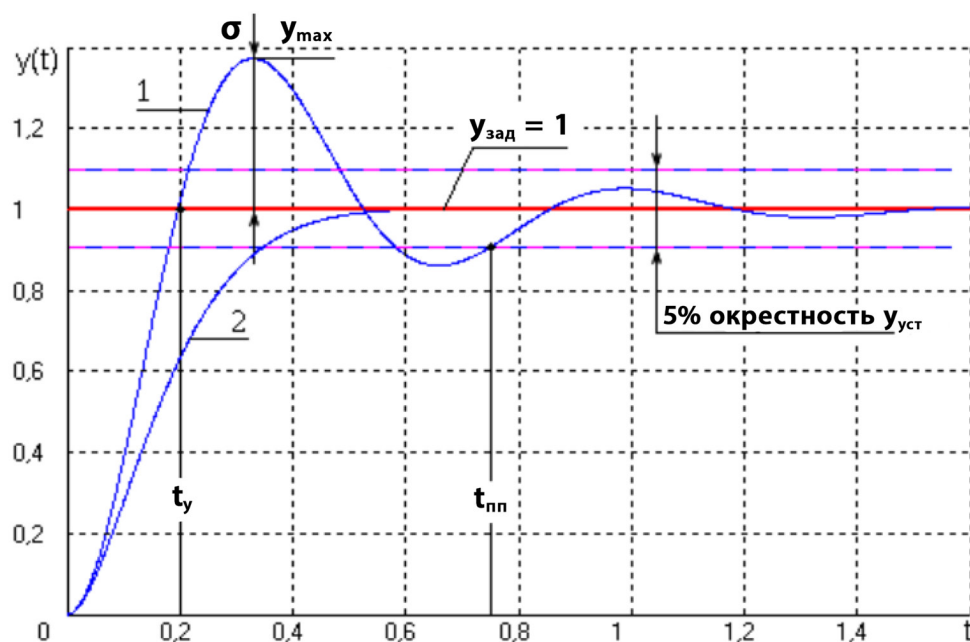


Рис. 4. Общий принцип АСУ [17]: 1 — с перерегулированием, 2 — без перерегулирования, где $t_{пп}$ — время переходного процесса, t_y — время установления сигнала в первый раз, σ — перерегулирование, $\sigma = (y_{\max} - y_{\text{зад}}) / y_{\text{зад}}$ — относительное перерегулирование

В рассмотренном примере за основу взята модель управления ресурсами. Пусть задан неснижаемый запас деталей на складе *Norma*. Ежедневный расход деталей на устранение отказов (детерминированный или стохастический согласно нормальному закону распределения) составляет *Otkaz* деталей. На складе находится *Ostatok* деталей, отличающийся от норматива на $\Delta = Norma - Ostatok$. Если $\Delta < 0$, значит, возник недопустимый дефицит. При отсутствии стохастических процессов берутся математические ожидания. В примере это по 4 дня на доставку и 2 дня на ремонт (изготовление) — всего 10 дней (см. таблицу). Необходимо по исходным данным определить размер заказа деталей *Zakaz* для поддержания неснижаемого запаса по одному из возможных алгоритмов и моделированием определить устойчивость системы.

ТАБЛИЦА. Исходные данные для расчета

Данные Участка	Параметр
Среднее число ремонтов узла, шт.	10
СКО	1,1
1. Доставка минимум, дней	3
2. Доставка норма, дней	4
3. Доставка задержка, дней	6
4. Задержка максимум, дней	10
Начальный запас узлов, шт.	150
Неснижаемый запас, норматив, шт.	50
Данные Центра	Параметр
Среднее число ремонтов в день, шт.	25
СКО числа ремонтов в день	2
1. Ремонт минимум, дней	1
2. Ремонт норма, дней	2
3. Ремонт задержка, дней	3
4. Задержка максимум, дней	7

За основу взята разработанная модель ТОиР с использованием цепей Маркова и сетей Петри. Шаг взят с точностью до дня $\Delta t = \Delta t_D = 1$ день.

