

На правах рукописи

Дунаев Дмитрий Иванович

**СНИЖЕНИЕ АМПЛИТУД РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ
В ВИБРАЦИОННЫХ СТЕНДАХ С АСИНХРОННЫМИ
ДЕБАЛАНСНЫМИ ВИБРОДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Стариков Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика»

Официальные оппоненты: **Артюхов Иван Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Строганов Владимир Иванович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится 07 июня 2022 в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке методов снижения амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями, управляемыми с помощью частотного преобразователя.

Актуальность работы

Вибрационные машины и вибротехнологии в настоящее время широко внедряются и используются во всех отраслях народного хозяйства. Их применение оптимизирует технологический процесс, снижает материалоемкости и энергоемкости, приводит к улучшению качества продукции и повышению производительности труда, способствует значительному экономическому эффекту, а также улучшению условий труда.

Известно, что в большинстве вибрационных испытательных стендов используется электротехнический комплекс, включающий в себя асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющие на своем валу неуравновешенную массу (дебаланс). В связи с этим такие двигатели получили свое название асинхронные дебалансные вибродвигатели (АДВД). Важным преимуществом таких стендов является их конструктивная простота. Однако, существенным недостатком вибрационных стендов с АДВД является резкое увеличение амплитуд колебаний (в 2 – 3 раза) в момент прохождения зоны резонанса при разгоне и торможении, что недопустимо с точки зрения нормальной эксплуатации. Большие амплитуды колебаний при резонансе сокращают ресурс вибростенда и могут привести к выходу из строя вибрационной системы.

Таким образом, исследования, направленные на разработку новых эффективных способов снижения резонансных амплитуд колебаний вибрационного стола при разгонах и торможениях вибродвигателей являются актуальной задачей. Также актуальным является создание такой математической модели вибрационного стола, которая на этапе проектирования позволяет определить амплитуды колебаний на разных частотах питающего напряжения вибродвигателей.

Степень разработанности проблемы

Работа базируется на результатах исследований В.И. Антипова, В.К. Асташева, Н.Х. Базарова, И.И. Блехмана, И.И. Быховского, Г.В. Вишневецкий, К.С. Галицкова, Е.Н. Гаврилова, С.Н. Гладкова, А.А. Горбунова, В.Н. Дмитриева, Д.В. Дубовика, А.Е. Епишкина, А.М. Кац, В.О. Кононенко, Л.М. Кракиновского, Л.К. Рагульскиса, А.Г. Савченко, В.М. Шестакова, А.Л. Fradkov и многих других ученых, которые занимались изучением вибрационных систем и процессов, протекающих в них.

Однако, в известных работах вопросу решения проблем прохождения зоны резонанса при разгоне и торможении устройств с вращающимися неуравновешенными роторами уделено недостаточно внимания. Также стоит отметить, что в перечисленных работах не затронут вопрос создания математической модели электротехнического комплекса вибрационного стенда с дебалансными вибродвигателями в терминах передаточных функций.

Анализ степени разработанности проблемы позволил сформулировать цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – разработка комплексного научно-технического инструментария снижения амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработка математической модели электротехнического комплекса вибрационного стенда с дебалансными вибродвигателями в терминах передаточных функций, позволяющая производить корректный анализ его функционирования при различных частотах колебаний.

2. Разработка методов уменьшения амплитуд резонансных колебаний при разгонах и торможениях вибродвигателей с помощью частотного преобразователя.

3. Разработка варианта технической реализации устройства аварийного торможения вибродвигателей, позволяющего снизить амплитуды резонансных

колебаний в случаях пропадания напряжения питания и сбоя в работе частотных преобразователей.

4. Проведение натуральных экспериментов, подтверждающих адекватность теоретических исследований и разработанных методов борьбы с резонансами.

Объектом исследования является электротехнический комплекс вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

Предметом исследования являются колебательные процессы при резонансе, возникающие в вибрационном стенде при разгоне и торможение вибродвигателей.

Методы решения

В работе использованы методы теории электропривода, электрических машин, прикладной теории механических колебаний, преобразования Лапласа и численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

Научная новизна

1. Разработана уточненная линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями в виде передаточной функции, отличающаяся возможностью определения амплитуд установившихся колебаний с малой погрешностью.

2. Разработан метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями, отличающийся видом коррекции статической характеристики частотного преобразователя.

3. Разработаны методика и алгоритм расчета координат свободно программируемой зависимости напряжения от частоты инвертора, регулирующего скорость вращения роторов дебалансных вибродвигателей, отличающиеся учетом масс дебалансов и подвижной платформы, числа пар полюсов вибродвигателей и напряжения на нулевой частоте.

4. Предложен метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола, отличающийся использованием двух частотных преобразова-

телей, обеспечивающих асинхронный разгон и торможение дебалансных вибродвигателей.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработанная линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стенда с асинхронными дебалансными вибродвигателями в терминах передаточных функций, позволяет на этапе проектирования вибрационной установки определить амплитуды колебаний на разных частотах питающего напряжения вибродвигателей.

2. Разработанные методы воздействия на электротехнический комплекс вибрационного стола позволяют снизить амплитуды резонансных колебаний, что благоприятно сказывается на работу упругих элементов вибрационной системы.

3. Предложенный вариант технической реализации симисторно-конденсаторного устройства, позволяет снизить амплитуды резонансных колебаний при аварийном торможении вибродвигателей в случаях пропадания напряжения питания и сбоя в работе частотных преобразователей.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с данными натурных экспериментов.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы были внедрены в практику при проведении модернизации испытательного оборудования на базе научно-исследовательского испытательного комплекса (НИИК) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров), что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2014» (г. Саранск, 2014), 48-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях» (г. Ульяновск, 2014) и Международной научной конференции «FarEastCon» (г. Владивосток, 2020).

