

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2(32) 2025

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (32) декабрь 2025 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освещение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматики, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

Основные направления журнала: Автоматизированные системы управления; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФБГОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Логунова Оксана Сергеевна - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)

Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО «КонсОМ СКС»)

Редакция

Главный редактор:
Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Ответственный редактор
Самарина Ирина Геннадьевна

Контакты

Главный редактор: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-85-27
Редакционная коллегия: Самарина Ирина Геннадьевна
Тел.: (3519) 29-85-58
E-mail: atp@magtu.ru

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru
Выходит в свет 12.2025.

УНИВЕРСИАДА «ПУТЬ К УСПЕХУ»

СЕКЦИЯ «МЕТРОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ» (профиль: системы и средства автоматизации технологических процессов)

Кто может участвовать: обучающиеся или закончившие обучение в образовательных организациях высшего образования в России и за рубежом по образовательным программам бакалавриата или специалитета.

Условия участия: участие бесплатное. Необходимо пройти регистрацию на портале Универсиады <http://univer.magtu.ru/> и выбрать Секции > Универсиада > 2026 год > Управление в технических системах (Метрология и средства измерения) или ссылке <https://univer.magtu.ru/enrol/index.php?id=322>

Календарь проведения:

- с 20.12.2025 по 21.02.2026 г. – регистрация участников на <http://univer.magtu.ru/>;
- с 12.01.2026 по 21.02.2026 г. – отборочный этап в заочной форме, включающий прохождение тестирования на портале Универсиады;
- с 19.03.2026 г. – заключительный этап проводится в очной форме письменно в один из указанных дней. Информация о конкретной дате, месте и времени проведения заключительного этапа будет размещена дополнительно на интернет-странице кафедры АСУ https://vk.ru/magtu_asu и портале Универсиады.

Место проведения: 455000 Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, корпус 1, ауд. 452

Призы и награды: Всем участникам выдаются электронные сертификаты участия. Победителям будут предоставлены дополнительные баллы при поступлении в магистратуру ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», а также возможность поучаствовать в конкурсе на получение грантов; диплом участника, победителя (призёра).

Подробная информация о регламенте проведения Универсиады, сроках, составе участников, победителях и призерах размещается на официальном портале Универсиады <http://univer.magtu.ru/> и на интернет-странице кафедры АСУ в контакте https://vk.ru/magtu_asu

По всем вопросам обращаться к координатору Универсиады:
Сухоносовой Татьяне Геннадьевне, tgbuhova@gmail.com , tu-ta@mail.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

В.Д. Павлов

Зависимость реактивной мощности сортировальной машины от наклона решет 3

И.П. Попов

Кондактансы и адмитансы мехатронных систем при последовательном соединении элементов 7

В.Д. Павлов

Оптимизация смещения фаз колебаний рабочих органов сортировальной машины 11

Технические средства автоматизации

И.П. Кудашов, К.Х. Гильфанов, В.Ю. Корнилов

Анализ и особенности построения колаборативных роботов на основе трёхдвигательных электроприводов 15

И.П. Попов

Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях 18

Автоматизированные системы управления

В.В. Юртаев, В.Ю. Корнилов

Архитектуры систем управления многодвигательными мехатронными модулями: от централизованных к распределенным сетям 21

В.В. Юртаев, Д.Г. Сидорова

Современный этап развития мехатроники и робототехники в Германии 25

Т.Г. Сухоносова, А.А. Нугаманов, С.А. Емельянов

Автоматизация пароперегревательной установки 29

CONTENTS

Mathematic and simulation of control systems and objects

V.D. Pavlov

Dependence of the Reactive Power of The Sorting Machine on The Inclination of the Sieve 3

I.P. Popov

Conductions and Admitances of Mechatronic Systems with Serial Connection of Elements 7

V.D. Pavlov

Optimization of the Phase Shift of Oscillations of the Working Bodies of a Sorting Machine 11

Automation equipment

I.P. Kudashov, K.Kh. Gilfanov, V.Yu. Kornilov

Analysis and Features of the Construction of Collaborative Robots Based on Three-Motor Electric Drives 15

I.P. Popov

Relationship Between Mechanical Quantities Of Mechatronic Systems Under Forced Oscillations ... 18

Automated Control Systems

V.V. Yurtaev, V.Yu. Kornilov

Control System Architectures for Multi-Motor Mechatronic Modules: From Centralized to Distributed Networks 21

V.V. Yurtaev, D.G. Sidorova

Modern Stage of Development of Mechatronics and Robotics in Germany 25

T.G. Sukhonosova, A.A. Nugamanov,

S.A. Emelyanov
Automation of Steam Superheating Unit 29

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Научные статьи, направляемые для публикации в журнал, **должны содержать**: название статьи; - сведения об авторах (Фамилия, Инициалы; место работы, город, страна; электронный адрес), количество авторов - не более 5; аннотацию в объеме от 100 до 250 слов; перечень ключевых слов или фраз в объеме не более 7; список литературы, не менее 8 ссылок. В случае представления статьи на русском языке указанные выше пункты должны быть представлены также и в англоязычном варианте. Если в оригинале статья написана на английском языке, то дополнительно эти сведения рекомендуется привести на русском языке.

Статью следует набирать в шаблоне, представленном на информационной странице портала ФГБОУ ВО "МГТУ" www.magt.ru (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

Рекомендуемая структура статьи: УДК. Аффилиация (фамилии авторов и место их работы). Название статьи. Аннотация. Ключевые слова. Введение. Методы исследования. ... Результаты. Заключение. Источник финансирования (при необходимости). Список литературы. Информация на английском (аффилиация, аннотация, ключевые слова, список литературы).

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

Объем рукописи статьи, оформленный в соответствии с приведенными требованиями, не должен превышать: обзорной статьи более 10 страниц; статьи более 6 страниц; краткого сообщения более 2 страниц.

Самоцитирование: не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

В сопровождение рукописи статьи авторами должны быть направлены на официальный адрес электронной почты редакции журнала, следующие документы: **экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати (цветной скан в формате PDF). Работы, выполненные авторами в инициативном порядке, представления экспертного заключения не требуют; **сведения об авторах** (Фамилия Имя и Отчество полностью, ученая степень и ученое звание, место работы, город, страна, электронный адрес) с указанием одного из авторов, который будет взаимодействовать с редакцией.

Пример оформления

Предоставление материалов

УДК 681.5.015.32

ДОСТОВЕРНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Б.Н. Парсункин¹, Т.Г. Сухонова²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

²tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель программной реализации достоверного и оперативного метода определения значений динамических параметров управляемого технологического процесса для определения динамических параметров настройки микропроцессорных контуров управления в условиях интенсивного негативного воздействия технологических и организационных возмущений, характерных для реального производства. Эффективное решение поставленной задачи обеспечивается использованием уникальных свойств ортогональных функций Уолша, позволяющих формирование таких планов тестирующих воздействий, которые полностью компенсируют негативное влияние возмущающих воздействий на интегральную оценку отклика (реакцию) управляемого параметра на тестирующее входное воздействие. Использование предлагаемого метода особенно целесообразно при решении многих практических задач, когда необходимо получать достоверные результаты в условиях действия различных возмущающих факторов влияющих на точность определяемого параметра.

Ключевые слова: динамические параметры объекта управления, определение параметров объекта, функция Уолша, компенсация возмущений, тестирующие воздействия, интегральная оценка.

Введение

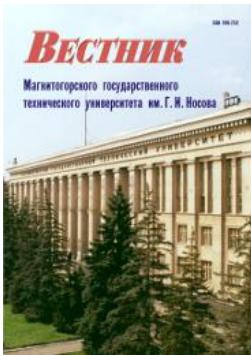
При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта Коб, постоянной

например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции); при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке экспериментальных кривых разгона на рис. 1 представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atp@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

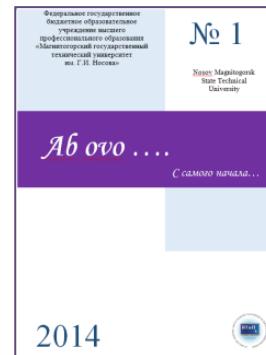
Другие рекомендуемые периодические издания



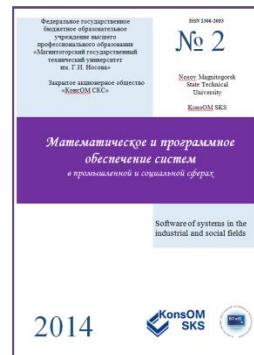
Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические
системы и комплексы



Журнал молодых исследователей:
магистров и аспирантов



Математическое и программное
обеспечение систем
в промышленной и социальной сферах

УДК 534.014.3

ЗАВИСИМОСТЬ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СОРТИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ОТ НАКЛОНА РЕШЕТ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. В статье приводится пример расчета реактивной, в том числе, гравитационной мощности сортировальной машины в зависимости от наклона решет. В расчете учитывается инерционная, она же гравитационная масса сыпучего материала, которая приводит к развитию вертикальной составляющей его ускорения. Установлено, что наклон решет главным образом приводит к развитию гравитационной мощности (около 30% от реактивной мощности) и почти не влияет на реактивную мощность.

Ключевые слова: сортировальная машина, решета, наклон, сыпучий материал, колебания, реактивная мощность, привод.

Сортировальные машины используются в индустрии строительных материалов, горнорудной промышленности, металлургии, сельском хозяйстве. Машина состоит из корпуса, привода и решет, под действием вибрации которых часть сыпучего материала просеивается, а часть «ходит».

В технологических целях решета сортировальных машин устанавливаются с небольшим наклоном [1]. Известно, что угол наклона влияет на характеристики сортировальной машины, однако закономерности влияния не установлены.

При наклоне решет помимо инерционной и диссиpативной мощностей дополнительно развивается гравитационная мощность, обусловленная вертикальным перемещением части сыпучего материала.

В этой связи целью работы является определение влияния наклона решет на реактивную, в том числе, гравитационную мощности решетных сортировальных машин.

На рисунке 1 показана связь вертикального ускорения опоры a_y с горизонтальным ускорением решета a_x . При этом k_v -я часть сыпучего материала перемещается с ускорением a_x , а $(1-k_v)$ -я часть – с ускорением a_y , поскольку k_v -я часть сыпучего материала условно может считаться неподвижной относительно решета, а оставшаяся $(1-k_v)$ -я часть – подвижной [2, 3].

Можно допустить, что изменение координаты решета имеет гармонический характер

$$x = l \sin \omega t,$$

где l – амплитуда колебаний, м. [4-10]

Скорость решета находится как производная его координаты

$$v = \frac{dx}{dt} = l\omega \cos \omega t. \quad (1)$$

Вертикальная скорость сыпучего материала с учетом (1) и в соответствии с рисунком 1 равна

$$v_y = v_x \operatorname{tg} \alpha = l\omega \cos \omega t \operatorname{tg} \alpha.$$

Ускорение решета равно

$$a_x = \ddot{x} = -l\omega^2 \sin \omega t.$$

Вертикальное ускорение опоры в соответствии с рисунком 1 принимает вид:

$$a_y = a_x \operatorname{tg} \alpha = -l\omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha.$$

Вертикальная сила равна

$$\begin{aligned} f_y &= f_g - f_{ay} = \\ &= (1 - k_v) m_z g - (1 - k_v) m_z (-a_y) = \\ &= (1 - k_v) m_z g - (1 - k_v) m_z l \omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha = \\ &= (1 - k_v) m_z (g - l \omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha). \end{aligned}$$

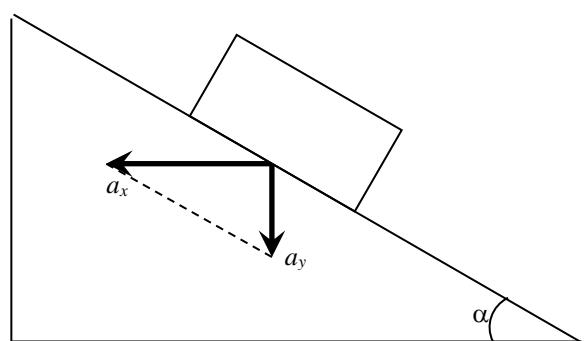


Рис. 1. Связь вертикального ускорения опоры с горизонтальным ускорением решета

Мгновенное значение мощности, развиваемой приводом при вертикальном перемещении $(1 - k_v)$ -й части сыпучего материала, имеет вид:

$$q_y = f_y v_y = (1 - k_v) m_z (g -$$

$$-l\omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha \Big) l \omega \cos \omega t \operatorname{tg} \alpha = \\ = (1 - k_v) m_z g l \omega \cos \omega t \operatorname{tg} \alpha - \\ - \frac{1}{2} (1 - k_v) m_z l^2 \omega^3 \sin 2\omega t \operatorname{tg}^2 \alpha .$$

Мгновенное значение мощности, развиваемой приводом при горизонтальном перемещении k_v -й части сыпучего материала, равно

$$q_x = k_v m_z a_x v_x = \\ = -k_v m_z l \omega^2 \sin \omega t l \omega \cos \omega t = \\ = -\frac{1}{2} k_v m_z l^2 \omega^3 \sin 2\omega t .$$