Первым смоделирован простейший алгоритм, при котором заказ *Zakaz* равен расходу *Otkaz* (рис. 5): $Zakaz = Otkaz$. Число деталей на складе уменьшается с начально заданных $Ostatok = 150$ в темпе расхода $Otkaz = 10$, пока не начнут с задержкой через $4 + 2 + 4 = 10$ дней поступать детали из Центра. Процесс стабилизируется. При расходе $Otkaz = 10$ деталей запас стабилизировался на уровне 50 деталей, соответствующем нормативу: $Ostatok = 150 - 10 \cdot 10 = 50$. При $Otkaz = 15$ запас стал нулевым: $Ostatok = 150 - 10 \cdot 15 = 0$. При дальнейшем увеличении расхода деталей на складе не хватит. Алгоритм является разомкнутым и неуправляемым.

Автоколебания возникли при заказе деталей по разнице между нормативом *Norma* и остатком на складе *Ostatok*, даже при частичной защите от перерегулирования (рис. 6).

Автоколебания — опасное явление в АСУ. В рассмотренном примере возник дефицит деталей. Возможны «разносные» автоколебания, происходящие с увеличением амплитуды колебаний. Подбором параметров колебания системы можно минимизировать (рис. 7).

Процесс с тем же алгоритмом управления при заданном стохастическом процессе приведен на рис. 8, а за период 1000 дней. Моделирование показало наличие риска дефицита деталей (в примере — на 270-й и 438-й день). Увеличение неснижаемого запаса $Norma = 60$ (рис. 8, б) устранило проблему — имитационным моделированием подбираются параметры системы при выбранном алгоритме управления с обеспечением устойчивости. При автоматическом управлении тяговым приводом подвижного состава возникновение колебаний достаточно очевидно: изменения скорости, тока,



Рис. 5. Отсутствие выхода на заданный норматив АСУ

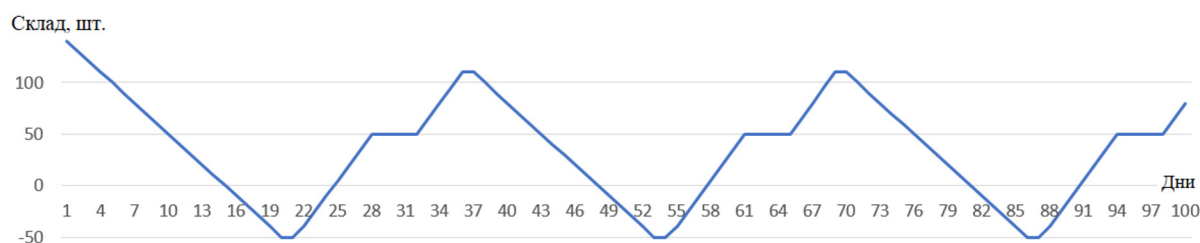


Рис. 6. Автоколебания АСУ

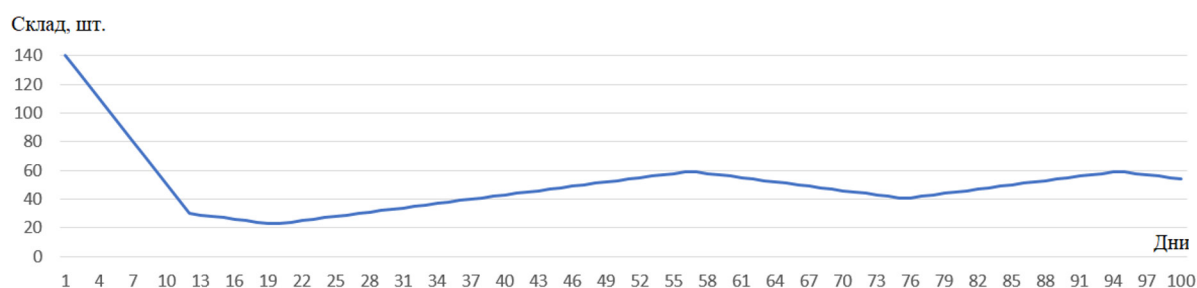


Рис. 7. Нормальное управление АСУ по отклонению

напряжения, давления, температуры в салоне и др. легко измеримы.

