

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»

 В.В. Тютиков

2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертационную работу Дунаева Дмитрия Ивановича «Снижение амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### 1. Актуальность темы диссертационной работы

Отличительной чертой и главным достоинством механических вибрационных стендов с асинхронными дебалансными вибродвигателями является их конструктивная простота и низкая себестоимость среди известных вибрационных машин. Поэтому применение такого типа стендов аргументировано в отраслях народного хозяйства, научных лабораториях и военно-промышленных комплексах. С другой стороны, основным недостатком механических вибрационных стендов является резкое увеличение амплитуд колебаний вибрационного стола при прохождении зоны резонанса в процессе разгона и торможения вибродвигателей, что сказывается неблагоприятным образом на элементах конструкции стенда и вибрационной системе в целом. Поэтому разработка методов снижения амплитуд резонансных колебаний является актуальной задачей. Актуально разработка математической модели вибрационного стенда в терминах передаточной функции, которая

позволит расчётным образом определять амплитуды колебаний при различных частотах питающего напряжения вибродвигателей.

## **2. Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основная часть работы изложена на 121 странице машинописного текста, иллюстрирована 65 рисунками и 13 таблицами. В приложениях приведены свидетельства о поверке измерительной части экспериментальной установки и акт внедрения результатов научных исследований. Библиографический список содержит 82 наименования на 9 страницах.

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость диссертации. Автор выделяет необходимость разработки новых эффективных методов снижения амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями и разработки линеаризованной математической модели электротехнического комплекса вибрационного стенда с вибродвигателями в терминах передаточных функций, позволяющей на этапе проектирования определить амплитуды колебаний на разных частотах питающего напряжения вибродвигателей.

**В первой главе** проведена классификация вибрационных машин, определены области их применения. Рассмотрены известные математические модели вибрационных стендов, приведено их математическое описание и определены их недостатки. Показано, что основным недостатком механических вибрационных стендов являются резонансные амплитуды колебаний в момент разгона и торможения вибродвигателей. Проведен анализ известных методов уменьшения амплитуд резонансных, определены их достоинства и недостатки.

**Во второй главе** определен объект исследования, который описывается как колебательное звено с ярко выраженной резонансной частотой. Проведено математическое описание вибрационного стола с дебалансными возбудителями. На основании полученных уравнений разработана нелинейная структурная схема электро-

технического комплекса вибростола с асинхронными дебалансными вибродвигателями и ее расчетная модель. Приведено математическое описание асинхронного дебалансного вибродвигателя. В целях проведения синтеза и анализа системы управления электроприводом электротехнического комплекса вибростола с двумя вибродвигателями при скалярном частотном управлении, выведены передаточные функции. Выявлено, что полученная передаточная функция электротехнического комплекса вибрационного стола с дебалансными асинхронными вибродвигателями позволяет на этапе проектирования вибрационного стенда определять амплитуды колебаний на разных частотах питающего напряжения вибродвигателей с погрешностью не более 8%. Адекватность разработанной линеаризованной модели вибрационного стола с дебалансными вибродвигателями подтверждается проведенным компьютерным моделированием.

**В третьей главе** разработаны методы уменьшения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями. Проведено моделирование работы вибрационного стенда, управляемого частотным преобразователем, и определены максимальные амплитуды резонансных колебаний, которые могут превышать амплитуды установившихся колебаний до 2,7 раз. Выполнено моделирование методов снижения амплитуд резонансных колебаний, таких как: применение функции пропуска резонансных частот инвертора; коррекция статической характеристики  $U_1(f_1)$  частотного преобразователя; снижение амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола за счет асинхронного запуска и торможения вибродвигателей. Показано, что метод снижения амплитуд резонансных колебаний при применении функции пропуска резонансных частот инвертора приводит к незначительному изменению амплитуд колебаний.

Разработана математическая модель и подробно исследован метод снижения амплитуд резонансных колебаний за счет коррекции статической характеристики напряжение - частота инвертора, разработана методика расчета точек свободно программируемой кривой  $U_1(f_1)$ , позволяющая корректно настраивать частотный преобразователь. Установлено, что данный метод позволяет уменьшить резонансные амплитуды в 1,3 раза.

Разработана математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стола, оснащенного двумя частотными преобразователями, осуществляющими асинхронный запуск и торможение вибродвигателей с задержкой времени, что позволяет уменьшить резонансные амплитуды в 2,18 раза.

При возникновении аварийных режимов остановки вибродвигателей автором предлагается использовать разработанные схемы конденсаторного и симисторно-конденсаторного торможения.

**В четвертой главе** рассматривается экспериментальная вибрационная установка, позволяющая проводить натурные исследования режимов работы вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями, оснащенная частотным преобразователем «Altivar 71» фирмы Schneider Electric. Автором произведена настройка инвертора и технически реализована коррекция статической характеристики  $U_1(f_1)$  частотного преобразователя, которая обеспечила снижение резонансных амплитуд колебаний вибростола в 1,4 раза, подтвердив работоспособность и эффективность предложенного метода.

Результаты натурального эксперимента показали, что погрешность определения амплитуды установившихся колебаний вибрационного стола по полученной передаточной функции составляет 1,96%. Это позволило сделать вывод об адекватности проведенных теоретических исследований.

### **3. Научные результаты диссертационной работы и анализ их новизны**

Научную новизну диссертационной работы Дунаева Д.И. определяют следующие основные результаты:

1. 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. Метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями, отличающийся видом коррекции статической характеристики частотного преобразователя.

3. 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. Метод снижения амплитуд резонансных колебаний вибрационного стола, отличающийся использованием двух частотных преобразователей, обеспечивающих асинхронный разгон и торможение дебалансных вибродвигателей.