Мгновенное значение реактивно-гравитационной мощности имеет вид:

$$q = q_x + q_y =$$

q , Вт

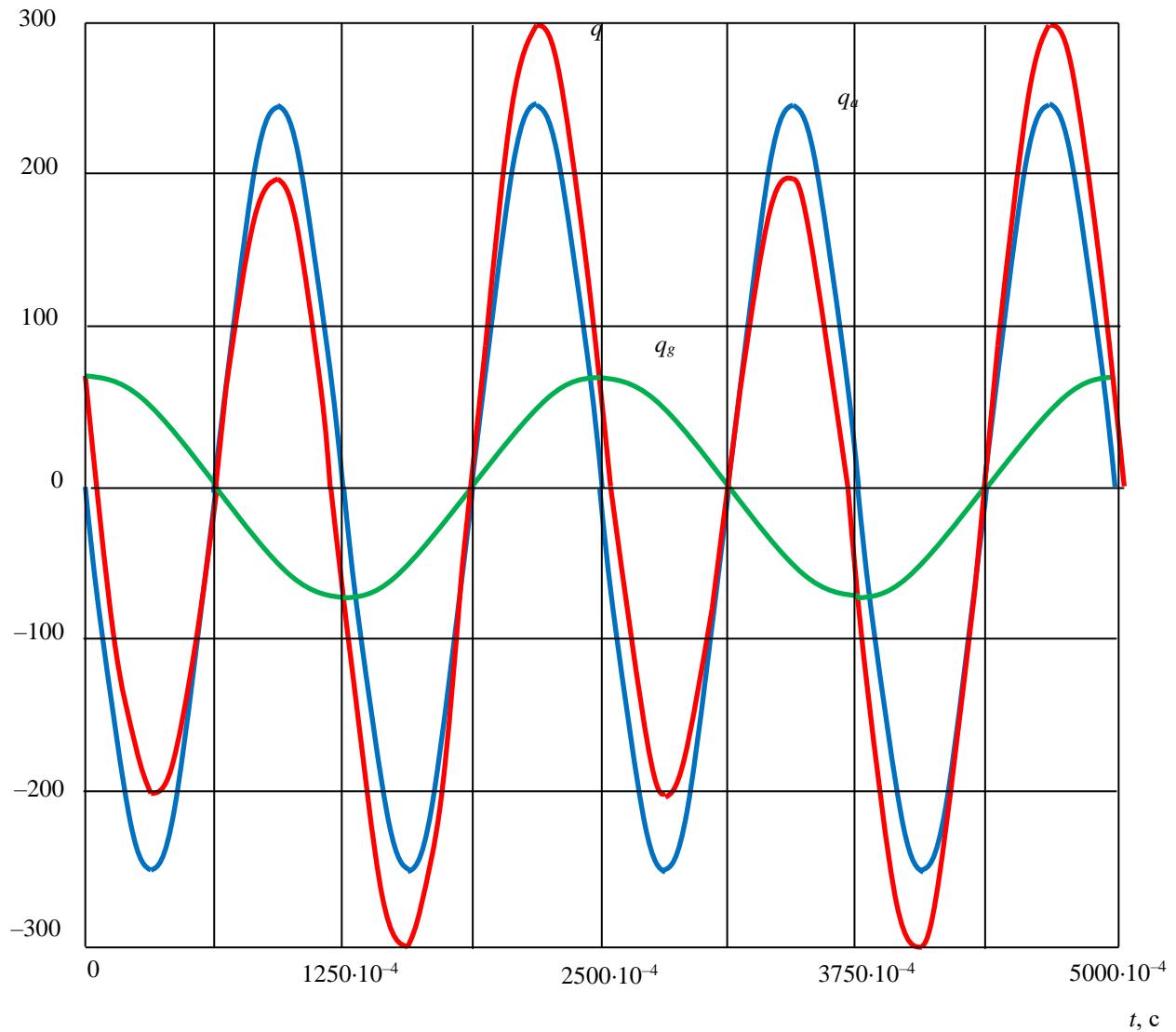


Рис. 2. Инертно-гравитационная мощность

$$= (1 - k_v) m_z g l \omega \cos \omega t \operatorname{tg} \alpha - \\ - \frac{1}{2} (1 - k_v) m_z l^2 \omega^3 \sin 2\omega t \operatorname{tg}^2 \alpha - \\ - \frac{1}{2} k_v m_z l^2 \omega^3 \sin 2\omega t = \\ = (1 - k_v) m_z g l \omega \cos \omega t \operatorname{tg} \alpha - \\ - \frac{1}{2} m_z l^2 \omega^3 \sin 2\omega t [(1 - k_v) \operatorname{tg}^2 \alpha + k_v] = \\ = q_g + q_a .$$

Гравитационная мощность равна

$$Q_g = (1 - k_v) m_z g l \omega \operatorname{tg} \alpha .$$

Реактивная мощность равна

$$Q_a = \frac{1}{2} m_z l^2 \omega^3 \left[(1 - k_v) \operatorname{tg}^2 \alpha + k_v \right].$$

Реактивная мощность при $\alpha = 0$ равна

$$Q_{a0} = \frac{1}{2} k_v m_z l^2 \omega^3.$$

На рисунке 2 представлена реактивно-гравитационная мощность сортировальной машины

Таким образом, наклон решет главным образом приводит к развитию гравитационной мощности (около 30% от реактивной мощности) и почти не влияет на реактивную мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.Д. Зависимость производительной мощности сортировальной машины от наклона решет / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.7-9.

2. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.

3. Попов И.П. Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 32-34.

4. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.

5. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.

6. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.

7. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.

8. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.

9. Павлов, В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.

10. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.

DEPENDENCE OF THE REACTIVE POWER OF THE SORTING MACHINE ON THE INCLINATION OF THE SIEVE

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The article provides an example of calculating the reactive, including gravitational, power of a sorting machine depending on the inclination of the screens. The calculation takes into account the inert, or gravitational, mass of bulk material, which leads to the development of the vertical component of its acceleration. It has been established that the inclination of the screens mainly leads to the development of gravitational power (about 30% of the reactive power) and has almost no effect on the reactive power.

Keywords: sorting machine, sieves, tilt, bulk material, vibrations, reactive power, drive.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Dependence of the Productive Capacity of the Sorting Machine on the Inclination of the Sieve. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no.1(31), pp.7-9. (In Russian).

2. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)

3. Popov I.P. Minimization of environmental damage from vibration machines [Minimizatsiya ekologicheskogo ushcherba ot vibratsionnykh mashin]. *Avtomatizirovannye*

tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2020, no. 2 (22), pp. 32-34. (In Russian)

4. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations in technical means of automation [Spontannyye uprugoinduktivnyye kolebaniya v tekhnicheskikh sredstvakh avtomatizatsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2019, no. 1 (19), pp. 18-20. (In Russian)

5. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)

6. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy

balansirovki vibratsionnykh mekhanizmov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)

7. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)

8. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)

9. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mekhanizmov s postoyannym privedennym momentom inerttsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)

10. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)

Павлов, В.Д. Зависимость реактивной мощности сортировальной машины от наклона решет / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.3-6.

V.D. Pavlov Dependence of the Reactive Power of The Sorting Machine on the Inclination of the Sieve. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.3-6. (In Russian).

КОНДАКТАНСЫ И АДМИТАНСЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Использование символического (комплексного) описания механических систем при вынужденных гармонических колебаниях (в установившемся режиме) позволило отказаться от чрезвычайно громоздкого и трудоемкого алгоритма расчета, связанного с решением дифференциальных уравнений и заменить его простыми и наглядными алгебраическими операциями. Благодаря этому время расчетов уменьшается в разы. Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

Ключевые слова: потребители механической мощности, вынужденные колебания, последовательное соединение, резонанс скоростей.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее были рассмотрены методы расчета механических вынужденных колебаний в мехатронных системах при параллельном соединении потребителей механической мощности [1].

Далее используется аналогичный подход для систем с последовательным соединением элементов.

Рассматриваются установившиеся режимы колебаний.

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах [2–10].

Используется комплексное представление гармонических и связанных с ними величин. Подобный подход широко используется в электротехнике.

СХЕМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Сила на элементах механической системы одинаковая (рис. 1)

$$f = F \cos \omega t .$$

При этом скорости отличаются

$$v_m = \frac{1}{m} \int f dt = \frac{F}{\omega m} \sin \omega t , \quad (1)$$

$$v_k = -\frac{1}{k} k \frac{dx}{dt} = \frac{1}{k} \frac{df}{dt} = -\frac{\omega F}{k} \sin \omega t , \quad (2)$$

$$v_r = \frac{f}{r} = \frac{F}{r} \cos \omega t . \quad (3)$$

Результирующая скорость:

$$\begin{aligned} v &= v_m + v_k + v_r = F \left[\left(\frac{1}{\omega m} - \frac{\omega}{k} \right) \sin \omega t + \frac{1}{r} \cos \omega t \right] = \\ &= F \sqrt{\left(\frac{1}{\omega m} - \frac{\omega}{k} \right)^2 + \frac{1}{r^2}} \left[\frac{1/(\omega m) - \omega/k}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + (1/r)^2}} \sin \omega t + \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{1/r}{\sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + (1/r)^2}} \cos \omega t \right].$$

$$\varphi = \arctg \frac{1/(\omega m) - \omega/k}{1/r} .$$

$$\begin{aligned} v &= F \sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + (1/r)^2} (\sin \varphi \sin \omega t + \cos \varphi \cos \omega t) = \\ &= F \sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + (1/r)^2} \cos(\omega t - \varphi) = V \cos(\omega t - \varphi) . \end{aligned}$$

Это выражение синусоидальной скорости для схемы последовательного соединения элементов механической системы.

Амплитуда результирующей скорости: $V = Fy$,

$$y = \sqrt{[1/(\omega m) - \omega/k]^2 + (1/r)^2} . \quad (4)$$

Из условия $1/(\omega m) - \omega/k = 0$ следует классическое выражение $\omega = \sqrt{k/m}$, полученное значительно проще классического решения. При этом происходит *резонанс скоростей*. При $1/r = 0$, $y = 0$. Механизм препятствует (абсолютно) источнику колебаний.

КОМПЛЕКСНОЕ ОПИСАНИЕ ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ

Алгоритм рассмотрения такой же, как и при параллельном соединении.

$$f = F \cos \omega t = \operatorname{Re}(Fe^{i\omega t}) ,$$

$$\dot{F} = Fe^{\frac{i\pi}{2}} .$$

Из выражения (1) следует, что f опережает по фазе v_m на $\pi/2$. Таким образом,

$$\dot{V}_m = -\frac{1}{\omega m} \dot{F} e^{\frac{i\pi}{2}} = \frac{1}{\omega m} \dot{F} = \underline{b}_m \dot{F} .$$

$$\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-\frac{i\pi}{2}} = -i \frac{1}{\omega m} = \frac{1}{\omega m} .$$

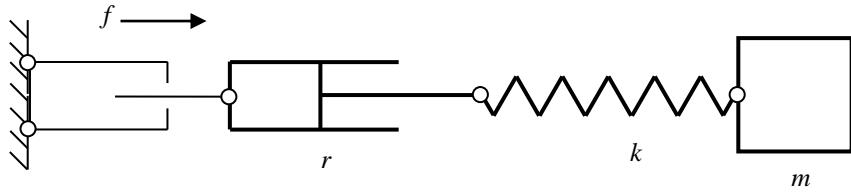


Рис. 1. Схема последовательного соединения

Это *инертный сасцептанс* (susceptance) в комплексной записи.

Амплитуда инертной скорости (в комплексном изображении) имеет вид:

$$\dot{V}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} F e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{\omega m} F e^{i\varphi_0}.$$

Точно также, имея в виду (2) и (3),

$$\dot{V}_k = \frac{\omega}{k} \dot{F} e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{x_k} \dot{F} = \underline{b}_k \dot{F}.$$

$$\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} = i \frac{\omega}{k} = \frac{1}{x_k}.$$

Это *упругий сасцептанс* в комплексной записи.

В соответствии с этим амплитуды упругой и резистивной скоростей (в комплексном изображении) имеют вид:

$$\dot{V}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} F e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{\omega}{k} F e^{i\pi}.$$

$$\dot{V}_r = \frac{1}{r} \dot{F} = g \dot{F} = g F e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

$$g = g = \frac{1}{r}.$$

Это *кондактанс* (conductance) в комплексной записи.

Комплексные представления механических *сасцептанса* и *адmittанса* (admittance):

$$\underline{b} = \underline{b}_k + \underline{b}_n = \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}},$$

$$\underline{y} = g + \underline{b} = g + \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Абсолютная величина последнего совпадает с (4)

$$Y = \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2} = \sqrt{\frac{1}{r^2} + \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right)^2}.$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_k - b_m}{g} = \arctg \frac{\omega/k - 1/(\omega m)}{g} =$$

$$= \arctg \left[(m\omega - k/\omega) \frac{r}{mk} \right].$$

$$\underline{y} = Y e^{i\varphi}.$$

Скорость штока внешнего источника имеет вид:

$$\dot{V} = \underline{y} \dot{F} = Y e^{i\varphi} F e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i(\varphi + \frac{\pi}{2})}.$$

Пример 1. Отличие от примера 1 в [1] состоит в том, что элементы соединены последовательно.

$$\underline{b}_m = x_m^{-1} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} (\kappa \varepsilon^{-1} \cdot c),$$

$$\underline{b}_k = x_k^{-1} = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} (\kappa \varepsilon^{-1} \cdot c),$$

$$\begin{aligned} g &= r^{-1} = 14,286 \cdot 10^{-2} (\kappa \varepsilon^{-1} \cdot c). \\ Y &= \sqrt{g^2 + (b_k - b_m)^2} = \\ &= \sqrt{(14,286 \cdot 10^{-2})^2 + (10 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2})^2} = 15,135 \cdot 10^{-2} (\kappa \varepsilon^{-1} \cdot c). \\ \varphi &= \arctg \frac{b_k - b_m}{g} = \arctg \frac{10 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}}{14,286 \cdot 10^{-2}} = 19,29^\circ, \\ \underline{y} &= Y e^{i\varphi} = 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} (\kappa \varepsilon^{-1} \cdot c). \\ \dot{V} &= \underline{y} \dot{F} = 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} \cdot 100 = 15,135 e^{i19,29^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}), \\ \dot{V}_m &= \underline{b}_m \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 100 = 5 e^{-i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}), \\ \dot{V}_k &= \underline{b}_k \dot{F} = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 = 10 e^{i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}), \\ \dot{V}_r &= g \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 14,286 (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}). \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать,

$$\begin{aligned} \dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r &= 5 e^{-i90^\circ} + 10 e^{i90^\circ} + \\ &+ 14,286 = 15,135 e^{i19,29^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}) = \dot{V} \end{aligned}$$

Расчет с применением дифференциальных уравнений занял бы несколько страниц.

Данным примера 1 соответствует векторная диаграмма на рисунке 2.