Публикации

По теме диссертационной работы было опубликовано 8 печатных работ, общий объем которых составляет 3,25 п.л. Из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ, 1 статья, индексируемая в международных базах цитирования Scopus и получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в разработке методов снижения амплитуд резонансных колебаний за счет коррекции статической характеристики частотного преобразователя и асинхронного пуска вибродвигателей, определении передаточной функции электротехнического комплекса вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями, разработке расчетных моделей, проведении вычислительных и натурных экспериментов.

На защиту выносятся:

1. Уточненные математические модели электротехнического комплекса вибрационного стола, оснащенного двумя асинхронными дебалансными вибродвигателями.
2. Методы снижения амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями.
3. Методика и алгоритм расчета координат свободно программируемой зависимости напряжения от частоты инвертора, регулирующего скорость вращения вибродвигателей.
4. Расчетные модели и результаты вычислительных и натурных экспериментов по исследованию работы вибрационного стенда с асинхронными дебалансными вибродвигателями в разных режимах.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электро-

технических комплексов и систем промышленного... и специального назначения».

Объектом изучения: «...являются электротехнические комплексы и системы ... электропривода».

Область исследования соответствует пунктам 1, 3 и 4 паспорта специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает: введение, четыре главы, заключение, библиографический список и приложения. Основная часть работы представлена на 121 странице машинописного текста, иллюстрирована 65 рисунками и 13 таблицами. Библиографический список включает 82 наименования на 9 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности задачи снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стенда, оснащенного двумя дебалансными асинхронными вибродвигателями, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе проведена классификация вибрационных машин и определены области их применения. Рассмотрены известные математические модели вибрационных систем с асинхронными дебалансными вибродвигателями. Выделено три основных элемента вибрационных машин: колебательная система, вибропривод и нагрузка. Установлено что все три элемента взаимодействуют друг с другом и достоверные результаты при расчете могут быть получены при рассмотрении всей системы в целом. Выявлен основной недостаток вибрационных стендов. Рассмотрены известные методы уменьшения амплитуд резонансных колебаний, проведен их анализ и определены их недостатки.

Во второй главе определен объект исследования, произведено математическое описание вибрационного стенда, которое включает в себя вертикально направленные колебания, создаваемые двумя асинхронными дебалансными

вибродвигателями. Расчетная схема вибрационного стенда представлена на рисунке 1.

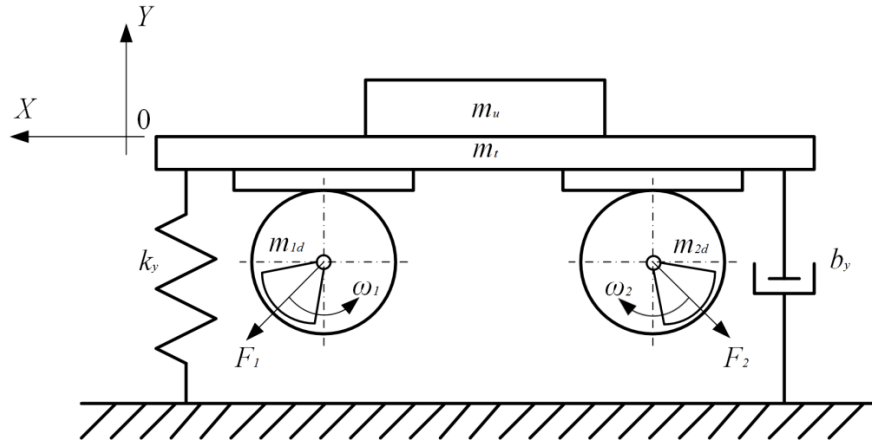


Рисунок 1 – Расчетная схема механической части вибрационной системы

Движение вибрационного стенда с дебалансными возбудителями описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_{\Sigma} \ddot{y} + b_y \dot{y} + k_y y &= m_{1d} r_{1d} (\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1) + \\ &+ m_{2d} r_{2d} (\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2) - m_{\Sigma} g; \\ J_{np1} \ddot{\varphi}_1 &= M_{ДВ1} - m_{1d} r_{1d} (\ddot{y} + g) \sin \varphi_1; \\ J_{np2} \ddot{\varphi}_2 &= M_{ДВ2} - m_{2d} r_{2d} (\ddot{y} + g) \sin \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m_{Σ} – суммарная масса системы; m_{1d} и m_{2d} – массы дебалансов, установленные на первом и втором вибродвигателе, соответственно; r_{1d} и r_{2d} – эксцентриситеты дебалансов (расстояния от осей вращения до центров масс дебалансов); y – смещение вибростолы по оси Y ; \dot{y} – скорость виброплатформы по оси Y ; \ddot{y} – ускорение виброплатформы по оси Y ; b_y – суммарный коэффициент демпфирования колебаний; k_y – суммарный коэффициент жесткости; φ_1 и φ_2 – углы поворота дебалансов относительно оси Y ; $\dot{\varphi}_1 = \omega_1$ и $\dot{\varphi}_2 = \omega_2$ – скорости вращения дебалансов (вибродвигателей); $\ddot{\varphi}_1$ и $\ddot{\varphi}_2$ – угловое ускорение дебалансов (вибродвигателей); J_{np1} и J_{np2} – приведенный момент инерции ротора первого и второго вибродвигателя, соответственно; g – ускорение свободного падения;

$M_{ДВ1}$ и $M_{ДВ2}$ – электромагнитный момент первого и второго вибродвигателя, соответственно.

