

## Киберфизическая система для управления отрядом дорожных машин в инфраструктурных проектах автомобильного транспорта

*А.П. Прокопьев*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Аннотация:** Совместное управление асфальтоукладчиками и несколькими катками, позволяющее каждому катку уплотнять дорожный слой наиболее эффективно с оптимальными режимами для обеспечения требуемого качества уплотнения асфальтобетонных (АБ) смесей, является нерешенной задачей. Для решения этой задачи, на основе современных достижений научно-технического прогресса, предложена структура киберфизической дорожно-строительной системы с вариантом усовершенствования. Предложена структура системы контроля и управления уплотнением АБ смесей отрядом асфальтоукладчик – дорожные катки. Разработка киберфизической дорожно-строительной системы позволяет на основе цифровизации эффективно управлять несколькими дорожными машинами на строительных площадках инфраструктурных проектов автомобильного транспорта.

**Ключевые слова:** уплотнение асфальтобетонных смесей, контроль качества в режиме реального времени, дорожные машины, кибер-физическая система, система управления.

Повышение качества и увеличение долговечности покрытий автомобильных дорог является народно-хозяйственной задачей, для решения которой требуется создание и усовершенствование методов и средств управления процессами уплотнения дорожных материалов. Эта задача может решаться за счет создания систем автоматического контроля и управления (САУ) процессом уплотнения АБ смесей [1-3]. Создание новых и усовершенствование существующих систем позволит использовать ряд передовых цифровых технологий, а также переход к применению киберфизических дорожно-строительных систем (КФДСС) [4-6]. Внедрение таких систем актуально с учетом реализации больших инфраструктурных проектов автомобильного транспорта, решения задачи оптимального управления большим количеством автоматизированных машин [7-9]. Актуальны работы, посвященные теоретическому анализу и полевым испытаниям физических процессов вибрационного уплотнения, на базе цифровизации, современных методов моделирования и технических средств автоматизации [10].

---

Целью работы является анализ и разработка структуры КФДСС как организационно-технической концепции управления информационными потоками и вычислительными ресурсами, объединяющей в единую сеть технические средства автоматизации и информационные системы.

Задачи для достижения поставленной цели:

- предложить структуру КФДСС;
- разработать структурно-функциональную схему системы управления отрядом дорожных машин для строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

### **Киберфизическая дорожно-строительная система**

Предложено определение «киберфизическая дорожно-строительная система» (КФДСС) – это функциональный набор мобильных и стационарных технических средств автоматизации, взаимодействующих между собой, с интернетом и пользователями, реализованных в вычислительных и информационно-управляющих системах. Технические средства автоматизации, реализующие системы непрерывного контроля и управления уплотнением АБ смесей, созданы для использования на вибрационных катках [6-8]. Значительным резервом в повышении качества дорожных покрытий, эффективности управления дорожно-строительными процессами, реализации концепции кибер-физических систем, является применение асфальтоукладчиков, оснащенных системой автоматического контроля и управления уплотнением АБ смесей [3, 11].

В работе [11] предложен новый метод непрерывного контроля уплотнения для асфальтоукладчиков, реализованный на базе искусственной нейронной сети (ИНС). Вычисленное системой в реальном времени значение коэффициента уплотнения позволяет аппаратными средствами передать информацию машинисту укладчика или САУ для действий по изменению рабочих режимов (частоты трамбуемого бруса), если есть отклонение от заданного значения коэффициента уплотнения, нужно отправить сигнал

---

вибрационным каткам, выполняющим уплотнение дорожного покрытия за укладчиком, для выбора оптимальных режимных параметров (скорость движения, частота колебаний вибратора вальца).

Расширение автоматизации асфальтоукладчиков за счет подключения системы непрерывного контроля и управления уплотнением улучшает машину до соответствия понятию «умный укладчик». В научных публикациях отсутствуют аналогичные или подобные им технические решения.