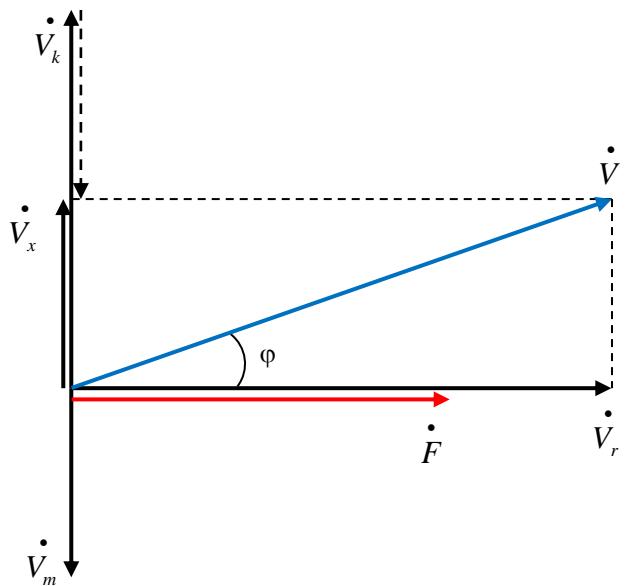


Рис. 2. Последовательное соединение

Пример 2. Для резонанса скоростей. Отличие от примера 2 в [1] состоит в том, что элементы соединены последовательно.

$$\begin{aligned} b_k &= 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} (\text{кг}^{-1} \cdot \text{с}), \\ Y &= g = 14,286 \cdot 10^{-2} (\text{кг}^{-1} \cdot \text{с}), \\ \varphi &= 0^\circ, \\ y &= Ye^{i\varphi} = 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} (\text{кг}^{-1} \cdot \text{с}), \\ \dot{V} &= \dot{y}F = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 14,286e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}), \\ \dot{V}_k &= \dot{b}_k \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 = 5e^{i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}). \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать,

$$\begin{aligned} \dot{V}_m + \dot{V}_k + \dot{V}_r &= 5e^{-i90^\circ} + 5e^{i90^\circ} + 14,286 = \\ &= 14,286e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}) = \dot{V} = \dot{V}_r \end{aligned}$$

Данным примера 2 соответствует векторная диаграмма на рисунке 3.

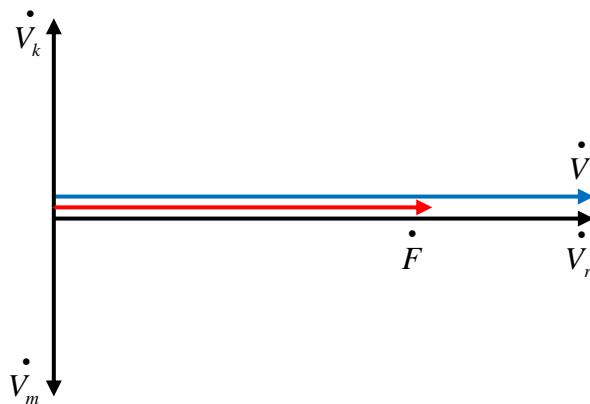


Рис. 3. Резонанс скоростей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование символического (комплексного) описания механических систем при вынужденных гармонических колебаниях (в установившемся режиме) позволило отказаться от чрезвычайно громоздкого и трудоемкого алгоритма расчета, связанного с решением дифференциальных уравнений и заменить его простыми и наглядными

алгебраическими операциями. Благодаря этому время расчетов уменьшается в разы.

Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, И.П. Реактансы и сасцептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.
2. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.
3. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.
4. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
5. Попов И.П. Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 32-34.
6. Попов И.П. Инерто-индуктивные колебания в мекатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.
7. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.
8. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / И.П. Попов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
9. Павлов, В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.
10. Попов И.П. Резонанс сил в мекатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.

CONDUCTIONS AND ADMITANCES OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH SERIAL CONNECTION OF ELEMENTS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmst.ru

Abstract. The use of a symbolic (complex) description of mechanical systems with forced harmonic oscillations (in steady state) made it possible to abandon the extremely cumbersome and labor-intensive calculation algorithm associated with solving differential equations and replace it with simple and clear algebraic operations. Due to this, the calculation time is reduced several times. Vector diagrams, while not being a nec-

essary component of the study of mechanical systems, have significant methodological significance, since they show quantitative and phase relationships between the parameters of the systems

Keywords: consumers of mechanical power, forced oscillations, series connection, speed resonance.

REFERENCES

1. Popov I.P. Reactance and Susceptances of Mechatronic Systems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i saszeptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025, no.1(31), pp.10-14. (In Russian).
2. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations in technical means of automation [Spontannyye uprugoo-induktivnyye kolebaniya v tekhnicheskikh sredstvakh avtomatizatsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2019, no. 1 (19), pp. 18-20. (In Russian)
3. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mehanizmov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)
4. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
5. Popov I.P. Minimization of environmental damage from vibration machines [Minimizatsiya ekologicheskogo ushcherba ot vibratsionnykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 2 (22), pp. 32-34. (In Russian)
6. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)
7. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
8. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
9. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mehanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)
10. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)

Попов, И.П. Кондактансы и адмитансы мехатронных систем при последовательном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.7-10.

I.P. Popov Conductances and Admittances of Mechatronic Systems with Serial Connection of Elements. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no.2(32), pp.7-10. (In Russian).

ОПТИМИЗАЦИЯ СМЕЩЕНИЯ ФАЗ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СОРТИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. Рассматривается вопрос снижения энергопотребления сортировальной машины за счет оптимизации фаз колебания ее рабочих органов. Показано, что задача параметрической оптимизации заключается в отыскании (путем сравнения дискретных значений) среди элементов допустимого множества Z (сдвигов фаз колебаний решетных станов) такого элемента, который доставляет минимальное значение целевой функции, под которой понимается энергия, потребляемая из сети. Критерием поиска является «min». Оптимальный сдвиг фаз колебаний решетных станов равен $\pi/2$, что совпадает с результатом решения аналитической оптимизационной задачи. При этом целевая функция принимает минимальное значение.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация; фазы колебаний; целевая функция; критерий поиска.

Просяивание и сортировка по фракциям сыпучих строительных материалов и зерна в сельском хозяйстве осуществляется на решетных станах. Как правило, в таких станах решета располагаются в несколько рядов с увеличением размеров ячеек сверху вниз. В процессе работы решета перемещаются в поперечном направлении, улучшая подвижность просеиваемых материалов. Амплитуда и частота колебаний решетных станов подбирается экспериментальным путем и зависит от свойств просеиваемых материалов. В условиях высокой производительности через решета просеиваются сотни кубометров зерна или сыпучих материалов в сутки. В таких масштабах расходы энергии для привода станов будут значительны. Это приводит к необходимости оптимизации параметров их работы. Для этих целей производится подбор амплитуды и частоты колебания [1-4], а также создание кинематически уравновешенных схем привода решетных станов [5-8]. Существующие исследования направлены на обеспечение оптимальных конструктивных характеристик сортировальных машин, а также на снижение их энергопотребления.

Для решения задачи уравновешивания решетных станов предлагается обеспечивать оптимальное смещение фаз колебаний за счет системного подхода, в котором схема колебаний решетных станов рассматривается как кинематическая система с дискретной обратной связью. В качестве целевой функции принята мощность привода станов.

Решение задачи представлено на примере зерноочистительной машины ОЗС-50. Кинематическая схема которой (рис. 1) позволяет, не изменяя конструкцию эксцентриковых валов 3, обеспечить смещение фазы колебаний любой пары решетных станов 1 на некоторый угол ζ за счет относительного разворота эксцентриковых валов 3. Это выполняется при размыкании цепной передачи 4. При этом оба решетных стана верхней пары и оба решетных стана нижней пары продолжают работать в противофазе, что обеспечивает динамическую уравновешенность ма-

шины. Комплект измерительный К505 подключается к цепи питания электродвигателя 6.

Звездочки цепной передачи 4 имеют по 20 зубьев. Следовательно, поворот любой из них на один зуб поворачивает соответствующий эксцентриковый вал на 18 градусов ($\zeta = 2\pi/20$). Таким образом, измерения могут проводиться лишь для дискретных значений ζ с шагом дискретности 18 град. симметрично относительно значения $\zeta = \pi/2$.

Для каждого конкретного значения ζ определяется полная мощность, потребляемая из сети.

Задача параметрической оптимизации заключается в отыскании (путем сравнения дискретных значений) среди элементов ζ допустимого множества Z (сдвигов фаз колебаний решетных станов $\zeta = \zeta_1 - \zeta_2$) такого элемента ζ^* , который доставляет минимальное значение $w(\zeta^*)$ целевой функции $w(\zeta)$, под которой понимается энергия, потребляемая из сети. Критерием поиска является «min».

Поскольку допустимое множество Z охватывает лишь часть возможных значений сдвига фаз колебаний, то оптимизация может считаться условной.

В соответствии с существующей классификацией использованный метод оптимизации является локальным, параметрическим, детерминированным, одномерным, численным, комбинаторным, прямым, методом дискретного программирования.

Измеренные значения целевой функции $w(\zeta)$ (энергии, потребляемой из сети) для дискретных (с шагом дискретности 18 град.) значений элементов ζ допустимого множества Z (множество сдвигов фаз колебаний решетных станов $\zeta = \zeta_1 - \zeta_2$) приведены в таблице.

Таблица – Определение оптимального сдвига фаз колебаний решетных станов

ζ , град	54	72	90	108	126
$w(\zeta)$, Вт	978	692	375	684	965

График целевой функции $w(\zeta)$ представлен на рисунке 2.

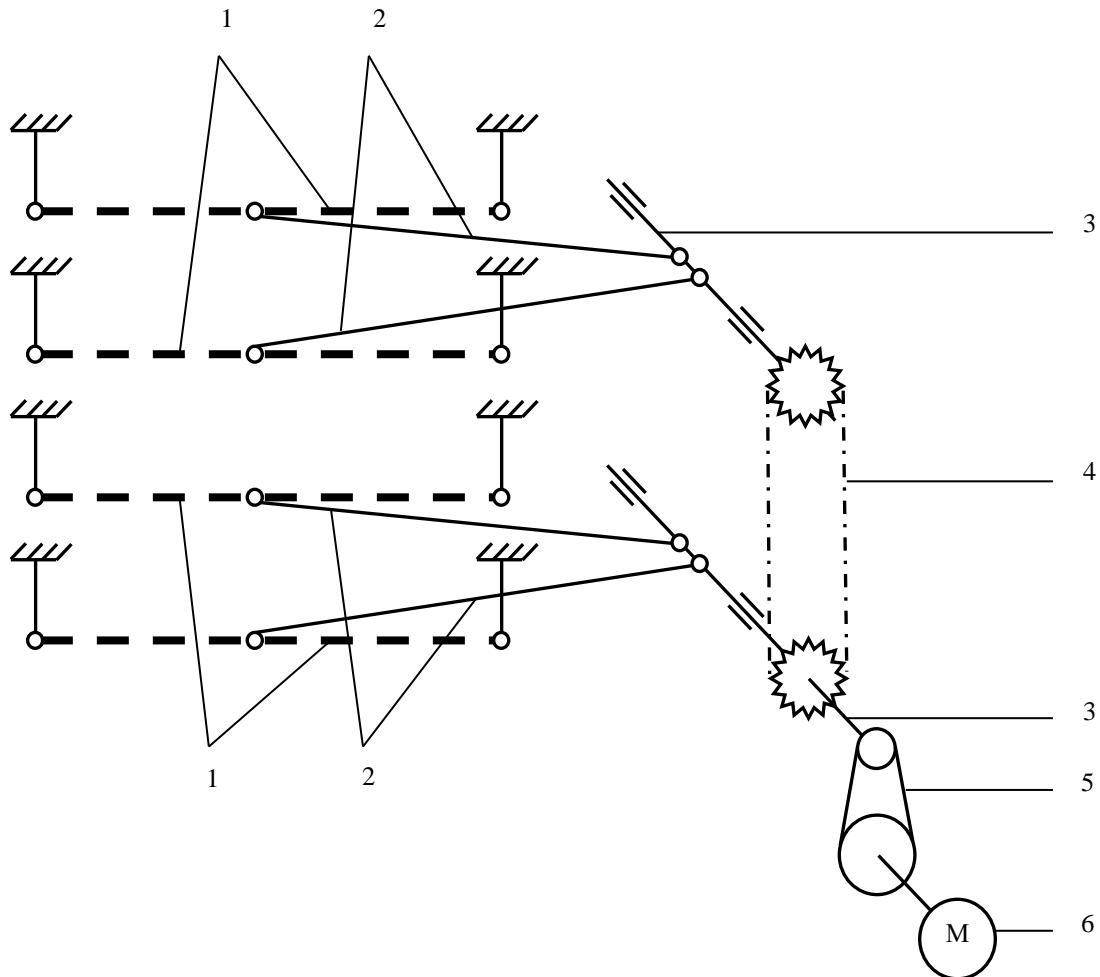


Рис. 1. Кинематическая схема привода решетных станов ОЗС-50
 1 – решетные станы; 2 – шатуны; 3 – эксцентриковые валы;
 4 – цепная передача; 5 – клиноременная передача; 6 – электродвигатель

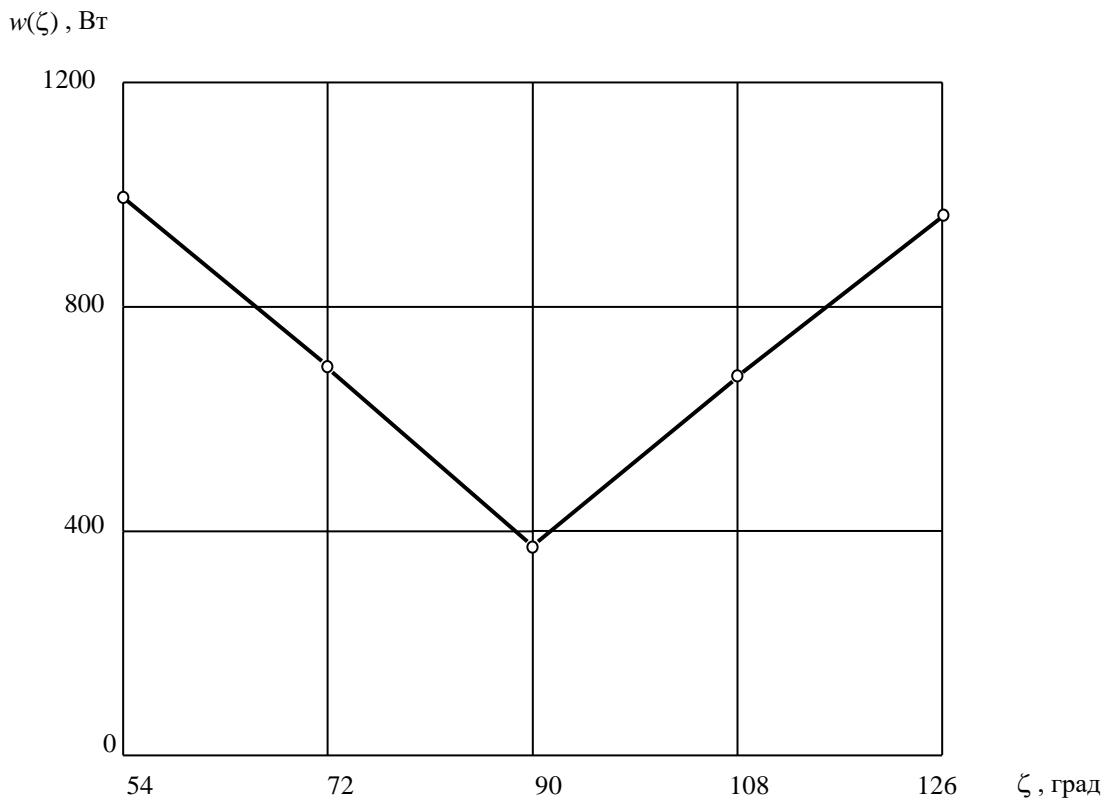


Рис. 2. График целевой функции $w(\zeta)$

Оптимальный сдвиг фаз колебаний решетных станов ζ равен $\pi/2$, что совпадает с результатом решения аналитической оптимизационной задачи. При этом целевая функция $w(\zeta)$ принимает минимальное значение 375 Вт.