На основании системы (1) разработана структурная схема электротехнического комплекса вибростола с асинхронными дебалансными вибродвигателями типа ИВ-105-2,2 (рисунок 2).

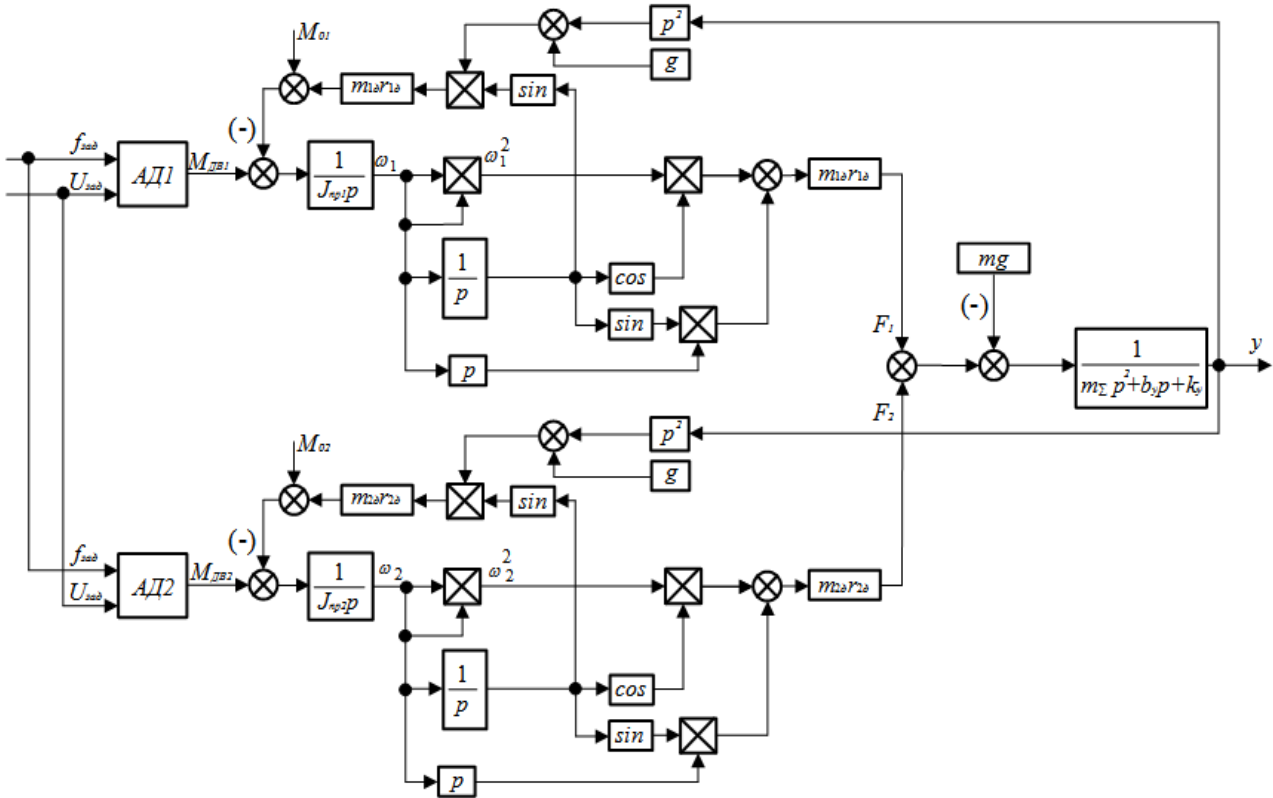


Рисунок 2 – Структурная схема электротехнического комплекса вибростола с асинхронными дебалансными вибродвигателями

Рассмотрена нелинейная математическая модель асинхронного вибродвигателя, произведена ее линеаризация и определена передаточная функция вибродвигателя при скалярном частотном управлении.

Произведена линеаризация математической модели электротехнического комплекса вибрационного стола с дебалансными вибродвигателями и найдена его передаточная функция, связывающая изображение перемещения $y(p)$ вибростола с изображением частоты $f_1(p)$ питающего напряжения статорных обмоток вибродвигателей

$$W_{yf}(p) = \frac{y(p)}{f_1(p)} = \frac{k_{yf} p^2}{a_{02} p^6 + a_{12} p^5 + a_{22} p^4 + a_{32} p^3 + a_{42} p^2 + a_{52} p + 1} \quad (2)$$

$$\text{где } k_{yf} = \frac{6m_{1d} r_{1d} k_{dy}}{k_y}; \quad a_{02} = \frac{a_{01} m_{\Sigma}}{k_y \omega_{10}^2}; \quad a_{12} = \frac{a_{01} b_y + a_{11} m_{\Sigma}}{k_y \omega_{10}^2};$$

$$a_{22} = \frac{a_{01} k_y + a_{11} b_y + (a_{01} \omega_{10}^2 + 1) m_{\Sigma}}{k_y \omega_{10}^2}; \quad a_{32} = \frac{a_{11} k_y + b_y}{k_y \omega_{10}^2} + \frac{a_{01} b_y + a_{11} m_{\Sigma}}{k_y};$$

$$a_{42} = \frac{1}{\omega_{10}^2} + a_{01} + \frac{a_{11} b_y + m_{\Sigma}}{k_y}; \quad a_{52} = a_{11} + \frac{b_y}{k_y}.$$

Формула (2) на начальной частоте питающего напряжения 50 Гц для рассматриваемого вибрационного стенда с массой стола 230 кг принимает следующее численное значение

$$W_{yf}^{50}(p) = \frac{y(p)}{f_1(p)} = \frac{1,1441 \cdot 10^{-4} p^2}{5,6946 \cdot 10^{-12} p^6 + 6,3969 \cdot 10^{-10} p^5 + 5,8791 \cdot 10^{-7} p^4 + 6,2021 \cdot 10^{-5} p^3 + 3,6007 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,033232 p + 1} \quad (3)$$

Компьютерное моделирование передаточной функции (3) позволило получить график колебаний вибростола (рисунок 3). Анализ графика показывает, что амплитуда колебаний равна 2 мм.