В АСУ отличить колебания системы от регулирования не так просто даже в приведенном относительно простом примере. Более того, если в приводе колебания имеют частоту от миллисекунд до минуты (легко наблюдаемы), то в АСУ — это часы, дни, месяцы и более (трудно наблюдаемы). Напри-

мер, неправильное планирование трудовых ресурсов обнаружится через дни, неправильный заказ технологического оборудования — через месяцы, неправильный выбор числа ремонтных позиций — через годы. Поэтому имитационное моделирование процессов АСУ ТОиР особенно актуально. Его также можно включать в число встроенных методов для проверки принимаемых управляющих

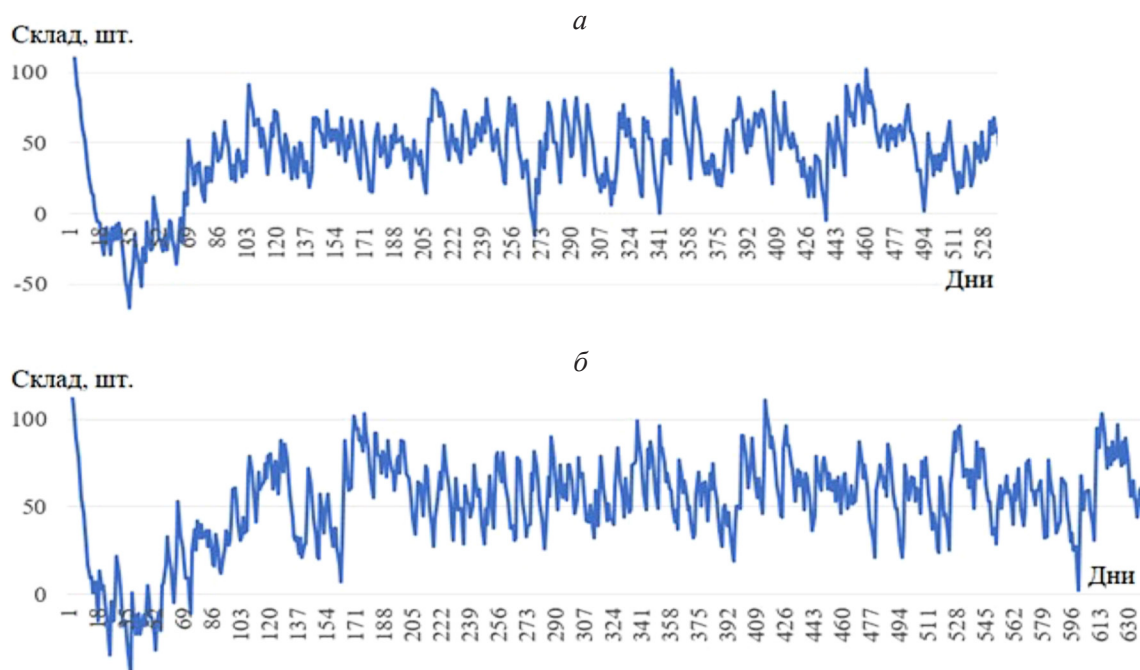


Рис. 8. Управление АСУ при стохастических процессах:

а — $Norma = 50$, *б* — $Norma = 60$

воздействий на их корректность в части устойчивости системы.

Вывод: авторами предлагается при разработке и сопровождении АСУ ТООР подвижного состава использовать математическую модель на базе цепей Маркова и сетей Петри для имитационного моделирования процессов ремонтного депо с целью подбора параметров системы для исключения возможных колебаний системы.