Киберфизическая дорожно-строительная система включает отряд дорожных машин (асфальтоукладчики, дорожные катки), рис. 1, оснащенных техническими средствами автоматизации, которые информационно взаимодействуют между собой, используя сети (сотовую, интернет), а также средствами глобальной спутниковой навигации. Установленные на дорожных машинах системы автоматического контроля определяют коэффициент уплотнения АБ смесей.

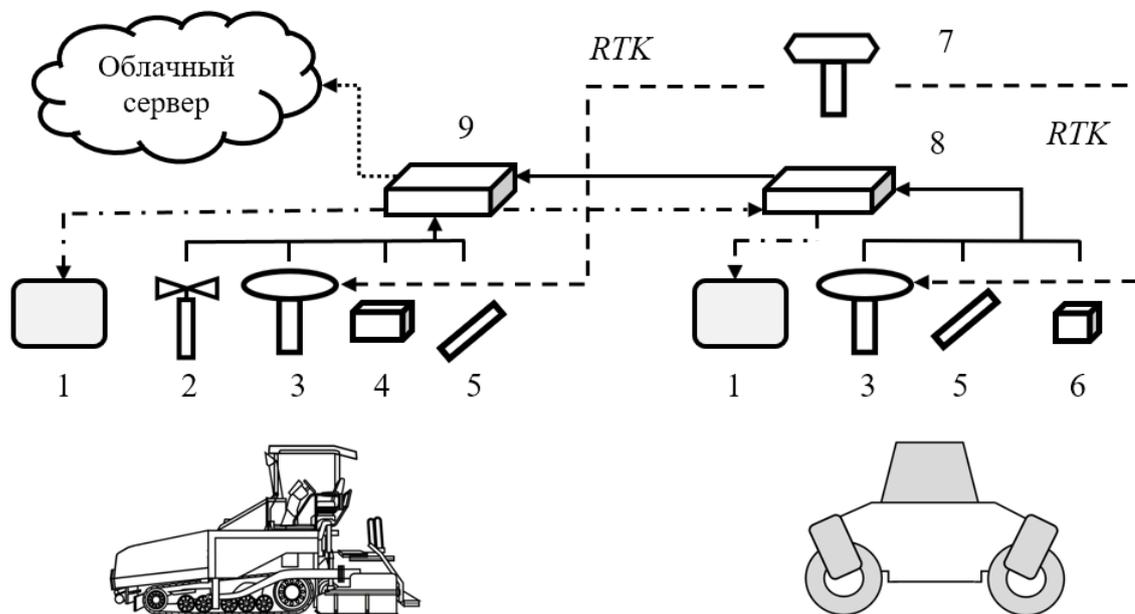


Рис. 1. Функциональная схема КФДСС, реализующей систему управления уплотнением АБ смесей: 1 – монитор; 2 – датчик скорости ветра; 3 – антенна спутниковой навигационной системы (СНС); 4 – модуль интеллектуального непрерывного контроля уплотнения; 5 – бесконтактный датчик температуры

поверхности асфальтобетонного покрытия; 6 – акселерометр; 7 – станция СНС; 8 – контроллер дорожного катка; 9 – контроллер укладчика

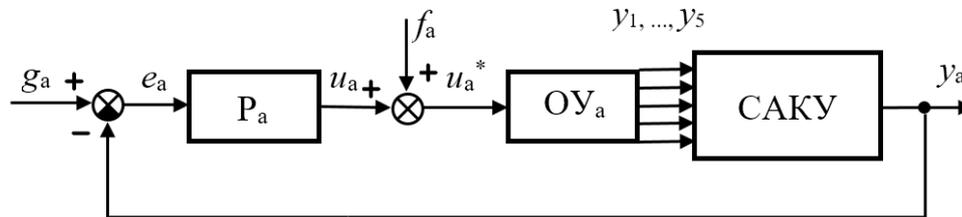
Усовершенствованием является оснащение укладчиков модулем интеллектуального непрерывного контроля уплотнения АБ смесей 4, с реализацией ИНС на базе цифровой техники. Текущая информация о реализации проекта хранится и анализируется в облачных серверах, что обеспечивает информационный поток и связь между машинами в режиме реального времени.