Использование приведенной методики позволяет определить оптимальное смещение фаз колебаний решетных станов и минимизировать их энергопотребление за счет рациональной установки фаз. Дополнительно это способствует уменьшению нагрузок и снижает износ шарнирных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

- Павлов В.Д. Зависимость производительной мощности сортировальной машины от наклона решет / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.7-9.
- Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.
- Попов И.П. Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 32-34.
- Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.
- Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.
- Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.
- Павлов, В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.
- Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.

OPTIMIZATION OF THE PHASE SHIFT OF OSCILLATIONS OF THE WORKING BODIES OF A SORTING MACHINE

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The issue of reducing the energy consumption of a sorting machine by optimizing the oscillation phases of its working elements is considered. It is shown that the parametric optimization problem consists in finding (by comparing discrete values) among the elements of the admissible set Z (phase shifts of oscillations of screen mills) such an element that delivers the minimum value of the objective function, which is understood as the energy consumed from the network. The search criterion is "min". The optimal phase shift of oscillations of screen mills is equal to $\pi/2$, which coincides with the result of solving the analytical optimization problem. In this case, the objective function takes a minimum value

Keywords: parametric optimization; oscillation phases; objective function; search criterion.

REFERENCES

1. Pavlov V.D. Dependence of the Productive Capacity of the Sorting Machine on the Inclination of the Sieve. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no.1(31), pp.7-9. (In Russian).
2. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
3. Popov I.P. Minimization of environmental damage from vibration machines [Minimizatsiya ekologicheskogo ushcherba ot vibratsionnykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2020, no. 2 (22), pp. 32-34. (In Russian)
4. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mekhanizmov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
5. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
6. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
7. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mekhanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)
8. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)

Павлов, В.Д. Оптимизация смещения фаз колебаний рабочих органов сортировальной машины / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производство. 2025. №2(32). С.11-14.

V.D. Pavlov Optimization of the Phase Shift of Oscillations of the Working Bodies of a Sorting Machine. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2025. no.2(32), pp.11-14. (In Russian).

УДК 004.896

АНАЛИЗ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ТРЁХДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

И.П. Кудашов, К.Х. Гильфанов, В.Ю. Корнилов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация

f.enoha@mail.ru

Аннотация. В статье автор рассматривает понятие колаборативного робота, его структуру, принципы функционирования и особенности взаимодействия с человеком. Подробно описываются современные системы промышленной автоматизации, в которых используются колаборативные роботы, а также направления их применения в производственных и исследовательских процессах. Особое внимание уделяется внедрению трёхдвигательных электроприводов в конструкцию и схему управления колаборативных систем, что позволяет повысить точность, плавность и координацию движений звеньев робота. Кроме того, в статье анализируются преимущества, ограничения и перспективы использования таких систем при решении инженерных задач, рассматриваются вопросы безопасности, энергоэффективности и интеграции с интеллектуальными алгоритмами управления. Таким образом, работа направлена на расширение возможностей современных мехатронных комплексов и повышение эффективности совместной работы человека и робота.

Ключевые слова: колаборативный робот, кобот, трехдвигательный электропривод, устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность внедрения колаборативных роботов в промышленность, медицину и сервисные системы растёт с каждым годом. Благодаря им, взаимодействие с человеком происходит более безопасно, что не всегда возможно с традиционными промышленными роботами. А обеспечение адаптивности, плавности и точности движений достигается благодаря использованию в таких роботах трёхдвигательных схем, которые позволяют эффективно управлять несколькими уровнями свободы звена.

КОЛЛАБОРАТИВНЫЙ РОБОТ

Понятие «колаборативный робот» или же сокращённо «кобот» подразумевает автоматизированное устройство, которое используется для выполнения задач совместно с человеком в одном рабочем пространстве. В отличие от традиционных промышленных роботов, они не могут работать автономно, соответственно – их применение направлено не на замену оператора полностью, а на дополнение его возможностей [1]. Чаще всего функционал коботов помогает реализовывать монотонные, неудобные или требующие высокой точности операции, в то время как на человека возлагается ответственность за задачи с применением когнитивных навыков или опыта, принятием решений [2-3].

В качестве составляющих колаборативного робота можно выделить три основные подсистемы: исполнительную, сенсорную и управляющую [4]. К исполнительной подсистеме относятся электроприводы, обеспечивающие дви-

жение звеньев и манипулятора. Сенсорная подсистема включает в себя датчики положения, момента, силы, передающие обратную связь. В управляющую подсистему входят контроллеры с алгоритмами адаптивного и безопасного управления, часть подсистем представлена на рисунке 1 [5].



Рис. 1. Структура колаборативного робота

ТРЕХДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Для достижения высокой точности позиционирования, плавности движений и возможности исполнения сложных траекторий колаборативные роботы оснащаются трёхдвигательным электроприводом [6]. В нём три электродвигателя работают согласованно, реализуя разные степени свободы вращения, наклона и поступательного перемещения, как пример. Для управления механизмом чаще

всего используются каскадные или координатные системы [7-8].

Использование трёхдвигательных электроприводов в колаборативных роботах имеет свои преимущества: повышенная точность позирования, высокая динамика, адаптивное управление, надёжность и модульность конструкции. Однако у подобной системы есть некоторые ограничения, такие как сложность управления, необходимость сложной системы охлаждения, высокие требования к вычислительным мощностям контроллера, повышенная масса и энергопотребление [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение трёхдвигательных электроприводов в колаборативных роботах – это процесс, требующий детального анализа функциональных возможностей данной системы. В результате сопоставления преимуществ и ограничений можно сказать, что использование подобных устройств упрощает структуру многих промышленных процессов и сокращает время их выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов С. А. Системы управления движением промышленных и сервисных роботов. — М.: Академия, 2021. — 416 с.
2. Гильфанов К. Х., Гайнуллин Р. Н., Нгуен Т. Энергосберегающая система отопления объектов электроэнергетики. — К.: Вестник Казанского

государственного энергетического университета, 2020. — Т. 12. №1 (45). С. 46-53.

3. Тимофеев Д. В. Коллаборативные роботы: архитектура, управление, безопасность. — М.: Инфра-М, 2022. — 256 с.

4. Воронов, А. А. Мехатронные системы: теория и практика. — М.: Издательский дом МЭИ, 2018. — 312 с.

5. Попкова О. С., Файзуллина А. И., Гильфанов К. Х. Определение параметров для эффективного горения малосернистого мазута. — К.: Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2017. — №132. С. 1267-1276.

6. Клюев, В. В. Электроприводы и системы автоматического управления движением. — М.: Академия, 2019. — 368 с.

7. Киселёв А. В. Робототехнические системы: колаборативные и промышленные роботы. — М.: Издательский дом МЭИ, 2020. — 284 с.

8. Соловьев, В. В., Степанов, Г. Н. Электромеханические системы и приводы автоматики. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 412 с.

9. Фёдоров И. Е. Интеллектуальные мехатронные модули в робототехнике. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 298 с.

ANALYSIS AND FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF COLLABORATIVE ROBOTS BASED ON THREE-MOTOR ELECTRIC DRIVES

I.P. Kudashov, K.Kh. Gilfanov, V.Yu. Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Abstract. In this article, the author examines the concept of collaborative robots, their structure, operating principles, and features of interaction with humans. It provides a detailed description of modern industrial automation systems that use collaborative robots, as well as their applications in manufacturing and research processes. Particular attention is paid to the implementation of three-motor electric drives in the design and control scheme of collaborative systems, which improves the accuracy, smoothness, and coordination of robot movements. In addition, the article analyzes the advantages, limitations, and prospects of using such systems in solving engineering problems, and considers issues of safety, energy efficiency, and integration with intelligent control algorithms. Thus, the work is aimed at expanding the capabilities of modern mechatronic complexes and increasing the efficiency of human-robot collaboration.

Keywords: collaborative robot, cobot, three-motor electric drive, device.

REFERENCES

1. Romanov, S. A. Sistemy upravleniya dvizheniem promyshlennykh i servisnykh robotov [Motion control systems for industrial and service robots]. M.: Akademia, 2021. 416 p. (In Russian)
2. Gilfanov K. Kh., Gainullin R. N., Nguyen T. Energosberegayushchaya sistema otopleniya dlya energeticheskikh ob'ektorov [Energy-saving heating system for electric power facilities]. — К.: Bulletin of Kazan State Power University, 2020. — vol. 12. no. 1 (45). pp. 46-53.
3. Timofeev D. V. Kollaborativnye robony: arkhitektura, upravlenie, bezopasnost' [Collaborative robots: architecture, control, safety]. — M.: Infra-M, 2022. — 256 p.
4. Voronov, A. A. Mekhatronnye sistemy: teoriya i praktika [Mechatronic systems: theory and practice]. — M.: MEI Publishing House, 2018. — 312 p.
5. Popkova O. S., Faizullina A. I., Gilfanov K. Kh. Opre-delenie parametrov effektivnogo sgoraniya nizkosernistogo mazuta [Determination of parameters for efficient combustion of low-sulfur fuel oil]. — К.: Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University, 2017. — no. 132. pp. 1267-1276.

6. Klyuev, V. V. Elektroprivody i avtomatizirovannye sistemy upravleniya dvizheniem [Electric drives and automatic motion control systems]. — M.: Academy, 2019. — 368 p.
7. Kiselev, A. V. Robototekhnicheskie sistemy: kollaborativnye i promyshlennye roboty [Robotic systems: collaborative and industrial robots]. M.: MEI Publishing House, 2020. 284 p.
8. Solodovnikov, V. V., Stepanov, G. N. Elektromekhanicheskie sistemy i privody avtomatizatsii [Electromechanical systems and automation drives]. M.: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2016. 412 p.
9. Fedorov, I. E. Intellektual'nye mekhatronnye moduli v robototekhnike [Intelligent Mechatronic Modules in Robotics]. — St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2020. — 298 p.

Кудашов, И.П. Анализ и особенности построения колаборативных роботов на основе трёхдвигательных электроприводов/ И.П. Кудашов, К.Х. Гильфанов, В.Ю. Корнилов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.15-17.

I.P. Kudashov, K.Kh. Gilfanov, V.Yu. Kornilov Analysis and Features of the Construction of Collaborative Robots Based on Three-Motor Electric Drives. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.15-17. (In Russian).

СВЯЗЬ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Аннотация. Доказаны четыре теоремы и приведены одиннадцать следствий из них, связывающих механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях.

Ключевые слова: реактанс, импеданс, сассептанс, кондактанс, адмитанс, резистанс.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее [1] определены следующие величины.

Инертный и упругий реактансы в комплексном изображении –

$$\begin{aligned} \underline{x}_m &= \omega m e^{i\frac{\pi}{2}} = i\omega m, \\ \underline{x}_k &= -\frac{k}{\omega} e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i \frac{k}{\omega}. \end{aligned}$$

Резистанс в комплексном изображении –

$$\underline{r} = r.$$

Импеданс в комплексном изображении –

$$\underline{z} = r + \underline{x} = r + \left(m\omega - \frac{k}{\omega} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Инертный и упругий сассептансы в комплексном изображении –

$$\begin{aligned} \underline{b}_m &= \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i \frac{1}{\omega m} = \frac{1}{\underline{x}_m}, \\ \underline{b}_k &= \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} = i \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\underline{x}_k}. \end{aligned}$$

Кондактанс в комплексном изображении –

$$\underline{g} = g = \frac{1}{r}.$$

Адмитанс в комплексном изображении –

$$\underline{y} = g + \underline{b} = g + \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Очевидны выражения

$$\dot{\underline{F}} = \dot{\underline{z}} \dot{\underline{V}} = Z V e^{i\phi}, \quad (1)$$

$$\dot{\underline{V}} = \underline{y} \dot{\underline{F}} = Y e^{i\phi} \underline{F} e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i(\phi+\frac{\pi}{2})}. \quad (2)$$

Целью исследования является значительное упрощение вычислений путем замены необходимости решения дифференциальных уравнений на алгебраические методы.

Задачи исследования состоят в разработке алгоритмов расчетов разветвленных механических систем.

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах [2–10].

СВЯЗЬ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Теорема 1. Имеет место выражение:

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}.$$

Доказательство. С учетом (1)

$$\underline{z} = \frac{\dot{\underline{F}}}{\dot{\underline{V}}}.$$

С учетом (2)

$$\underline{y} = \frac{\dot{\underline{V}}}{\dot{\underline{F}}} = \frac{1}{\underline{z}}.$$

Теорема доказана.

Следствие. При $r = 0$

$$\underline{b} = \frac{1}{\underline{x}},$$

т.к. при этом $\underline{y} = \underline{b}$, $\underline{z} = \underline{x}$.

Теорема 2. Для обратных эквивалентных величин имеют место выражения:

$$g^* = \frac{r}{r^2 + x^2},$$

$$\underline{b}^* = \frac{x}{r^2 + x^2} e^{-i\frac{\pi}{2}},$$

$$r^* = \frac{g}{g^2 + b^2},$$

$$x^* = \frac{b}{g^2 + b^2} e^{-\frac{i\pi}{2}}.$$

Доказательство.

$$\underline{z} = r + \underline{x} = r + ix,$$

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \frac{1}{\underline{z}} = \frac{1}{r+ix} \frac{r-ix}{r-ix} = \frac{r-ix}{r^2+x^2} = \frac{r}{r^2+x^2} - i \frac{x}{r^2+x^2} = g^* + \underline{b}^*, \\ \underline{y} &= g + \underline{b} = g + ib, \\ \underline{z} &= \frac{1}{\underline{y}} = \frac{1}{g+ib} \frac{g-ib}{g-ib} = \frac{g-ib}{g^2+b^2} = \\ &= \frac{g}{g^2+b^2} - i \frac{b}{g^2+b^2} = r^* + \underline{x}^*. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Теорема 3. Для схемы последовательного соединения механических систем имеет место выражение:

$$\underline{y} = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j.$$

Доказательство. На все составляющие механические системы воздействует одна сила \dot{F} . Для любой из механических систем с учетом (2) можно записать

$$\dot{V}_j = \underline{y}_j \dot{F}.$$

В соответствии с принципом суперпозиции

$$\dot{V} = \sum_{j=1}^n \dot{V}_j = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j \dot{F} = \dot{F} \sum_{j=1}^n \underline{y}_j = \dot{F} \underline{y}.$$

Теорема доказана.