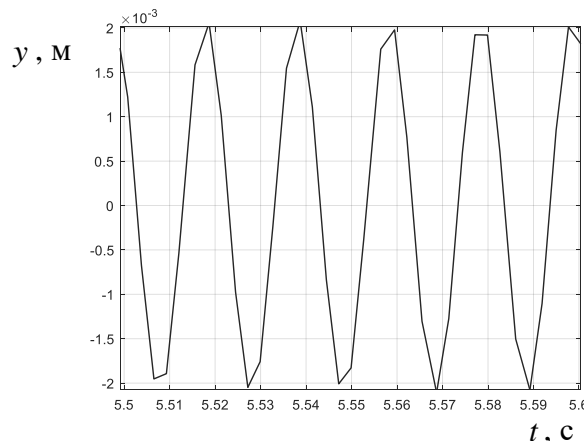


Рисунок 3 – График колебаний вибростола на начальной частоте питающего напряжения 50 Гц, построенный по передаточной функции (3)

Для сравнения проведено моделирование нелинейной модели, представленной на рисунке 2. Анализ графика показывает, что амплитуда колебаний равна 1,95 мм (рисунок 4).

Аналогичные исследования передаточной функции и нелинейной расчетной модели проведены на частоте питающего напряжения 25 Гц.

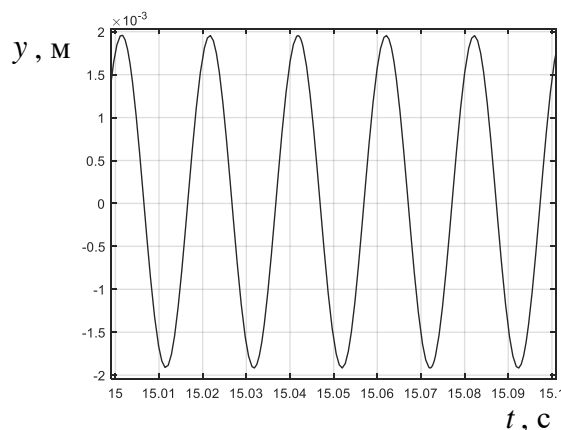


Рисунок 4 – График колебаний вибростола на частоте питающего напряжения 50 Гц, построенный с помощью нелинейной расчетной модели

Проведенное компьютерное моделирование позволяет сделать вывод, что полученная передаточная функция электротехнического комплекса вибростола с дебалансными вибродвигателями адекватна реальным процессам. Она позволяет на этапе проектирования вибрационной установки определить амплитуды колебаний на разных частотах питающего напряжения вибродвигателей с малой погрешностью.

В третьей главе предложены методы снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола.

Проведено компьютерное моделирование электротехнического комплекса вибрационного стола при вариации задаваемого темпа разгона и торможения вибродвигателей, а также изменении массы вибрационного стола от 230 кг до 480 кг с шагом в 50 кг. Определены максимальные амплитуды колебаний при прохождении резонансной частоты в момент разгона и торможения вибродвигателей. Например, при темпе разгона и торможения 5 Гц/с, формируемого частотным преобразователем, графики колебаний вибрационного стола при сум-

марной массе стола 230 кг будут выглядеть следующим образом (рисунки 5 и б). Результаты моделирования при заданном темпе разгона и торможения 5 Гц/с и изменяемой массой вибростола от 230 кг до 480 кг представлены в таблице 1.

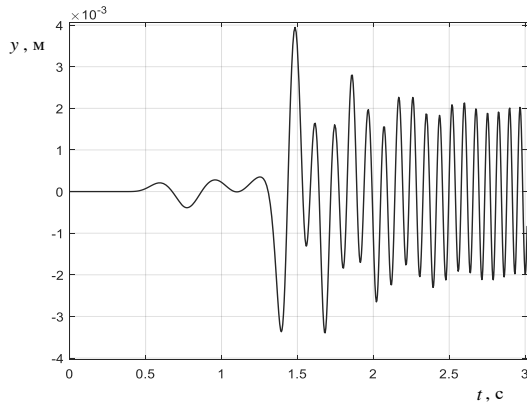


Рисунок 5 – График колебаний вибростола массой 230 кг при разгоне с темпом 5 Гц/с

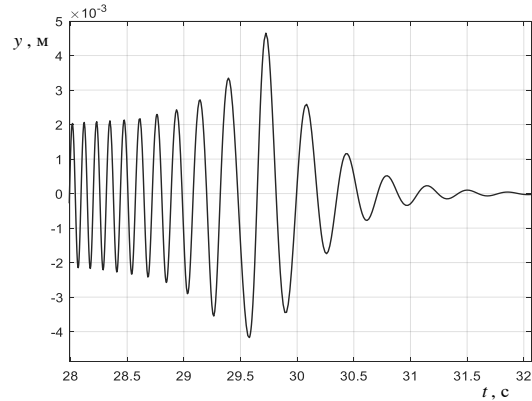


Рисунок 6 – График колебаний вибростола массой 230 кг при торможении с темпом 5 Гц/с