Структурно-функциональная схема предлагаемой системы управления уплотнением отрядом дорожных машин приведена на рис. 2. Здесь:  $g$  – задающее воздействие (уставка);  $e$  – ошибка регулирования;  $u$  и  $y$  – регулируемый вход и регулируемый выход объекта соответственно;  $f$  – внешние возмущения, приложенные к входу объекта; ОУ – объект управления; Р – регулятор; САКУ – система автоматического контроля уплотнения; ИПР – блок интеллектуального принятия решения; НКУ – блок непрерывного контроля уплотнения; Д – дискриминатор;  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$  – переменные на входе САКУ, показатель типа смеси, скорость укладчика, усилие в толкателе трамбуемого бруса, частота трамбуемого бруса, толщина слоя, соответственно;  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$  – переменные на входе блока ИПР, коэффициент уплотнения, скорость катка, температура смеси, температура воздуха, частота вибрации, соответственно. Индексы: а – асфальтоукладчик; к – дорожный каток.

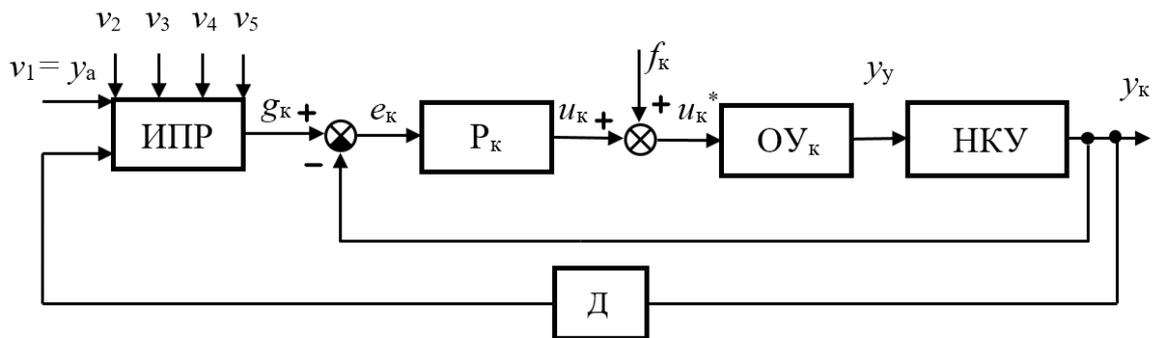
Задающее воздействие САУ уплотнением асфальтоукладчика – коэффициент уплотнения, определяется на этапе подготовки проекта производства работ, с учетом наличия дорожных катков, максимальной уплотняющей способности укладчика.

Регулирующим параметром является частота ударов трамбуемого бруса. Выходной параметр САУ укладчика  $y_a$  – коэффициент уплотнения АБ

смеси, определяется в блоке интеллектуальной САКУ и в режиме реального времени беспроводными средствами передается на вход САУ уплотнением вибрационных катков.



САУ уплотнением АБ смесей асфальтоукладчиком



САУ уплотнением АБ смесей вибрационным катком

Рис. 2. Структурно-функциональная схема системы управления уплотнением АБ смесей отрядом дорожных машин

Входные данные САУ уплотнением вибрационного катка: коэффициент уплотнения после асфальтоукладчика; скорость дорожного катка; частота колебаний вибратора вальца; температура поверхности слоя; температура воздуха. Уставка  $g_k$  определяется в блоке интеллектуального принятия решения.

Регулируемый параметр дорожного катка – коэффициент уплотнения, определяется в режиме реального времени системой непрерывного контроля уплотнения после каждого прохода по одному следу. В главной обратной связи САУ для обнаружения рассогласования параметров сигналов и преобразования этого рассогласования в сигнал, удобный для дальнейшей обработки, используется дискриминатор.