Следствие 1.

$$\frac{1}{\underline{z}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{z}_j}.$$

Следствие 2.

$$\underline{z} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \underline{z}_j}.$$

Следствие 3. Импеданс любой из составляющих механических систем больше эквивалентного импеданса

Следствие 4. Если $\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = \dots = \underline{z}_n = \underline{z}^*$, то

$$\underline{z} = \frac{\underline{z}^*}{n}.$$

Следствие 5.

$$\lim_{\underline{z} \rightarrow \infty} \underline{z} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{\substack{j=2 \\ j \neq k}}^n \underline{z}_j}.$$

Теорема 4. Для схемы параллельного соединения механических систем имеет место выражение:

$$\underline{z} = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j.$$

Доказательство. Все составляющие механические системы имеют одну скорость \dot{V} . Для любой из составляющих механических систем с учетом (1) можно записать

$$\dot{F}_j = \underline{z}_j \dot{V}.$$

В соответствии с принципом суперпозиции

$$\dot{F} = \sum_{j=1}^n \dot{F}_j = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j \dot{V} = \dot{V} \sum_{j=1}^n \underline{z}_j = \dot{V} \underline{z}.$$

Теорема доказана.

Следствие 1.

$$\frac{1}{\underline{y}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{y}_j}.$$

Следствие 2.

$$\underline{y} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \underline{y}_j}.$$

Следствие 3. Адmittанс любой из составляющих механических систем больше эквивалентного admittанса/

Следствие 4. Если $\underline{y}_1 = \underline{y}_2 = \dots = \underline{y}_n = \underline{y}^*$, то

$$\underline{y} = \frac{\underline{y}^*}{n}.$$

Следствие 5.

$$\lim_{\underline{y} \rightarrow \infty} \underline{y} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{\substack{j=2 \\ j \neq k}}^n \underline{y}_j}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, И.П. Реактансы и сассептансы мехатронных систем при параллельном соединении элементов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №1(31). С.10-14.

2. Попов И.П. Спонтанные упруго-индуктивные колебания в технических средствах автоматизации / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2019. № 1 (19). С. 18-20.

3. Попов И.П. О возможности автоматизированной балансировки вибрационных механизмов / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 10-12.

4. Попов И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 1 (21). С. 19-21.

5. Попов И.П. Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. № 2 (22). С. 32-34.

6. Попов И.П. Инертно-индуктивные колебания в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2022. № 1 (25). С. 23–25.

7. Павлов В.Д. Паразитные вибрации в автоматизированных комплексах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 10-12.

8. Павлов В.Д. Вибратор для автоматизированных комплексов / И.П. Попов / И. П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 20-22.

-
9. Павлов, В.Д. Условия автобалансировки вибрационных механизмов с постоянным приведенным моментом инерции // Автоматизированые технологии и производства. 2024. №2(30). С.16-18.
10. Попов И.П. Резонанс сил в мехатронных системах / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2024. № 1 (29). С. 17-19.

RELATIONSHIP BETWEEN MECHANICAL QUANTITIES OF MECHATRONIC SYSTEMS UNDER FORCED OSCILLATIONS

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

e-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Abstract. Four theorems are proved and eleven consequences from them are given, connecting mechanical quantities of mechatronic systems under forced oscillations.

Keywords: reactance, impedance, susceptance, conductance, admittance, resistance

REFERENCES

1. Popov I.P. Reactance and Susceptances of Mechatronic Systems With Parallel Connection of Elements [Reaktansy i saszeptansy mekhatronnykh sistem pri parallel'nom soyedinenii elementov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2025. no.1(31), pp.10-14. (In Russian).
2. Popov I.P. Spontaneous elastic-inductive oscillations in technical means of automation [Spontannyye uprugo-induktivnyye kolebaniya v tekhnicheskikh sredstvakh avtomatizatsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2019, no. 1 (19), pp. 18-20. (In Russian)
3. Popov I.P. On the possibility of automated balancing of vibration mechanisms [O vozmozhnosti avtomatizirovannoy balansirovki vibratsionnykh mehanizmov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020, no. 1 (21), pp. 10-12. (In Russian)
4. Popov I.P. Concurrent optimization of the productive capacity of screen sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020, no. 1 (21), pp. 19-21. (In Russian)
5. Popov I.P. Minimization of environmental damage from vibration machines [Minimizatsiya ekologicheskogo ushcherba ot vibratsionnykh mashin]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2020, no. 1 (21), pp. 22-24. (In Russian)
6. Popov I.P. Inertial-inductive oscillations in mechatronic systems [Inertno-induktivnyye kolebaniya v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2022, no. 1 (25), pp. 23–25. (In Russian)
7. Pavlov V.D. Parasitic vibrations in automated complexes [Parazitnyye vibratsii v avtomatizirovannykh kompleksakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 10-12. (In Russian)
8. Pavlov V.D. Vibrator for automated complexes [Vibrator dlya avtomatizirovannykh kompleksov]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 20-22. (In Russian)
9. Pavlov, V.D. Conditions of auto-balancing of vibration mechanisms with a constant reduced moment of inertia [Usloviya avtobalansirovki vibratsionnykh mehanizmov s postoyannym privedennym momentom inertsii]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 2(30), pp.16-18. (In Russian)
10. Popov I.P. Resonance of forces in mechatronic systems [Rezonans sil v mekhatronnykh sistemakh]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2024, no. 1 (29), pp. 17-19. (In Russian)

Попов, И.П. Связь между механическими величинами мехатронных систем при вынужденных колебаниях / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.18-20.

I.P. Popov Relationship Between Mechanical Quantities Of Mechatronic Systems Under Forced Oscillations. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.18-20. (In Russian).

Автоматизированные системы управления

УДК 681.5:621-52

АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМИ МЕХАТРОННЫМИ МОДУЛЯМИ: ОТ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ К РАСПРЕДЕЛЕННЫМ СЕТЯМ

В.В. Юртаев, В.Ю. Корнилов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

vladis.yurtaeff2017@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается процесс эволюции архитектур систем управления для многодвигательных мехатронных модулей. Рассмотрены три основных класса архитектур: централизованные, децентрализованные и распределенные сетевые. Выявлены ключевые тенденции развития, заключающиеся в переходе от жестких иерархических структур к гибким, масштабируемым и отказоустойчивым сетевоцентрическим решениям. Проанализированы преимущества и недостатки каждой архитектуры с точки зрения быстродействия, надежности, сложности разработки и сопровождения. Определено, что современные распределенные архитектуры на базе промышленных сетей, таких как EtherCAT, являются наиболее перспективным направлением для построения высокопроизводительных и надежных мехатронных систем.

Ключевые слова: мехатронный модуль, многодвигательный привод, архитектура системы управления, централизованное управление, распределенное управление, промышленные сети, EtherCAT, интеллектуальный привод.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности является ключевой задачей не только для традиционных энергетических установок [1] или объектов большой энергетики [2], но и также для мехатронных модулей. Растут скорость и точность обработки деталей, что в свою очередь повышает требования к системам управления мехатронным технологическим оборудованием [3].

Компьютеру отводится ведущая роль в мехатронной системе, поскольку компьютерное управление даёт возможность достичь высокой точности и производительности [4]. В этой связи архитектура выступает посредником взаимодействия вычислительных ресурсов, датчиков и исполнительных устройств.

Развитие систем управления отражает общую тенденцию цифровизации промышленности, смещаясь от централизованных, негибких структур к распределенным сетям. Этот обзор систематизирует и сравнивает различные архитектуры для управления многодвигательными мехатронными модулями.

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

Централизованная единоличная стратегия группового управления предполагает наличие центрального устройства управления [5]. Она исторически является наиболее ранним и простым с концептуальной точки зрения подходом.

Вся обработка данных и управление системой сосредоточены в одном центральном устройстве (таком как программируемый логический контроллер или промышленный компьютер). Это устройство напрямую обменивается информацией с силовыми модулями каждого двигателя, датчиками обратной связи и прочими периферийными компонентами, используя для этого отдельные аналоговые и цифровые каналы связи. Примерная схема реализации архитектуры представлена на рис.1.

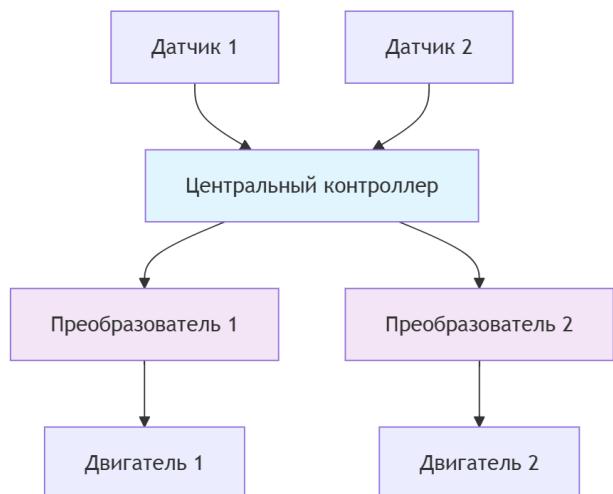


Рис. 1. Структурная схема централизованной архитектуры

Преимуществами данной архитектуры являются:

- 1) Простота программирования и отладки, так как все алгоритмы сосредоточены в одном месте;
- 2) Легкость реализации сложных алгоритмов синхронизации, требующих полной информации о состоянии всех приводов;
- 3) Низкая задержка при обработке данных внутри одного вычислительного ядра.

К недостаткам же стоит отнести:

- 1) Низкая надежность из-за единственного центрального контроллера;
- 2) Ограниченнная производительность и масштабируемость;
- 3) Высокая сложность и громоздкость проводки, так как каждый датчик и привод требует отдельного кабеля;
- 4) Большое количество аналоговых линий повышает чувствительно к электромагнитным помехам.

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

Децентрализованная коллективная стратегия подразумевает отсутствие у группы центрального устройства управления, но в то же время наличие некоторого канала обмена информацией между объектами группы [5]. Данный подход стал ответом на недостатки централизованных систем и связан с появлением специализированных микроконтроллеров.

Каждый двигатель (или их группа) управляет индивидуальным локальным контроллером, который выполняет основные функции регулирования (например, векторное управление током и скоростью). Эти локальные контроллеры обмениваются данными с центральным управляющим устройством через высокоскоростную последовательную шину (например, CANopen). Главный контроллер отвечает за более сложные задачи, такие как синхронизация, построение траекторий движения и взаимодействие с пользователем. Опытная схема архитектуры представлена на рис.2.

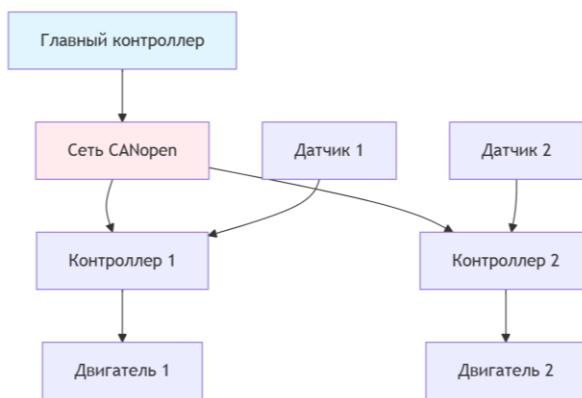


Рис. 2. Структурная схема децентрализованной архитектуры

Такой подход обладает рядом преимуществ:

- 1) Снижение нагрузки на центральный процессор;
- 2) Улучшенная масштабируемость;
- 3) Сокращение проводки по сравнению с централизованной системой;
- 4) Повышенная надежность - отказ одного локального

контроллера не всегда приводит к полному отказу системы.

Однако, не обошлось и без недостатков:

- 1) Задержки передачи данных по шине могут негативно сказываться на точности синхронизации в высокодинамичных системах;
- 2) Сложность реализации алгоритмов с тесными перекрестными связями из-за распределенности данных;
- 3) Ограниченнная пропускная способность таких шин, как CAN, для систем с большим количеством осей и высокими требованиями к частоте обновления данных.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕТЕВЫЕ АРХИТЕКТУРЫ

С ростом количества датчиков, увеличением площади территории, на которой расположена автоматизированная система и усложнением алгоритмов управления становятся более эффективным применение распределенных систем [6].

Распределенные системы управления играют ключевую роль в современных мехатронных системах, обеспечивая возможность параллельного управления несколькими устройствами. Эти системы используют сеть для связи между различными компонентами, что позволяет им работать синхронно и эффективно [7].

Данный подход интегрирует централизованное и децентрализованное управление, делая промышленную сеть фундаментом всей системы.

Система строится с использованием передовой промышленной сети, гарантирующей минимальные и предсказуемые задержки при передаче данных, например, EtherCAT, SERCOS III или PROFINET IRT. Главный управляющий модуль осуществляет мгновенный обмен информацией с периферийными компонентами, такими как контроллеры двигателей, сенсоры и модули ввода-вывода. Суть решения заключается в том, что обработка данных происходит непосредственно в каждом узле сети в момент их поступления, что обеспечивает беспрецедентную скорость и идеальную синхронизацию всех процессов. Схематическая реализация архитектуры продемонстрирована на рис. 3.

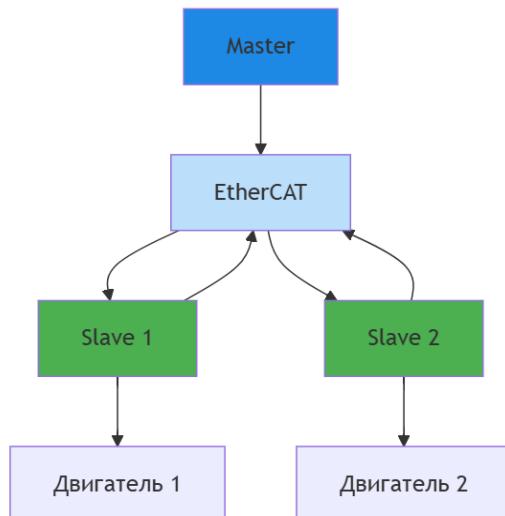


Рис. 3. Структурная схема распределенной сетевой архитектуры на базе EtherCAT

Достоинствами архитектуры являются:

1) Частота цикла управления, которая может достигать десятков килогерц при минимальных задержках и высокой синхронности между приводами;

2) Любое устройство, поддерживающее стандарт сети, может быть легко интегрировано в систему;

3) Драйвер двигателя объединяет в одном корпусе силовой преобразователь, контроллер, систему защиты и диагностики, и сетевой интерфейс, представляя собой автономный узел сети;

4) Кардинальное сокращение проводки;

5) Сети поддерживают «горячее» подключение/отключение и предоставляют обширные данные о состоянии каждого узла.