Таблица 1 – Зависимости максимальных амплитуд колебаний при прохождении резонансной частоты при разгоне $y_{\max.раз}$ и торможении $y_{\max.тор}$

$\left \frac{df_{зад}}{dt} \right $, Гц/с	Амплитуды колебаний	$m_{пл} + m_u$, кг					
		230	280	330	380	430	480
5	$y_{\max.раз}$, мм	3,95	2,93	2,63	2,48	2,32	2,18
	$y_{\max.тор}$, мм	4,65	3,13	3,12	4,65	1,95	1,5
	$y_{уст}$, мм	1,95	1,49	1,32	1,31	1,01	0,94

Анализ полученных результатов, позволил сделать вывод, что резонансные явления существенно увеличивают амплитуды колебаний до 2,7 раз, снижая ресурс работы упругих элементов.

Проведено моделирование работы вибрационного стола при использовании функции пропуска резонансной частоты в инверторе. Однако, примененный метод показал незначительное уменьшение амплитуд резонансных колебаний.

Предложен метод снижения амплитуд резонансных колебаний за счет коррекции статической характеристики частотного преобразователя, связыва-

ющей напряжением с частотой, а именно зависимость U_1 от f_1 . Задаваясь некоторой величиной Δf , предлагается сформировать характеристику $U_1(f_1)$ частотного преобразователя при скалярном управлении асинхронными вибродвигателями, которая определяется следующими аналитическими выражениями

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= k_{U1}f_1 + U_0, \text{ при } 0 \leq f_1 \leq f_{рез} - \Delta f \text{ и } f_{рез} + \Delta f < f_1 \leq f_{1ном}; \\ U_1 &= (k_{U1} - k_1)f_1 + k_1(f_{рез} - \Delta f) + U_0, \text{ при } f_{рез} - \Delta f < f_1 \leq f_{рез}; \\ U_1 &= (k_{U1} + k_1)f_1 - k_1(f_{рез} + \Delta f) + U_0, \text{ при } f_{рез} < f_1 \leq f_{рез} + \Delta f, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $k_1 = \frac{k_{U1}f_{рез} + U_0 - U_{рез}}{\Delta f}$; U_0 и $U_{рез}$ – величины фазного напряжения на нулевой и резонансной частоте, соответственно.

Вид такой характеристики при $U_{рез} = 0$ приведен на рисунке 7.

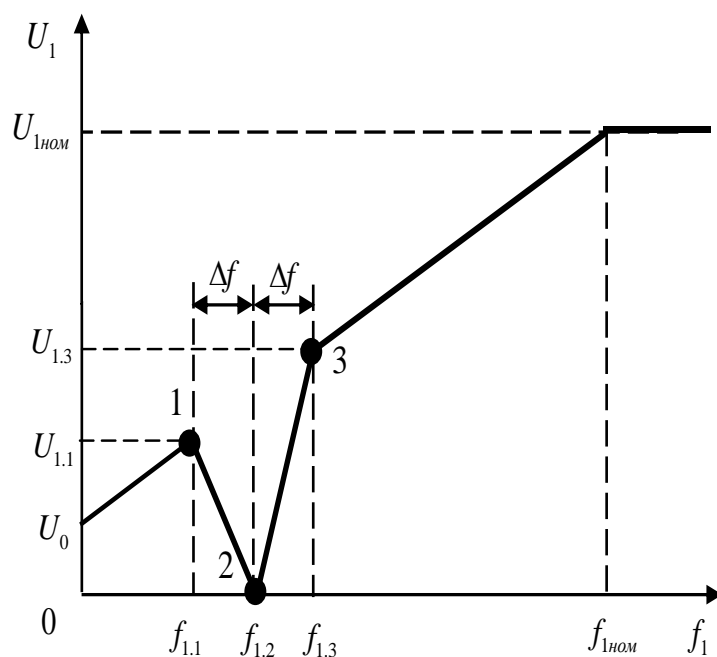


Рисунок 7 – Предлагаемый график зависимости U_1 от f_1 частотного преобразователя для уменьшения амплитуд резонансных колебаний

Результаты моделирования электротехнического комплекса вибрационного стола в случае применения предлагаемой статической коррекции характеристики инвертора при $\Delta f = 2$ Гц, $U_0 = 0$ и заданном темпе разгона и торможения 5 Гц/с представлены в таблице 2.

Проведено также исследование зависимости амплитуд резонансных колебаний в зависимости от U_0 и определена ее оптимальная величина, равная 4 В для рассматриваемого вибрационного стенда (таблица 3). Анализ таблицы 3 показывает, что предложенный метод позволяет снизить амплитуды резонансных колебаний вибрационного стола в 1,3 раза.