#### **4. Практическое значение диссертационной работы**

Практическая значимость рассматриваемой диссертационной работы определяется тем, что:

1. 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. Методы воздействия на электротехнический комплекс вибрационного стола позволяют снизить амплитуды резонансных колебаний, что благоприятно сказывается на работе упругих элементов вибрационной системы.

3. 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.

Следует также отметить, что техническое решение, представленное в диссертации Дунаева Д.И., защищено патентом на изобретения.

#### **5. Оценка достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Основные научные положения, выводы и рекомендации, представленные в

диссертационной работе, получены Дунаева Д.И. на основе методов теории электропривода, электрических машин, прикладной теории механических колебаний, преобразования Лапласа и численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

Выводы, сформулированные Дунаевым Д.И. по диссертационной работе, структурированы в соответствии с содержанием работы. В них убедительно отражена научная и практическая ценность проведенных исследований по снижению амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

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

## **6. Замечания по диссертации**

1. Формулы (2.45) и (2.46) являются грубым приближением при осуществлении линеаризации множительных звеньев. С учетом того, что таким образом производится линеаризация 6 множительных звеньев, то следует ожидать большую погрешность линеаризованной математической модели электротехнического комплекса вибрационного стенда с асинхронными дебалансными вибродвигателями.

2. Математическая модель асинхронного двигателя, используемая автором при нахождении линеаризованной математической модели электротехнического комплекса вибрационного стенда, также является существенно упрощенной. Система (2.34), содержащая 5 дифференциальных уравнений первого порядка, заменяется одним дифференциальным уравнением (2.35) второго порядка.

3. В диссертации не указано, какова допустимая величина амплитуды колебаний рассматриваемого вибрационного стола, поэтому сложно судить о степени влияния амплитуд резонансных колебаний на работу механической части.

4. Основные достижения по снижению амплитуд резонансных колебаний вибрационного стенда достигнуты автором с помощью оригинальной коррекции статической характеристики частотного преобразователя и асинхронного запуска вибродвигателей, что отражено в положениях научной новизны. В связи с этим в

диссертации можно было не приводить данные по исследованию влияния функции пропуска резонансной частоты на амплитуды резонансных колебаний.

5. Из расчетной модели, приведенной на рисунке 3.24, не ясно, как учитывалось влияние емкости конденсаторов на работу вибрационного стенда в режиме аварийного торможения.

6. Не понятно, почему натурные эксперименты проводились не на реальном вибрационном стенде, рассмотренном во второй и третьей главах диссертации, а на некоторой экспериментальной установке, отличающейся как по массо-габаритным показателям, так и по типу применяемых асинхронных двигателей.

7. В диссертации не рассмотрен вопрос о регулировании амплитуды колебаний вибрационного стенда.

## **7. Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности**

Оценка содержания диссертационной работы Дунаева Д.И. проведена по паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»:

– **направлениями исследования** являются «... принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... и специального назначения»;

– **область исследования** соответствует пунктам: 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, математическое... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация...», 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях»;

– **объектом исследования** «...являются электротехнические комплексы и системы ... электропривода...».

В соответствии с этим следует констатировать, что тема и содержание диссертации Дунаева Д.И. соответствуют паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### **8. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат диссертации Дунаева Д.И. полностью соответствует диссертационной работе по всем квалифицируемым признакам, а именно: по цели, задачам и основным положениям, определениям актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости.

### **9. Публикации и апробация диссертационной работы**

Основные научные результаты диссертации Дунаева Д.И. отражены в 8 публикациях, в том числе в 1 патенте РФ на изобретения, 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах из Перечня, утвержденного ВАК РФ, 1 статья, индексируемая в международных базах цитирования Scopus.

Положения и результаты диссертации докладывались Дунаевым Д.И. на 3 научных конференциях, в том числе на 2 международных.

Названные материалы с достаточной полнотой отражают существо рассматриваемой работы.

### **10. Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки и производства**

Значимость диссертационной работы Дунаева Д.И. для производства определяется тем, что его результаты 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.

Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки определяется новыми научными знаниями, отражающими математические модели вибрационных стенов с асинхронными дебалансными вибродвигателями, управляемыми

от частотного преобразователя. Автором разработана уточненная линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса вибрационного стола с асинхронными дебалансными вибродвигателями в виде передаточной функции, позволяющая определить на этапе проектирования амплитуды колебаний с погрешностью менее 2%.

## 11. Заключение

Диссертационная работа Дунаева Дмитрия Ивановича «Снижение амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью отвечает квалификационным признакам и принципам соответствия, которые установлены нормативным документом «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертация Дунаева Дмитрия Ивановича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором единолично. Приведенные выше замечания не имеют принципиального характера и не снижают ценности диссертации.

В диссертационной работе представлено решение актуальной проблемы по снижению амплитуд резонансных колебаний в вибрационных стендах с асинхронными дебалансными вибродвигателями, имеющей существенное значение в области электротехнических комплексов и систем, а в частности в вибрационной технике.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Дунаев Дмитрий Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных

установок» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», протокол № 9 от 11 мая 2022 г.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Адрес: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

Тел.: +7 (4932) 269706 факс: +7 (4932) 385-701

Электронная почта: office@ispu.ru coolenko@drive.ispu.ru

Сайт: <http://ispu.ru/>.

Заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭПиАПУ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

к.т.н., доцент



Куленко Михаил Сергеевич

Подпись заведующего кафедрой ЭПиАПУ Куленко М.С. заверяю:

Ученый секретарь ученого Совета ИГЭУ  
«11» *Мая* 2022



Юлия Вадимовна Вылгина