Однако стоит помнить о том, что одной из актуальных задач в области систем управления является разработка программного обеспечения для распределенных отказоустойчивых систем управления [8]. Из чего следует, что гибкость системы поддерживается сложностью встраиваемого программного обеспечения архитектуры.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Сравнительные характеристики рассмотренных архитектур представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ архитектур систем управления

Критерий	Централизованная	Децентрализованная	Распределенная Сетевая
Быстродействие	Высокое	Среднее	Высокое
Синхронность осей	Высокая	Средняя	Высокая
Надежность	Низкая	Средняя	Высокая
Масштабируемость	Низкая	Средняя	Высокая
Сложность проводки	Высокая	Средняя	Низкая
Стоимость внедрения	Низкая	Средняя	Высокая

Главный вектор развития – это переход к децентрализованным сетевым структурам. Прогресс заключается в углублении интеграции компонентов (двигатель, редуктор, драйвер, датчики и контроллер объединяются в единый мехатронный модуль) и активном применении цифровых двойников для создания и совершенствования этих систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Анализ демонстрирует явную тенденцию в развитии архитектур систем управления многодвигательными мехатронными модулями: от простых централизованных систем к более сложным и эффективным децентрализованным и, наконец, к распределенным сетевым архитектурам.

При проектировании архитектуры приходится балансировать между скоростью работы, безотказностью, затратами и временем на разработку. Тем не менее, для создания передовых и конкурентоспособных мехатронных систем, особенно в робототехнике и высокоточном оборудовании, распределенные сетевые решения, такие как EtherCAT, становятся общепринятым стандартом. Будущее развитие будет направлено на более тесную интеграцию, расширение функциональности периферийных устройств и формирование единой информационной среды на всех этапах жизненного цикла продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гильфанов К.Х. Энергосберегающая система отопления объектов электроэнергетики / К.Х. Гильфанов, Р.Н. Гайнуллин, Т. Нгуен // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, №1(45). – С. 46.-53.

2. Попкова О.С. Определение параметров для эффективного горения малосернистого мазута / О.С. Попкова, А.И. Файзуллина, К.Х. Гильфанов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – №132. – С. 1267.-1276.

3. disserCat — электронная библиотека диссертаций. Высокопроизводительная система управления многоординатными технологическими мехатронными объектами на основе память-ориентированного подхода и распределения вычислений — URL: <https://www.dissercat.com/content/vysokoproizvoditelnaya-sistema-upravleniya-mnogokoordinatnymi-tehnologicheskimi-mekhatronnyi?ysclid=mheoxku1nt709160854/read> (дата обращения: 28.10.2025).

4. Большая российская энциклопедия 2004–2017. Мехатроника — URL: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4138417 (дата обращения: 29.10.2025).

5. StudFiles. Лекция 4 Современные мехатронные и робототехнические модули и системы — URL: <https://studfile.net/preview/6017084/page:6/> (дата обращения: 29.10.2025).

6. RealLab!. 1.1. Разновидности архитектур — URL: <https://www.reallab.ru/bookasutp/1-arhitektura-sistemi/1-1-raznovidnosti-arhitektur/> (дата обращения: 30.10.2025).

7. Ai-Future school. Распределенные системы для управления мехатроникой — URL: <https://www.ai-futureschool.com/ru/mekhatronika/upravlenie-mekhatronnymi-sistemami.php> (дата обращения: 30.10.2025).

8. Системный администратор. Архитектура распределенной системы управления на основе реконфигурируемой многоконвейерной вычислительной среды L-Net — URL: <https://samag.ru/archive/article/2806> (дата обращения: 31.10.2025).

CONTROL SYSTEM ARCHITECTURES FOR MULTI-MOTOR MECHATRONIC MODULES: FROM CENTRALIZED TO DISTRIBUTED NETWORKS

V.V. Yurtaev, V.Yu. Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Abstract. The article examines the evolution of control system architectures for multi-motor mechatronic modules. Three main architecture classes are considered: centralized, decentralized, and distributed network-based. Key development trends are identified, showing a transition from rigid hierarchical structures to flexible, scalable, and fault-tolerant network-centric solutions. The advantages and disadvantages of each architecture are analyzed in terms of performance, reliability, development complexity, and maintainability. It is determined that modern distributed architectures based on industrial networks like EtherCAT represent the most promising direction for building high-performance and reliable mechatronic systems.

Keywords: mechatronic module, multi-motor drive, control system architecture, centralized control, distributed control, industrial networks, EtherCAT, intelligent drive.

REFERENCES

1. Gil'fanov K.Kh., Gainullin R.N., T. Nguyen. Energy-Saving Heating System for Power Industry Facilities [Energosberegayushchaya sistema otopleniya ob"ektov elektroenergetiki], Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University], 2020, vol. 12, no. 1(45), pp. 46-53.
2. Popkova O.S., Faizullina A.I., Gil'fanov K.Kh. Determination of Parameters for Effective Combustion of Low-Sulphur Fuel Oil [Opredelenie parametrov dlya effektivnogo goreniya malosernistogo mazuta], *Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Online Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2017, no. 132, pp. 1267-1276.
3. disserCat — Electronic Library of Dissertations. High-Performance Control System for Multi-Coordinate Technological Mechatronic Objects Based on a Memory-Oriented Approach and Computation Distribution [Vysokoproizvoditel'naya sistema upravleniya mnogokoordinatnymi tekhnologicheskimi mekhatronnymi ob"ektami na osnove pamyat'-orientirovannogo podkhoda i raspredeleniya vychislenij] (available at: <https://www.dissercat.com/content/vysokoproizvoditelnaya-sistema-upravleniya-mnogokoordinatnymi-tehnologicheskimi->)mekhatronny?ysclid=mheoxku1nt709160854) (accessed 28 October 2025).
4. Bol'shaya rossiiskaya e`nciklopediya 2004–2017. Mechatronics [Mekhatronika] (available at: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4138417) (accessed 29 October 2025).
5. StudFiles. Lecture 4 Modern Mechatronic and Robotic Modules and Systems [Lekciya 4 Sovremennye mekhatronnye i robototekhnicheskie moduli i sistemy] (available at: <https://studfile.net/preview/6017084/page:6/>) (accessed 29 October 2025).
6. RealLab!. 1.1. Varieties of Architectures [1.1. Raznovidnosti arkhitektur] (available at: <https://www.reallab.ru/bookasutp/1-arkhitektura-sistemi/1-1-raznovidnosti-arkhitektur/>) (accessed 30 October 2025).
7. Ai-Future school. Distributed Systems for Mechatronics Control [Raspredelennye sistemy dlya upravleniya mekhatronikoj] (available at: <https://www.ai-futureschool.com/ru/mekhatronika/upravlenie-mekhatronnymi-sistemami.php>) (accessed 30 October 2025).
8. Sistemnyj administrator. Architecture of a Distributed Control System Based on the Reconfigurable Multi-Pipeline Computing Environment L-Net [Arkhitektura raspredelennoi sistemy upravleniya na osnove rekonfiguriruemoi mnogokonechnoi vychislitel'noi sredy L-Net] (available at: <https://samag.ru/archive/article/2806>) (accessed 31 October 2025).

Юртаев, В.В. Архитектуры систем управления много-двигательными мекатронными модулями: от централизованных к распределенным сетям / В.В. Юртаев, В.Ю. Корнилов // Автоматизированные технологии и производство. 2025. №2(32). С.21-24.

V.V. Yurtaev, V.Yu. Kornilov Control System Architectures for Multi-Motor Mechatronic Modules: From Centralized to Distributed Networks. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.21-24. (In Russian).

СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ В ГЕРМАНИИ

В.В. Юртаев, Д.Г. Сидорова

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

vladis.yurtaeff2017@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается текущее состояние и ключевые тенденции развития мехатроники и робототехники в Германии. Проанализированы стратегические государственные инициативы, такие как «Платформа 4.0» и «Стратегия высоких технологий 2025», определяющие вектор развития отрасли. Особое внимание уделено основным научно-исследовательским центрам, включая Институт Общества Фраунгофера и Немецкий центр искусственного интеллекта (DFKI). Выявлены приоритетные направления исследований: колаборативная робототехника, искусственный интеллект в управлении робототехническими системами, аддитивные технологии и робототехника для медицины. Рассмотрены вызовы, связанные с цифровой трансформацией, нехваткой квалифицированных кадров и вопросами стандартизации. Сделан вывод о сохранении Германией лидирующих позиций в области промышленной робототехники и ее активном переходе к созданию интеллектуальных, адаптивных и человеко-ориентированных робототехнических систем.

Ключевые слова: мехатроника, робототехника, Германия, Индустрия 4.0, колаборативные роботы, искусственный интеллект, Фраунгофер.

ВВЕДЕНИЕ

Мехатроника и робототехника – науки, тесно связанные между собой. Робототехника рассматривается как одно из наиболее перспективных и популярных направлений мехатроники [1]. Мехатроника – это научно-техническая отрасль, которая работает над созданием и обслуживанием машин с компьютерным управлением движения. Она базируется на знаниях в области электромеханики, электроники, автоматики, микропроцессорной техники, а также ИТ-технологий [2].

Десять лет назад автоматизированная рука на сборочной линии вызывала любопытство, а теперь она — маркер технологического уровня страны. Мир входит в эпоху, где число «механических сотрудников» уже исчисляется миллионами, а скорость их внедрения становится экономическим показателем наравне с ВВП [3]. Только в автомобильной отрасли Германии на 10 тысяч сотрудников приходится 1176 роботов (в других отраслях в среднем 137) [4].

Германия исторически является одним из мировых лидеров в области машиностроения, автоматизации и робототехники. Сегодня развитие мехатроники и робототехники в стране обусловлено несколькими факторами. Среди них особенно важны государственная программа «Индустрия 4.0», передовые фундаментальные и прикладные исследования, а также эффективное сотрудничество между наукой и производством. Постоянный спрос на робототехнические решения со стороны крупных автопроизводителей и предприятий среднего бизнеса Германии способствует непрерывному внедрению инноваций. Эта статья посвящена изучению текущей ситуации, выявлению основных направлений развития и прогнозированию перспектив мехатроники и робототехники в Германии. Анализ будет основан на

изучении государственных программ, деятельности ведущих исследовательских институтов и анализе технологических трендов.

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ИНИЦИАТИВЫ И ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА

Развитие мехатроники и робототехники в Германии носит системный характер и активно поддерживается на государственном уровне. Ключевой инициативой, задавшей вектор развития на последнее десятилетие, стала «Платформа Индустрия 4.0», запущенная в 2013 году. В рамках этой платформы разрабатываются стандарты для киберфизических систем, интернета вещей (IoT) и «умных» заводов, где мехатронные и робототехнические модули являются основными исполнительными устройствами.

Помимо этого, важную роль играет программа «Стратегия высоких технологий 2025». В ней робототехника и искусственный интеллект выделены как ключевые направления для инноваций, затрагивающие различные сферы. Финансирование исследований в этих областях обеспечивают Немецкое исследовательское сообщество (DFG) и немецкое Агентство по перспективным научным исследованиям (DARPA Германии). Основное внимание уделяется проектам, которые объединяют искусственный интеллект и робототехнику, а также сенсорные технологии и современные материалы. Цель - разработка адаптивных и самообучающихся систем.

Эти инициативы создают экосистему, в которой крупные промышленные концерны (такие как Siemens, KUKA, Festo) и малые инновационные предприятия могут эффективно разрабатывать и внедрять передовые решения.

КЛЮЧЕВЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЦЕНТРЫ И ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Немецкая робототехника опирается на мощную

научную основу, сосредоточенную в передовых исследовательских центрах. Институты Общества Фраунгофера, такие как берлинский Институт производственных систем и технологий проектирования (IPK) и штутгартский Институт машиностроения и автоматизации (IPA), занимаются прикладными исследованиями, результаты которых быстро находят применение в промышленности. Немецкий центр исследований искусственного интеллекта (DFKI), расположенный в Кайзерслаутерне и Бремене, занимает лидирующие позиции в мире по внедрению искусственного интеллекта в робототехнические разработки.

Среди приоритетных направлений исследований и разработок можно выделить:

1) *Коллaborативная робототехника*. Создание роботов, предназначенных для совместной работы с людьми в непосредственной близости, без использования защитных барьеров. Немецкие компании KUKA и Franka Emika лидируют в этой области.

2) *Искусственный интеллект и машинное обучение*. Применение искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации планирования перемещений, обработки визуальной информации и предсказания потребностей в обслуживании роботов.

3) *Аддитивные технологии и гибридное производство*. Применение 3D-печати в роботизированных производственных ячейках для создания деталей с градиентными свойствами и восстановления поврежденных сложных компонентов.

4) *Медицинская робототехника*. Разработка технологических решений для роботизированных хирургических операций, реабилитации и ухода за пациентами.

Вызовы и перспективы развития

Германия является крупнейшим рынком робототехники в Европе и пятым по величине в мире [5]. Одной из причин такого впечатляющего рейтинга является сильный сектор малого и среднего бизнеса в стране, являющийся основой экономики Германии, где автоматизация стала решающим фактором конкурентоспособности [6]. В 2024 году число установок сократилось на 5% до 26 982 единиц. Это составляет 32% от общего годового объема рынка в Европе [5]. Сравнительные показатели по странам на конец 2024 года представлены на рис. 1.

Несмотря на значительные успехи, отрасль сталкивается с рядом вызовов. Одной из основных проблем является цифровая трансформация средних предприятий, которым зачастую не хватает ресурсов и экспертизы для внедрения сложных робототехнических систем уровня «Индустрии 4.0». Другим серьезным вызовом является нехватка квалифицированных кадров, способных разрабатывать, программировать и обслуживать интеллектуальные мехатронные системы. Также остаются актуальными вопросы стандартизации и кибербезопасности, поскольку роботы становятся частью взаимосвязанных сетей.