Таблица 2 – Зависимость максимальных амплитуд резонансных колебаний вибростола при разгоне $y_{\max.раз}$ и торможении $y_{\max.тор}$ от величины Δf и $\left| \frac{df_{зад}}{dt} \right|$

Δf , Гц	$\left \frac{df_{зад}}{dt} \right $, Гц/с	Амплитуды колебаний (мм)	$m_{nl} + m_u$					
			230	280	330	380	430	480
2	5	$y_{\max.раз}$	4,49	3,56	2,87	2,59	2,37	–
		$y_{\max.тор}$	4,21	3,5	2,68	2,39	1,79	–

Таблица 3– Значения амплитуд резонансных колебаний в зависимости $y_{\max}(U_0)$

при величине $\Delta f = 2$ Гц и $\left| \frac{df_{зад}}{dt} \right| = 5$ Гц/с

Δf , Гц	$\left \frac{df_{зад}}{dt} \right $, Гц/с	Амплитуды колебаний (мм)	U_0 , В									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	5	$y_{\max.раз}$	4,39	4,27	4,19	3,96	4,11	4,09	4,25	4,45	4,63	4,72
		$y_{\max.тор}$	4,24	3,42	3,26	3,17	4,62	4,5	4,02	3,77	3,5	3,39

Для реализации статической характеристики, приведенной на рисунке 7, необходим частотный преобразователь со свободно программируемой зависимостью напряжения от частоты по точкам, причем достаточно иметь всего три таких точки. Разработана методика расчета координат свободно программируемой зависимости напряжения от частоты инвертора, которая представлена в виде алгоритма (рисунок 8).

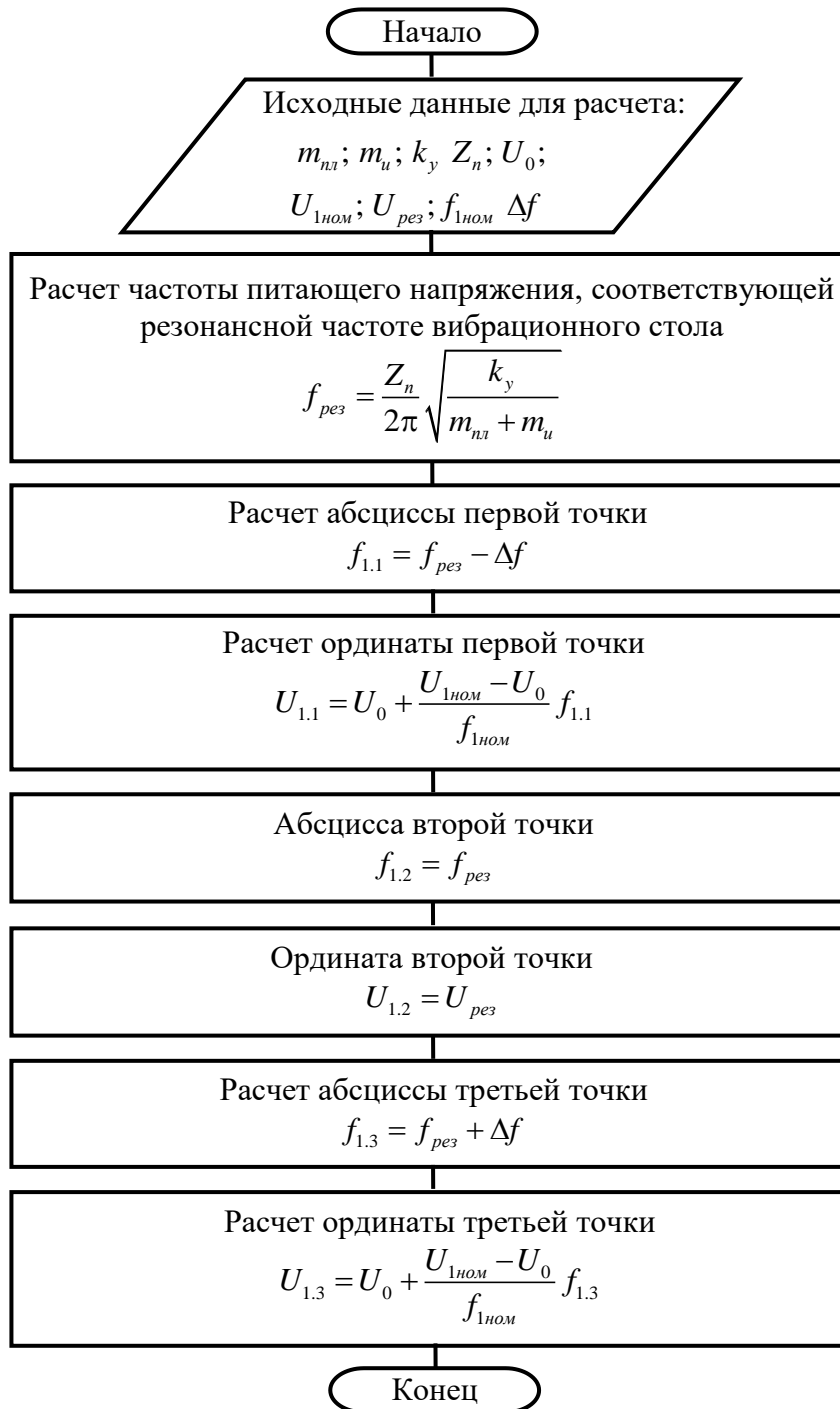


Рисунок 8 – Алгоритм расчета координат точек 1, 2 и 3

Предложен метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола за счет использования двух частотных преобразователей, обеспечивающих асинхронный разгон и торможение дебалансных вибродвигателей. Результаты моделирования показывают, что при введении задержки времени τ на запуск и торможение второго вибродвигателя амплитуда колебаний при прохождении резонанса снижаются в 2,18 раза (в таблицу 4).