**Заключение.** В статье рассмотрена реализация кибер-физической

системы как организационно-технической концепции управления дорожными машинами, выполняющими укладку и уплотнение асфальтобетонных покрытий, что актуально для обеспечения эффективности процессов строительства инфраструктурных проектов автомобильного транспорта. Предложена структурно-функциональная схема автоматизации контроля и управления уплотнением АБ смесей, взаимодействующими непрерывно между собой дорожными машинами (асфальтоукладчик - дорожные катки), в процессе строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Направления дальнейших исследований могут быть связаны с созданием интеллектуальных непрерывных систем контроля уплотнения для асфальтоукладчиков и вибрационных катков на базе искусственных нейронных сетей (нейронные сети, гибридные сети, сверточные нейронные сети и др.) и методов оптимизации (генетические алгоритмы, муравьиные алгоритмы и др.).

### Литература

1. Романенко И.И. Автоматизация дорожно-строительных работ при применении информационных систем и 3D моделей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214).
2. Насонов Е.И., Макиша Е.В. Киберфизические системы в строительной отрасли // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678).
3. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235).
4. Чельшков П.Д. Киберфизическая интеграция строительных систем // Естественные и технические науки. 2018. № 6. С. 198-200.

5. Prokopen A.P., Nabizhanov Z.I., Emelyanov R.T., & Ivanchura V.I. Concept of a new method for continuous non-destructive control of asphalt road pavements compaction // J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 052054. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052054.
6. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. A Review on Roller Compaction Quality Control and Assurance Methods for Earthwork in Five Application Scenarios. Materials. 2022. 15. 2610. DOI: 10.3390/ma15072610.
7. Donghai L., Chen J., Li Sh. Collaborative operation and real-time control of roller fleet for asphalt pavement compaction // Automation in Construction. 98. 2019. pp. 16-29. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.005.
8. Donghai L., Jianyu L., Junjie Ch., Dong Ch., and Shuai L. A Cyber-Physical System for Multi-Roller Control in Mega Infrastructure Projects // Construction Research Congress 2020. pp. 418-426. DOI: 10.1061/9780784482889.044.
9. Zhang Q.L., An Z.Z., Liu T.Y., Zhang Z.S., Huangfu Z.H., Li Q.B. Intelligent control theory of earth-rock dam compaction // J. Hydroelectr. Eng. 2020. 39. pp. 34–40.
10. Shan H-Y, Dan H-C, Wang S-P, Liu X. and Wang H. Theoretical and Experimental Investigation on Dynamic Response of Asphalt Pavement Under Vibration Compaction // Front. Mater. 8. 2022. 816949. DOI: 10.3389/fmats.2021.816949.
11. Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. К вопросу создания системы непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков // Программная инженерия. Том 12, № 8, 2021. С. 413-419. DOI: 10.17587/prin.12.413-419

### References

1. Romanenko I.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7214.



2. Nasonov E.I., Makisha E.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5678).
3. Prokop'ev A.P., Nabizhanov ZH.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7235).
4. Chelyshkov P.D. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. 2018. № 6. pp. 198-200.
5. Prokopev A.P., Nabizhanov Z.I., Emelyanov R.T., & Ivanchura V.I. J. Phys.: Conf. Ser. 1515. 052054.
6. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. Materials. 2022. 15. 2610.
7. Donghai L., Chen J., Li Sh. Automation in Construction. 98. 2019. pp. 16-29.
8. Donghai L., Jianyu L., Junjie Ch., Dong Ch., and Shuai L. Construction Research Congress 2020. pp. 418-426.
9. Zhang Q.L., An Z.Z., Liu T.Y., Zhang Z.S., Huangfu Z.H., Li Q.B. J. Hydroelectr. Eng. 2020. 39. pp. 34-40.
10. Shan H-Y, Dan H-C, Wang S-P, Liu X. and Wang H. Front. Mater. 8. 2022. 816949.
11. Prokop'ev A.P., Nabizhanov ZH.I., Ivanchura V.I., Emel'yanov R.T. Programmnyaya inzheneriya. Tom 12, № 8, 2021. S. 413-419.