Будущее технологического прогресса определяется углублением интеграции различных технологий. Робототехнические системы эволюционируют от автономных устройств к компонентам распределенного интеллекта, интегрированным в концепцию "умного" производства. Прогнозируется расширение использования мобильной

робототехники в логистике и сфере обслуживания, а также разработка адаптивных роботов, способных к самонастройке для выполнения разнообразных задач.



Рис. 1. Новые установки промышленных роботов в 2024 году

Таблица 1
Основные вызовы и ответные меры в немецкой робототехнике

Вызов	Ответные меры
Цифровая трансформация	Создание консалтинговых программ и демонстрационных центров при институтах Фраунгофера
Нехватка квалифицированных кадров	Реформа образовательных программ в вузах, создание программ дополнительного профессионального образования
Стандартизация и кибербезопасность	Активная работа в рамках «Платформы 4.0» и на международной арене (сотрудничество с IEC, ISO)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что современный этап развития мехатроники и робототехники в Германии характеризуется переходом от задач автоматизации дискретных операций к созданию комплексных, интеллектуальных и гибких производственных сред. Стратегические государственные инициативы, мощная научно-исследовательская база и тесная кооперация науки и промышленности образуют эффективную инновационную экосистему. Несмотря на существующие вызовы, связанные с цифровизацией и кадрами, Германия сохраняет и укрепляет свои позиции в области высокотехнологичной, основанной на ИИ робототехники.

Мехатроника и робототехника находятся в центре Четвертой промышленной революции, где интеллектуальные машины и умные системы трансформируют нашу жизнь и труд [7]. В промышленности, в сфере услуг, в области транспорта с автономными автомобилями и дронами, в домашнем хозяйстве или в сфере патронажного ухода – роботы будут брать на себя всё больше и больше задач, благодаря новым методам искусственного интеллекта, работающим с большими объемами данных [8].

ЛИТЕРАТУРА

MODERN STAGE OF DEVELOPMENT OF MECHATRONICS AND ROBOTICS IN GERMANY

V.V. Yurtaev, D.G. Sidorova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Abstract. The article examines the current state and key trends in the development of mechatronics and robotics in Germany. Strategic government initiatives such as "Platform 4.0" and the "High-Tech Strategy 2025," which define the vector of the industry's development, are analyzed. Particular attention is paid to the main research centers, including the Fraunhofer Society and the German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI). Priority research areas are identified: collaborative robotics, artificial intelligence in the control of robotic systems, additive technologies, and robotics for medicine. Challenges related to digital transformation, the shortage of qualified personnel, and standardization issues are considered. The conclusion is made about Germany maintaining its leading position in industrial robotics and its active transition to the creation of intelligent, adaptive, and human-oriented robotic systems.

Keywords: mechatronics, robotics, Germany, Industry 4.0, collaborative robots, artificial intelligence, Fraunhofer.

REFERENCES

1. ATF. Mechatronics and Robotics as Promising Research Areas. Available at: https://atf.ru/articles/materialy_dlya_tipovykh_uzlov_treniya/mehatronika-i-robototekhnika-kak-perspektivnye-nauchnye-napravleniya/ (accessed 17 October 2025).
 2. Vc.ru. The popularity of mechatronics now and its importance in the future. Available at: <https://vc.ru/id739931/212811-populyarnost-mehatroniki-seichas-i-ee-znachenie-v-budushem?ysclid=mh1poroozr706310080> (accessed 17 October 2025).
 3. Kompyuterra. How robots are changing the global industry and why it's time for Russia to accelerate. Available at: <https://www.computerra.ru/325395/kak-roboty-menyaют-mirovuyu-promyshlennost-i-pochemu-rossii-pora-uskoryatsya/> (accessed 18 October 2025).
 - study robotics? Available at: <https://www.mygermany.info/post/study-robotics-in-germany> (accessed 19 October 2025).
 5. RoboTrends. German robotics: a historic high by the end of the year. Available at: <https://robotrends.ru/pub/2327/nemeckaya-robototekhnika-istoricheskiy-maksimum-do-konca-goda?ysclid=mh1pi7sean458754871> (accessed 19 October 2025).
 6. JSC "SKB "Proton". Closer to the Market: Universal Robots in Germany. Available at: <https://skb-proton.ru/2023/01/03/%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%B6%D0%B5-%D0%BA-%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BA%D1%83-%D1%83%D0%BD%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D1%80%>

D1%81%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B-%D0%B2-%D0%B3/?ysclid=mh677dsgrl919406954 (accessed 21 October 2025).

7. APNI. Mechatronics and Robotics: Shaping the Future of Intelligent Machines. Available at:

<https://apni.ru/article/13105-mehatronika-i-robototekhnika-formirovaniye-budushego-intellektualnyh-mashin> (accessed 22 October 2025).

8. Deutschland.de. "Robots must better understand humans – and vice versa". Available at: <https://www.deutschland.de/ru/topic/znaniya/robototekhnika-germaniya-tobias-kaupp-roboty> (accessed 22 October 2025).

Юртаев, В.В. Современный этап развития мехатроники и робототехники в Германии / В.В. Юртаев, Д.Г. Сидорова // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.25-28.

V.V. Yurtaev, D.G. Sidorova Modern Stage of Development of Mechatronics and Robotics in Germany. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.25-28. (In Russian).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Т.Г. Сухоносова, А.А. Нугаманов, С.А. Емельянов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, Российская Федерация

tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены задачи автоматического управления пароперегревательной установкой ППУ-100. Представлена комбинированная система автоматического регулирования температуры выходного пара пароперегревательной установки. При формировании управляющего воздействия осуществляется коррекция по температуре и расходу входного пара. Предложена функциональная схема автоматизации пароперегревательной установки с её описанием.

Ключевые слова: пароперегреватель, пароперегревательная установка, контур регулирования, автоматизация, комбинированная система регулирования, регулирование температуры пара.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом автоматизации является пароперегревательная установка ППУ-100, предназначенная для выработки электроэнергии турбогенератором ST-3 паросилового цеха и обеспечения паром пароэлектрических насосов вакууматора кислородно-конвертерного цеха (ККЦ).

В ППУ требуется осуществлять перегрев пара, полученного в котлах охладителях конвертерных газов, до температуры 280-290 °C [1]. Но из-за изменений в работе оборудования обеспечивающего ППУ паром, а также времени года и режимов работы оборудования, подключенного к паровым сетям, параметры входного пара сильно изменяются. Так, температура пара на входе может варьироваться от 180 до 240 °C, а его давление от 0,9 до 1,6 МПа. Расход пара через ППУ также является переменной величиной, изменяясь от 30 до 100 т/ч.

Управление температурой перегретого пара осложняется тепловой инерцией установки. Инерционность и запаздывание объекта управления вызваны большим объемом топочной камеры, а также наличием многочисленных паровых коллекторов.

Постоянное изменение параметров входного пара приводит к неустановившемуся режиму работы. Вследствие чего, температура пара на выходе ППУ может изменяться от 170 до 310 °C.

Увеличивающиеся потери теплоты в нестационарном режиме работы и изменяющаяся температура выходного пара оказывается на экономической эффективности работы оборудования [2, 3].

Целью проектируемой системы является стабилизация температуры выходного пара ППУ, в условиях нестационарных режимов под действием возмущений по параметрам входного пара.

ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ППУ

К задачам автоматического регулирования ППУ относятся:

- поддержание заданной температуры выходного пара;

- регулирование соотношения газ-воздух;
- поддержание необходимого разряжения в топке.

Основные способы регулирования температуры перегретого пара после пароперегревателя барабанных и прямоточных котлов, а также установок промежуточного перегрева пара основаны на использовании предусмотренных конструкционных способов регулирования, к которым относятся [4, 5]:

- байпасирование части пара, когда некоторая доля пара пропускается в обход ступеней пароперегревателя, что снижает общую температуру перегретого пара;
- впрыск конденсата или питательной воды в промежутке между ступенями пароперегревателя для уменьшения температуры выходного пара;
- газовое регулирование, т.е. изменение формы факела, рециркуляция или изменение прохождение дымовых газов через ступени пароперегревателя;
- использование теплообменников пар-пар, газ-пар.

Ввиду отсутствия в конструкции ППУ-100 дополнительных контуров регулирования температуры пара, воздействие на температуру выходного пара осуществляется изменением расхода газа на горелку. Выбранный способ регулирования обладает большой инерционностью и при значительных изменениях параметров входного пара требуется длительное время (около 20 мин) на устранение возмущающего воздействия.

Использование системы управления, компенсирующей негативное воздействие запаздывания объекта управления, сводится к различным вариациям предиктора Смита. САР с предиктором предполагает использование модели объекта. Качество регулирования в таких системах существенно зависит от точности определения параметров модели [6]. Определение динамических параметров ППУ, осложняется неустановившимся режимом работы в результате изменения параметров входного пара.

Изменение количества подаваемого газа влечет за собой необходимость изменения количества подаваемого воздуха для поддержания заданного соотношения газ-воздух. Отклонение этого параметра от заданного значения может привести к недожигу газа или повлиять на эко-

номические показатели работы ППУ. Недожог газа опасен повышением содержания вредных веществ в продуктах сгорания, который может привести к аварийным ситуациям. Ведущим параметром в контуре соотношения расходов является текущий расход газа на горелку ППУ. Соотношение газ-воздух задается в зависимости от вида топлива и параметров горелочного устройства, его корректируют в ходе теплотехнических испытаний для коррекции правильного горения топлива на всем диапазоне изменения расхода газа [7].

Контур регулирования разряжения в топке ППУ предназначен для поддержания нормального процесса горения топлива. Он обеспечивает своевременное удаление дымовых газов, отдавших свое тепло пару, препятствует срыву пламени и возникновению аварийных ситуаций, связанных с повышением загазованности рабочего пространства возле установки.

Датчик разряжения установлен в шкафу возле горелочного устройства, а его импульсная линия производит отбор из топочного пространства установки. Изменение разряжения осуществляется перемещением вала исполнительного механизма, сочленённого с регулирующим органом, который установлен в начале дымохода.

К задачам автоматического контроля параметров ППУ относятся:

- контроль температуры, давления, расхода входного и выходного пара;
- контроль давления и расхода природного газа;
- контроль параметров отходящих газов;
- контроль процесса горения в топке.

На рис. 3 представлен видеокадр системы визуализации, с контролируемыми и регулируемыми параметрами.

Контроль давления входного и выходного пара осуществляется датчиками, установленными на паропроводе в непосредственной близости с установкой. Для определения экономических параметров работы оборудования на площадках обслуживания паропроводов установлены узлы учета.

Контролируется давление, температура и расходы пара на четырех паропроводах: пар из энергокорпуса от редукционной установки (РУ), пар из сетей, пар в сети, пар на турбогенератор (ТГ №2).

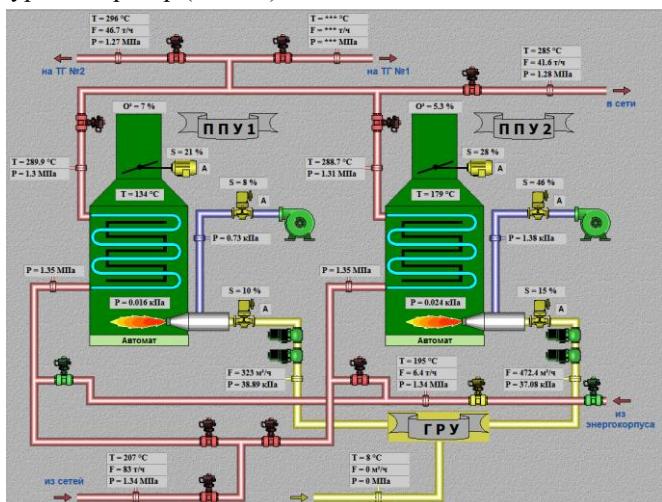


Рис. 1. Мнемосхема системы управления ППУ

Автоматический контроль температуры и количества кислорода в отходящих газах осуществляется в начале дымовой трубы.

Для контроля наличия пламени используется фотодатчик ФДЧ, сигнал от которого поступает в АСУ ППУ.

Задачи системы автоматической защиты и блокировок ППУ заключаются в оперативном предотвращении повреждений оборудования при достижении предельных параметров работы установки. Основная задача – это автоматическое прекращение подачи газа на горелку.

Отсечные клапаны перекрывают подачу газа при:

- повышении давления пара перед ППУ более 17 кгс/см²;
- падении давления газа перед горелкой менее 20 кгс/м²;
- повышении давления газа перед горелкой более 1400 кгс/м²;
- падении давления воздуха перед горелкой менее 5 кгс/м²;
- понижении разряжения в топке до 1,0 кгс/м²;
- остановке вентилятора;
- погасании факела.

При превышении температуры пара более 300 °C срабатывают световая и звуковая сигнализации.

При повышении давления выходного пара более чем на 10 % срабатывают установленные на выходном паропроводе предохранительные клапаны.

Система контроля воздушной среды в помещении ППУ предусматривает оперативное оповещение обслуживающего персонала звуковым сигналом при повышении предельных значений содержания оксида углерода CO в воздухе.