Таблица 4 – Значения амплитуд резонансных колебаний $y_{\max.раз}$ и $y_{\max.тор}$ при асинхронном запуске и торможении вибродвигателей в зависимости от задержки времени τ

τ , с	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14
$y_{\max.раз}$, мм	3,77	3,26	2,36	2,4	2,43	2,81	2,78
$y_{\max.тор}$, мм	4	3	1,91	2,24	3,58	2,65	3,39

Разработаны также варианты технической реализации конденсаторного и симисторно-конденсаторного устройств, позволяющие снизить на 14,2% амплитуды резонансных колебаний вибрационного стенда при аварийном торможении вибродвигателей в случаях пропадания напряжения питания или сбоя в работе частотных преобразователей.

В четвертой главе проведено описание экспериментальной установки (рисунок 10), предназначенной для исследования амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола при различных режимах управления скоростью вибродвигателей с помощью частотного преобразователя. Произведен расчет ее параметров и осуществлено компьютерное моделирование.

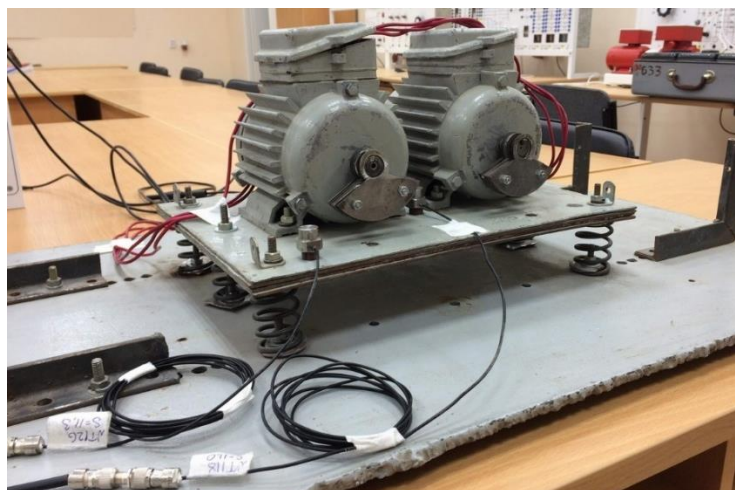


Рисунок 10 – Экспериментальная установка, оснащенная двумя асинхронными двигателями 4АА56В4У3 с дебалансами

Получена передаточная функция электротехнического комплекса экспериментальной установки, которая на начальной частоте питающего напряжения 50 Гц принимает следующее численное значение

$$W_{yf}^{50}(p) = \frac{y(p)}{f_1(p)} = \frac{1,143129 \cdot 10^{-6} p^2}{2,33864 \cdot 10^{-12} p^6 + 9,999831 \cdot 10^{-11} p^5 + 7,917371 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,998922 \cdot 10^{-6} p^3 + 5,724106 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,013225p + 1}. \quad (4)$$

Компьютерное моделирование передаточной функции (4) позволяет получить расчетный график колебаний экспериментального вибростола (рисунок 11).

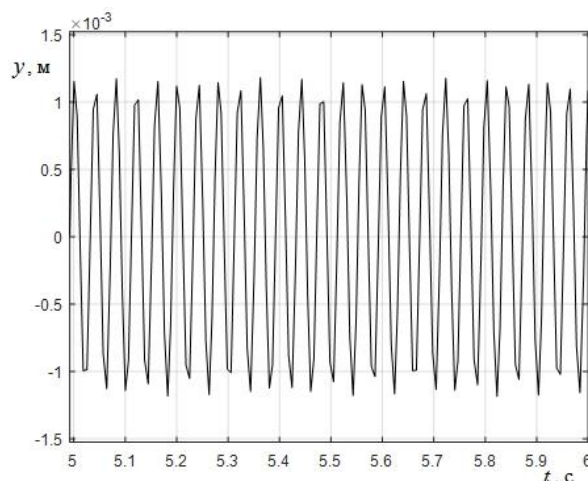


Рисунок 11 – Расчетный график колебаний экспериментального вибрационного стола на начальной частоте питающего напряжения 50 Гц, построенный по передаточной функции (4)

Анализ графика показывает, что с помощью разработанной линеаризованной математической модели электротехнического комплекса вибрационного стола в виде передаточной функции (2) прогнозируется средняя амплитуда колебаний 1,091 мм. Результаты натурных испытаний (рисунок 12) показали, что установившееся значение колебаний вибрационного стола экспериментальной установки составляет $y_{уст} = 1,07$ мм. Следовательно, относительная погрешность определения амплитуды колебаний вибрационного стола по передаточной функции (2) не превышает 1,96%, и линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стола с дебалансными асинхронными вибродвигателями может быть использована при определении амплитуд колебаний вибрационной системы на этапе проектирования. Максимальное перемещение вибростола при прохождении резонанса составляют $y_{\max. разг.} = 6,47$ мм

Проведена техническая реализация предлагаемой коррекции статической характеристики частотного преобразователя, при этом амплитуда колебаний при прохождении резонанса стала равной $y_{\max.разг.} = 4,61$ мм (рисунок 13). Таким образом результаты натурных экспериментов показали эффективность предложенного метода, который позволил снизить амплитуды резонансных колебаний в 1,4 раза.