Список источников

1. Скоростные железные дороги Японии. Синкансен / пер. с япон. М.: Транспорт, 1984. 199 с.
2. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации. М.: ОАО «РЖД». 2015. 152 с.
3. Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта // Официальный сайт ИЦ ЖДТ. URL: <https://ecrt.ru>
4. Сайт национального проекта «Развитие высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ)». URL: <https://vsmholdng.ru>
5. Горский А. В., Воробьев А. А. Надежность электроподвижного состава. М.: Маршрут, 2005. 303 с.
6. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В. И. Киселев [и др.]. М.: ИРИС-Групп, 2012. 576 с.
7. 1С:ТООР. Управление ремонтами и техническим обслуживанием оборудования: официальный сайт. URL: <https://solutions.1c.ru/eam>
8. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис. Теория и практика / К. В. Липа [и др.]. М.: ЛокоТех, 2015. 212 с.
9. Винер Н. Человек управляющий. СПб.: Питер, 2001. 288 с.
10. Луков Н. М., Космодамианский А. С. Автоматические системы управления локомотивов. М.:

Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 429 с.

11. Савоськин А. Н., Баранов Л. А., Плакс А. В. Автоматизация электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1990. 311 с.

12. Ассоциация Деминга. URL: <https://www.deming.ru>

13. Галахов А. Н., Лакин И. И., Скворцов Д. Д. Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 4. С. 52–67.

14. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA / пер. с англ. М.: И. Д. Вильямс, 2014. 944 с.

15. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Академия, 2003. 464 с.

16. Шалыто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. Глава 11: Сети Петри, графы операций и графы переходов.

17. Устойчивость систем автоматического управления. Основы теории управления. URL: <https://ideafix.su/university/ASU/lectures>. UDC 629.423.24

Дата поступления: 07.05.2026

Решение о публикации: 22.06.2026

Информация об авторах:

КОСМОДАМИАНСКИЙ Андрей Сергеевич — доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав»; askosm@mail.ru

ЛАКИН Игорь Игоревич — кандидат техн. наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи; lakin16@mail.ru

The Automated Control System Stability for the High-speed Electric Trains Technical Condition

A. S. Kosmodamianskij¹, I. I. Lakin²

¹ Russian Transport University (RUT), bldg. 9, 9 Obraztsova st., Moscow, 127994, Russia

² Railway Transport Engineering Center, 40 Bolshoy Boulevard, Skolkovo, Moscow, 121205, Russia

For citation: *Kosmodamianskij A. S., Lakin I. I. The Automated Control System Stability for the High-speed Electric Trains Technical Condition // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 561–571. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-561-571 (In Russian)*

Abstract

A high-speed highway (HSR) St. Petersburg — Moscow is being created in Russia. A promising rolling stock is being developed, on the reliable operation of which the efficiency of high-speed transportation depends. It requires the creation of a modern maintenance and repair system (MRO), the operation of which should be optimized by creating an automated control system (ACS) MRO. The disadvantage of automated control systems as an auto — regulation system is the risk of unstable operation and the occurrence of self-oscillations. **The purpose** of the work is to solve the problems of eliminating vibrations of the MRO control system. **Methods:** to achieve this goal, it is proposed to use simulation modeling to select system parameters and eliminate possible unstable operating modes. As the mathematical basis of the model, Markov chain methods with a discrete representation of time are chosen, when, in accordance with the graph of transitions, the state of the system at each subsequent moment in time is completely determined by its state at the previous moment. For the software implementation of the model, the dynamic modeling apparatus “Petri

Nets” has been chosen, which correspond quite accurately to Markov chains. The developed automated control system stability control model is programmatically implemented in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA) in the MS Excel environment. **Results:** as an example of the application of the model, the article considers the MRO logistics system. It was revealed that if the system parameters are incorrectly selected, self-fluctuations in the stock of the repair kit in the warehouse are possible. This can lead to a shortage of the transition stock and disruptions in the MRO operation. It is shown that fluctuations and shortages can be avoided by selecting the parameters of the automated control system through iterative modeling, with sequential changes in the system parameters. **Practical significance:** the proposed method and the developed software are useful: at the design stage of the MRO control system, with a significant change in the parameters of the current MRO control system.