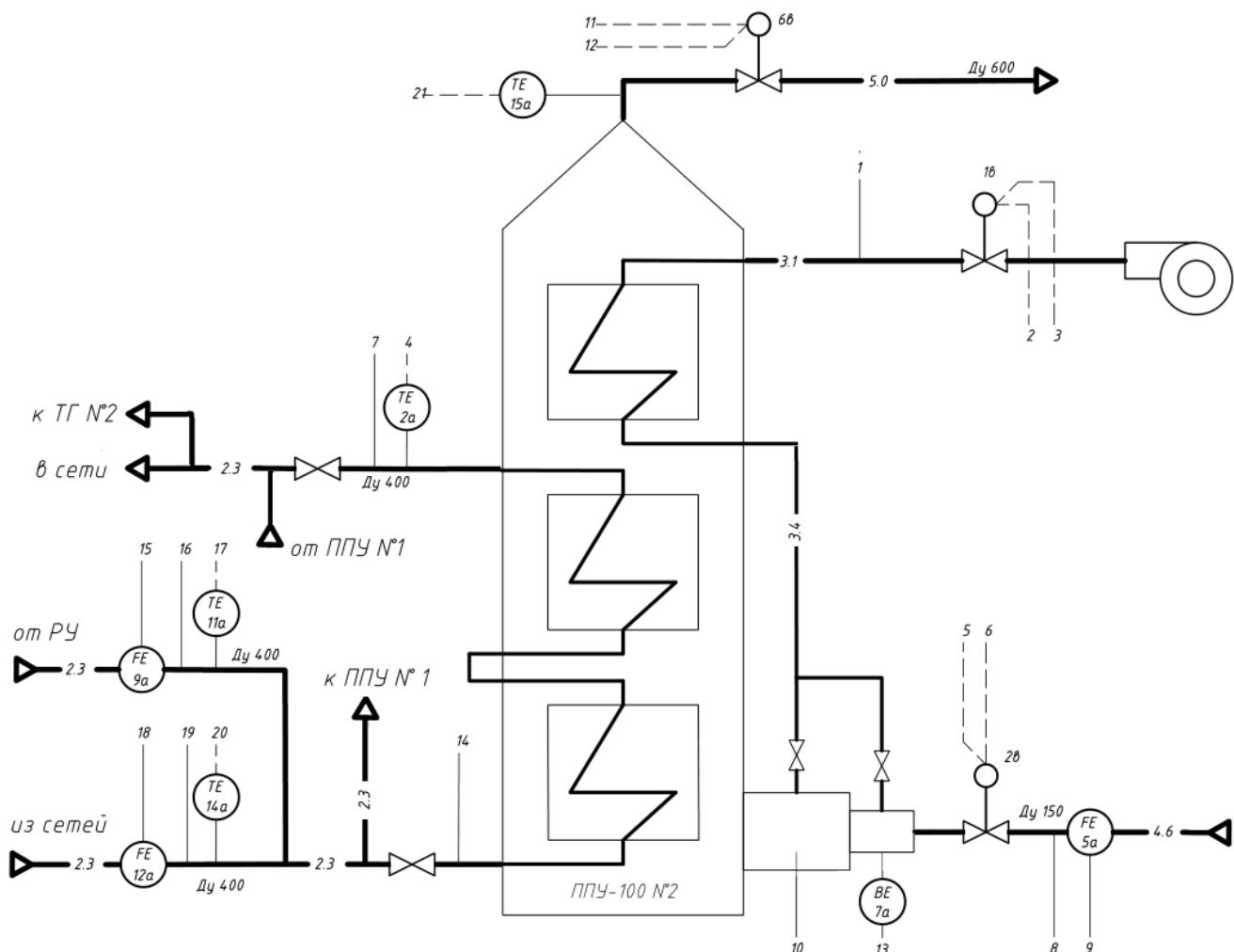
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ППУ

Для стабилизации температуры выходного пара предлагается использовать комбинированную систему, совмещающую принцип управления по отклонению и по возмущению. В предлагаемой модели в состав корректирующего устройства входят два дополнительных регулятора: П-регулятор для формирования корректирующего воздействия при отклонении температуры входного пара от номинального значения и ПИ-регулятор для коррекции отклонения расхода пара от его номинального значения [8].

Упреждающее корректирующее воздействие рассчитанное по параметрам входного пара уменьшит негативное влияние запаздывания объекта управления. Это позволит уменьшить амплитуду колебаний температуры выходного пара от заданного значения.

Функциональная схема автоматизации пароперегревательной установки представлена на рис. 2, спецификация приборов и автоматики в табл. 1 составлены в соответствии с [9].

Функции сбора, обработки информации от подсистем нижнего уровня, формирования аварийных сообщений и выработку управляющих воздействий осуществляют контроллер Siemens Simatic S7-400, поз. РМК, и станции распределенного ввода-вывода ET 200M, поз. ET1-ET3. Связь между контроллером и станциями распределённого ввода-вывода осуществляется по полевой шине с использованием протокола Profibus DP [10].



Приборы по месту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Щит ППУ №2	ПИТ 1а				ПИТ 3а	ПИТ 4а	ПИТ 5б	ПИТ 6а			ПИТ 8а	ПИТ 10а	ПИТ 7б								
Шкафы управления	ET1	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	○ Bi	
Контроллер	ET2																			PMK	
АРМ	ET3	○ Bo	○ Bo						○ Bo											ЭВМ	

Рис. 2. Функциональная схема автоматизации пароперегревательной установки

Автоматизированное рабочее место (АРМ), поз. ЭВМ, позволяет оператору отслеживать процессы управления объектом, получать оперативную информацию и при необходимости осуществлять дистанционное управление исполнительными механизмами. АРМ выполняет функции

отображения и архивирования данных технологического процесса. С его помощью оператор производит контроль работы оборудования входящего в комплекс технических средств системы. Обмен данными между контроллером и

АРМ осуществляется по высокоскоростному протоколу Ethernet [10].

Таблица 1
Спецификация оборудования к схеме автоматизации

Поз.	Наименование	Кол.
1а	Датчик давления, Метран-150 CD1 2,5 кПа	1
1б, 6б	Пускателъ бесконтактный реверсивный, ПБР-3А	2
1в, 6в	Исполнительный механизм, МЭО-100/25-0,25 в комплекте с БСПТ-10	2
2а	Термометр сопротивления, ТСПУ-2212, 0-400 °C	1
2б	Пускателъ бесконтактный реверсивный, ПБР-2М	1
2в	Исполнительный механизм, МЭО-40/63-0,25 в комплекте с БСПТ-10	1
3а	Датчик давления, ЭнИ-100-ДИ-2140, 2,5 МПа	1
4а	Датчик давления, ЭнИ-100-ДИ-2140М, 0,6 кПа	1
5а	Диафрагма измерительная, ДКС0,6-150-А/Б	1
5б	Датчик давления, Метран-100-ДД-1440	1
6а	Датчик давления, Метран-100-ДИВ-1310 0,05 кПа	1
7а	Фотодатчик низкочастотный, ФДЧ	1
7б	Прибор контроля пламени, Ф 34.2	1
8а	Датчик давления, Метран-100-TG3 2,5 МПа	1
9а, 12а	Преобразователь расхода вихревой, ТИРЭС в комплекте с БПЗОБ	2
10а, 13а	Датчик давления, ЭнИ-100-ДИ-2150, 2,5 МПа	2
11а, 14а	Термометр сопротивления, ТСПУ-3212, 0-400 °C	2
15а	Термометр сопротивления, ТСПУ-2212, 0-200 °C	1
ЕТ1,..., ЕТ3	Станция распределенного ввода-вывода, ЕТ 200М	3
РМК	Регулирующий контроллер, Simatic S7-400	1
АРМ	Персональный компьютер, Intel Core i5-9400	1

Для контроля температуры пара на выходе ППУ предназначен датчик температуры ТСПУ-100П, поз. 2а. На выходе датчика формируется унифицированный токовый сигнал 4-20 мА, пропорциональный измеренной температуре.

Для формирования корректирующего воздействия в САУ температурой пара используются данные с узлов учёта, расположенных на входных паропроводах. Выходные унифицированные токовые сигналы 4-20 мА от датчиков расхода с преобразователяй ТИРЭС [11], поз. 9а, 12а, и температуре пара с термометров сопротивления ТСПУ, поз. 11а, 14а, поступают на модули ввода аналоговых сигналов SM 331 станции распределенного ввода-вывода ЕТ 200М, поз. ЕТ1.

Измеренная температура пара сравнивается с заданным значением 285 °C, формируется сигнал рассогласования, на основе которого контроллер формирует управляющее воздействие по отклонению заданного параметра. Корректирующее устройство вырабатывает управляющее воздействие, направленное на компенсацию изменения расхода и температуры входного пара.

Суммарное управляющее воздействие, сформированное контроллером, с выхода модуля вывода дискретных сигналов станции распределенного ввода-вывода ЕТ 200М, поз. ЕТ3, проходит через концевые выключатели S3 и S4 исполнительного механизма МЭО, поз. 2в, и по-

ступает на пускателъ бесконтактный реверсивный ПБР 2М, поз. 2б. Пускателъ управляет двигателем исполнительного механизма, поз. 2в, который в свою очередь соченен с регулирующим органом.

В состав горелки ГМУ-10 входит запальное и защитное устройства, поз. 7а, 7б. Перед горелкой установлено два отсечных клапана, между ними врезана продувочная свеча безопасности (на схеме не показано).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для стабилизации температуры перегретого пара на выходе ППУ необходимо вводить коррекцию по сигналам о температуре и расходе входного пара. Для технической реализации предлагаемой системы управления температурой пара не требуется дополнительных технических средств автоматизации.

Уменьшение колебаний температуры выходного пара ППУ приведет к более стабильной выработке электроэнергии турбогенератором. Уменьшение перепадов температур в топке и газоходе ППУ положительно скажется на ресурсе пароперегревателей, а также уменьшит содержание вредных веществ в продуктах горения топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахромеев И.Е. Распределенная автоматизированная система оперативного управления сетью технологического пароснабжения / И. Е. Вахромеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – № 22(198). – С. 70-74.

2. Кулаков Г.Т. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов / Г.Т. Кулаков, М.Л. Горельшева // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 4. – С. 62-69.

3. Рябчиков М.Ю. Система управления температурой пара после пароперегревательной установки с применением нечеткой логики для упреждающей компенсации возмущений / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, С.А. Филиппов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Том 22. – № 4. – С. 181-190.

4. Голдобин Ю.М. Автоматизация теплоэнергетических установок: учеб. пособие / Ю.М. Голдобин, Е.Ю. Павлюк. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 186 с.

5. Бахриева Х.А. Алгоритм синтеза оптимального дискретного управления температурным режимом пароперегревателя / Х.А. Бахриева, С.А. Аскарходжаев // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2022. – № S2(40). – С. 39-45.

6. Бураков М.В. Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами / М.В. Бураков, А.С. Коновалов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 4(89). – С. 25-34.

7. Парсункин Б.Н. Системы автоматизации и управления: учеб. пособие. Электронное издание / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Сухоносова, Е.С. Рябчикова. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2021. – 151 с. - ISBN 978-5-9967-2283-9.

8. Сухоносова Т.Г. Система автоматического регулирования температуры выходного пара пароперегревательной установки / Т.Г. Сухоносова, А.А. Нуғаманов, С.А.

Емельянов // Автоматизированные технологии и производство. – 2025. – №1(31). – С. 3-6.

9. Мухина Е.Ю. Проектирование автоматизированных систем: Конспект лекций. Электронное издание / Е.Ю. Мухина. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – EDN ZRZBFL.

10. Андреев С.М. Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления: Курс лекций / С.М. Андреев. – Магнитогорск, 2008. – 132 с. – EDN PVSXAH.

11. Преобразователи расхода вихревые ТИРЭС: Руководство по эксплуатации. – URL: <https://zflow.ru/pogruzhnoj-preobrazovatel-raskhoda.html> (дата обращения: 20.12.2026).

AUTOMATION OF STEAM SUPERHEATING UNIT

T.G. Sukhonosova, A.A. Nugamanov, S.A. Emelyanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract. In this article, the automatic control tasks of the superheater unit PPU-100. Presents a combined system for automatic control of the outlet steam temperature of the superheater unit. When forming the control action, correction is made based on the temperature and flow rate of the input steam. A functional scheme of automation for the superheater unit, with its description is proposed.

Keywords: superheater, superheater unit, control loop, automation, combined control system, steam temperature control.

REFERENCES

1. Vakhromeev I.E. Distributed automated system for industrial steam supply network management [Raspredelennaya avtomatizirovannaya sistema operativnogo upravleniya set'yu tekhnologicheskogo parosnabzheniya], *Vestnik SUSU. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, automatic control, radioelectronics], 2010, no. 22(198), pp. 70-74.
2. Kulakov G.T., Harelyshava M.L. Influence of superheated steam temperature regulation quality on service life of boiler steam super-heater metal [Issledovanie vliyaniya kachestva regulirovaniya temperatury peregretogo para na srok sluzhby metalla paroperegrevatelya kotlov], *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG* [Energy. News from higher education institutions and energy associations of the CISJ], 2009, no. 4, pp. 62-69.
3. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Filippov S.A. A Fuzzy Logic-Based System for Controlling the Temperature of Steam Exiting a Superheater for the Purpose of Preemptive Perturbation Compensation [Sistema upravleniya temperaturoy para posle paroperegrevatelya ustalovki s primeneniem nechetkoj logiki dlya uprezhdayushchej kompensacii vozmushchenij], *Mekhatronika, Avtomatzatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2021, no.22(4), pp. 181-190.
4. Goldobin Yu.M. *Avtomatizaciya teploenergeticheskikh ustalovok: ucheb. posobie* [Automation of thermal power plants: textbook], Yekaterinburg, Publ. URFU, 2017, 186 p.
5. Bakhrjeva KH.A., Askarkhodzhaev S.A. Synthesis algorithm for optimal discrete control of the temperature condition of a steam superheater [Algoritm sinteza optimalnogo diskretnogo upravleniya temperatury para na sredstvakh digital'noj avtomatiki], *Vestnik MGSTU* [Journal of MGSTU], 2018, no. 1(31), pp. 3-6.
6. Burakov M.V., Konovalov A.S. Modification of Smith Predictor for a Linear Plant with Changeable Parameters [Modifikaciya prediktora Smita dlya linejnogo obekta s peremennymi parametrami], *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, no. 4(89), pp. 25-34.
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Sukhonosova T.G., Ryabchikova E.S. *Sistemy avtomatizacii i upravleniya: ucheb. posobie* Elektronnoe izdanie [Automation and control systems : study guide], Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, -151 p. - ISBN 978-5-9967-2283-9.
8. T.G. Sukhonosova, A.A. Nugamanov, S.A. Emelyanov System of Automatic Control of Steam Temperature of a Steam Superheating Unit. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2025. no.1(31), pp. 3-6.
9. Mukhina E.Yu. *Proyektirovaniye avtomatizirovannykh sistem* [Design of automated systems], Electronic resource, Magnitogorsk, Publ. MSTU, 2015.
10. Andreev S.M. *Principy postroenija i organizacii kompleksov tekhnicheskikh sredstv v sistemah avtomaticheskogo upravlenija* [Principles of construction and organization of complexes of technical means in automatic control systems], Magnitogorsk, Publ. NMSTU, 2008, 132 p.
11. *Preobrazovateli raskhoda vihrevye TIRES: Rukovodstvo po ekspluatacii* [TIRES Vortex Flow Converters: Operating Manual]. Available at: <https://zflow.ru/pogruzhnoj-preobrazovatel-raskhoda.html> (accessed 20 December 2025).

Сухоносова, Т.Г. Автоматизация пароперегревательной установки / Т.Г. Сухоносова, А.А. Нуғаманов, С.А. Емельянов // Автоматизированные технологии и производства. 2025. №2(32). С.29-33.

T.G. Sukhonosova, A.A. Nugamanov, S.A. Emelyanov Automation Of Steam Superheating Unit. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2025. no.2(32), pp.29-33. (In Russian).