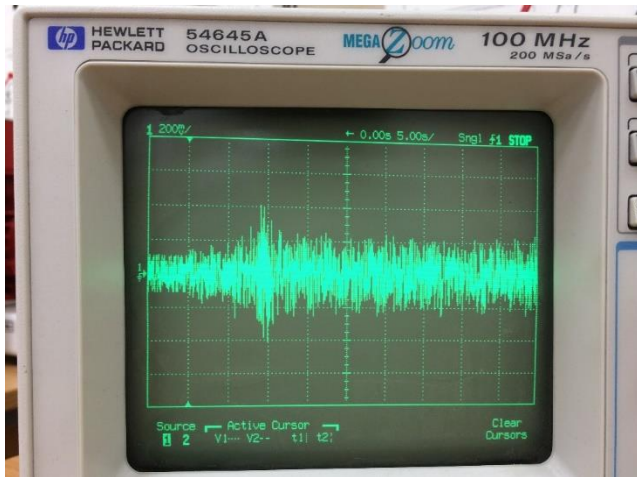


Рисунок 12 – Амплитуды виброускорений без коррекции статической характеристики частотного преобразователя

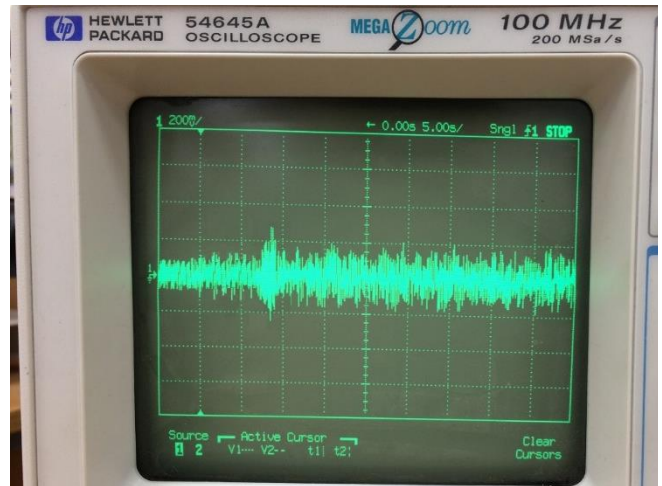


Рисунок 13 – Амплитуды виброускорений при коррекции статической характеристики частотного преобразователя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана уточненная линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями в виде передаточной функции, позволяющая определить на этапе проектирования амплитуду колебаний с погрешностью менее 2%.

2. Разработан метод коррекции статической характеристики частотного преобразователя, обеспечивающий снижение в 1,4 раза амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

3. Разработана методика и алгоритм расчета координат свободно программируемой зависимости напряжения от частоты, позволяющие корректно настраивать частотный преобразователь для обеспечения снижения амплитуд резонансных колебаний.

4. Предложен эффективный метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола в 2,18 раза, заключающийся в использовании двух частотных преобразователей, осуществляющих асинхронный разгон и торможение дебалансных вибродвигателей.

5. Разработана уточненная нелинейная модель вибрационного стола, оснащенного двумя частотными преобразователями, учитывающая запаздывание на включение режимов разгона и торможения асинхронных дебалансных вибродвигателей.

6. Предложен вариант технической реализации симисторно-конденсаторного устройства, позволяющий снизить на 14,2% амплитуды резонансных колебаний при аварийном торможении вибродвигателей в случаях пропадания напряжения питания и сбоя в работе частотных преобразователей.

7. Проведены натурные эксперименты, подтверждающие адекватность теоретических исследований и эффективность разработанных методов снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

Рекомендации

1. Разработанные методы снижения амплитуд резонансных колебаний рекомендуется применять в научных лабораториях и предприятиях, где используются механические испытательные вибрационные стенды зарезонансного типа с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

2. Результаты исследования электротехнического комплекса вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями могут быть использованы предприятиями, которые занимаются разработкой и проектированием испытательных вибрационных стендов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на разработку уточненных линеаризованных математических моделей электротехнического комплекса вибрационного стола, учитывающих влияние переменного момента нагрузки на асинхронные дебалансные вибродвигатели и регулируемую задержку включения частотных преобразователей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дмитриев В.Н. Исследование тормозных режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя / В.Н. Дмитриев, А.Л. Кислицын, **Д.И. Дунаев** // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 3 – 4. – С. 82 – 88.
2. **Дунаев Д.И.** Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя при влиянии статического момента / Д.И. Дунаев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14. – № 3. – С. 22 – 27.
3. Кислицын А.Л. Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя / А.Л. Кислицын, **Д.И. Дунаев**, С.Н. Жирнов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4(41). – С. 11 – 16.
4. Ведерников А.С. Коррекция статической характеристики частотного преобразователя для уменьшения амплитуд резонансных колебаний вибростола / А.С. Ведерников, **Д.И. Дунаев** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2021. – Т. 29. – № 2. – С. 117 – 128.

- в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus

5. Alexander Starikov, **Dmitry Dunaev**. Research of the Effect of the Inverter Resonance Frequency Skip Function on the Operation of a Vibration Stand in Acceleration and Braking Modes // 2020 International Multi-Conference on Industrial En-

gineering and Modern Technologies (FarEastCon) IEEE *Xplore*, 2020. Pp. 1–5.
DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271223.

- в прочих сборниках и материалах:

6. Дмитриев В.Н. Математическое моделирование асинхронного вибрационного электропривода / В.Н. Дмитриев, **Д.И. Дунаев**, Н.А. Лунина // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 312 – 315.

7. Дмитриев В.Н. Исследование частотно-управляемого вибрационного электропривода / В.Н. Дмитриев, Н.А. Лунина, **Д.И. Дунаев**, А.С. Агапов // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 48-й научно-технической конференции. В. 3 ч.– Ульяновск: УлГТУ, 2014. – Ч 1. – С. 6 – 9.

- патенты:

8. Патент России № 2657010, МПК H02P 3/20. Асинхронный электропривод / **Д.И. Дунаев**, С.Н. Жирнов, Р.Н. Шакиров (Россия) // Опубл. 08.06.2018, Бюл. № 16.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 6 от 29 марта 2022 г.)

Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244