Keywords: high-speed highways, electric trains, reliability, maintenance and repair, stability of the control system, mathematical modeling

References

1. Skorostnye zheleznye dorogi Yaponii. Sinkansen [High-Speed Railways of Japan. Shinkansen], translated from Japanese, Moscow, Transport, 1984, 199 p. (In Russian)
2. Programma organizatsii skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Rossiyskoy Federatsii [Program for Organizing High-Speed and Ultra-High-Speed Railway Services in the Russian Federation], Moscow, JSC Russian Railways, 2015, 152 p. (In Russian)
3. Inzhiniringovyy tsentr zheleznodorozhnogo transporta [Railway Transport Engineering Center]. Official website of EC RT. URL: <https://ecrt.ru> (In Russian)
4. Sajt natsional'nogo proekta “Razvitie vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralej (VSM)” [Website of the national project “Development of High-speed Rail Lines (HSR)”]. URL: <https://vsmholdng.ru> (In Russian)
5. Gorskiy A. V., Vorob'ev A. A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of Electric Rolling Stock], Moscow, Marshrut, 2005, 303 p. (In Russian)
6. Kiselev V. I., et al. Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and Maintenance of Rolling Stock], Moscow, IRIS-Grupp, 2012, 576 p. (In Russian)
7. IS:TOIR. Upravlenie remontami i tekhnicheskim obsluzhivaniem oborudovaniya: ofitsial'nyj sajt [IC: TOIR. Equipment Repair and Maintenance Management: Official Website]. URL: <https://solutions.1c.ru/eam>
8. Lipa K. V., et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov v TMKh-Servis. Teoriya i praktika [Monitoring the Technical Condition and Operating Modes of Locomotives at TMH-Service. Theory and Practice], Moscow, LokoTekh, 2015, 212 p. (In Russian)
9. Wiener N. Chelovek upravlyayushchiy [The Human as Controller], St. Petersburg, Piter, 2001, 288 p. (In Russian)
10. Lukov N. M., Kosmodamianskij A. S. Avtomaticheskie sistemy upravleniya lokomotivov [Automatic Control Systems for Locomotives], Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2007, 429 p. (In Russian)
11. Savos'kin A. N., Baranov L. A., Plaks A. V. Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava [Automation of Electric Rolling Stock], Moscow, Transport, 1990, 311 p. (In Russian)
12. Deming Association [Assotsiatsiya Deminga]. URL: <https://www.deming.ru> (In Russian)
13. Galakhov A. N., Lakin I. I., Skvortsov D. D. Modelirovanie tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vysokoskorostnykh elektropoezdov s ispol'zovaniem dannykh bortovykh sistem diagnostiki [Modeling Maintenance and Repair of High-Speed Electric Trains Using Onboard Diagnostic System Data], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*

[*Bulletin of Research Results*], 2023, no. 4, pp. 52–67. (In Russian)

14. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: Professional VBA Programming], translated from English, Moscow, I. D. Vil'yams, 2014, 944 p. (In Russian)

15. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya [Probability Theory and Its Engineering Applications], Moscow, Akademiya, 2003, 464 p. (In Russian)

16. Shalyto A. A. Logicheskoe upravleniye. Metody apparatnoy i programnoy realizatsii algoritmov. Glava 11: Seti Petri, grafy operatsiy i grafy perekhodov [Logical Control. Methods of Hardware and Software Implementation of Algorithms. Chapter 11: Petri Nets, Operation Graphs, and Transition Graphs], St. Petersburg, Nauka, 2000, 780 p. (In Russian)

17. Ustoychivost' sistem avtomaticheskogo upravleniya. Osnovy teorii upravleniya [Stability of Automatic Control Systems. Fundamentals of Control Theory]. URL: <https://ideafix.su/university/ASU/lectures>. UDC 629.423.24 (In Russian)

Received: May 07, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Andrej S. KOSMODAMIANSKIY — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Traction Rolling Stock” Department; askosm@mail.ru

Igor I. LAKIN — PhD in Engineering, Leading expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group; lakin16@mail.ru