

---

## АННОТАЦИИ

---

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Александров Г. А., Кравченко М. В., Тимофеев К. Ю., Шерemet А. И. Анализ способов построения идентификаторов переменных состояния асинхронного двигателя // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Для реализации классических принципов векторного управления автоматизированным электроприводом необходима полная и достоверная информация о текущих значениях переменных состояния. Вместе с тем, в силу конструктивных особенностей асинхронного двигателя, электромагнитные переменные его роторной цепи (ток и потокосцепления ротора) труднодоступны для непосредственного определения с помощью измерительных преобразователей. В этих условиях текущее состояние объекта управления оценивается косвенно с помощью идентификаторов состояния, представляющих собой вычислительные устройства, работающие в реальном масштабе времени. В результате проведенного анализа современных способов идентификации переменных состояния асинхронного двигателя с позиции сложности их технической реализации предложена собственная математическая модель идентификатора. Разработанный идентификатор работает на основе информации о векторе тока статора, угловой частоте гладкой составляющей напряжения статора и о скорости вращения вала. Однако следует иметь в виду, что при подаче в идентификатор измеренных значений токов статора, при численном интегрировании уравнений в неидеальной цифровой модели, вычисленные модельные значения переменных могут отличаться от фактических. Различия могут возникать также в том случае, если начальные условия, установленные в вычислительной модели, не соответствуют начальным условиям для объекта. Аналогичные последствия вызывают и при воздействии параметрических возмущений в объекте управления, связанных с изменением его параметров в процессе работы. В таких случаях следует применять критерий адекватности информации на выходе идентификатора, по которому можно было бы судить о степени несоответствия вычислительных и истинных значений переменных.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, идентификатор, переменные состояния, векторное управление.

**Болтенко А. А., Ивченков Н. В., Шерemet А. И. Аналитический обзор наблюдателей состояния, используемых в бездатчиковых векторных системах управления электроприводами // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Существует много различных решений для построения асинхронных бездатчиковых электроприводов. Как правило, под бездатчиковым электроприводом понимают электропривод, не содержащий датчика скорости. Датчики же электрических величин (напряжения или тока) в подобных системах присутствуют. Бездатчиковые системы управления требуют применения алгоритмов оценки скорости. Обеспечение высоких показателей качества в динамике осуществляется с помощью векторного управления, в котором взаимное расположение векторов потокосцепления и токов определяет динамические свойства автоматизированной электромеханической системы. Значения величин векторов потокосцеплений чаще всего рассчитываются с помощью математической модели статора и ротора асинхронного двигателя. В электроприводах с бездатчиковым векторным управлением для оценки угловой скорости применяют различные математические модели асинхронного двигателя. Параметры подобных моделей не всегда адекватно воспроизводят параметрами двигателя, они могут значительно изменяться при вариации температурных режимов или других условий работы. Поэтому бездатчиковые системы векторного управления, кроме моделей для определения

скорости, должны иметь средства идентификации параметров двигателя. В статье выполняется аналитический обзор наблюдателей состояния, используемых в бездатчиковых векторных системах управления электроприводами, который показал, что их можно разделить на две группы: измеряющие и работающие на базе некоторых математических моделей. Измеряющие наблюдатели осуществляют измерения некоторых величин, а другие – получают путем расчета. Наблюдатели, работающие на основе математических моделей, зависят от их точности и математического аппарата, применяемого для расчета неизвестных параметров. Задача выбора того или иного наблюдателя состояния для бездатчиковой векторной системы управления зависит от специфики автоматизированной электромеханической системы и технологического процесса, в котором она задействована.

**Ключевые слова:** бездатчиковое векторное управление, наблюдатель, асинхронный двигатель, электромеханическая система.

**Иноземцев А. М., Шеремет А. И. Анализ технических требований к электроприводам конвейеров для транспортировки грузов в металлургическом производстве // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Система конвейерных линий является неотъемлемой частью в обеспечении бесперебойной работы современной доменной печи, где совершенно невозможны длительные простои, которые приводят к потере производства и соответственно к огромным затратам при выпуске готовой продукции. Высокая ответственность их работы и назначение определяют особую степень важности представленного типа механизмов в общем технологическом процессе. Нагрузка на современных высокопроизводительных ленточных конвейерах настолько велика, что создать необходимое тяговое усилие с помощью одного приводного барабана при допустимом натяжении ленты не всегда представляется возможным. Поэтому высокопроизводительные конвейеры имеют по два и более приводных барабана. В связи с этим возникает задача рационального распределения суммарного тягового усилия, тягового фактора и общей мощности на приводных барабанах, взаимодействующих через ленту. В статье проводится анализ технических требований к электроприводам многодвигательных конвейеров для транспортировки грузов в металлургическом производстве. Анализ технических требований к электроприводам конвейеров невозможно осуществлять без учета их сложной механической части. Механическая часть представляет собой сложную систему с распределенной по длине конвейера массой и упругостью тягового элемента. При расчете динамических свойств электропривода конвейера целесообразно находить упрощенную передаточную функцию продольно-упругого грузонесущего элемента с грузом, который является распределенным по поверхности в разных ее точках. Следует настраивать регуляторы векторной системы управления электроприводом конвейера таким образом, чтобы не возникало упругих колебаний вдоль тягового элемента, поскольку при их наличии процесс пуска будет колебательным.

**Ключевые слова:** многодвигательный привод, конвейер, распределенная нагрузка, векторное управление.

**Сагайда П. И., Микаэлян Э. В. Исследование методов, моделей и информационных технологий для прогнозирования потребления электроэнергии // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Рассмотрены вопросы разработки программного комплекса для проведения прогнозирования потребления электроэнергии. Проанализированы существующие методы прогнозирования потребления электроэнергии. Выделены основные критерии оценки результатов прогнозирования. Определено, по каким параметрам нужно оценивать точность и качество методов прогнозирования. Создан проект программного комплекса с использованием объектно-ориентированного подхода для реализации двух методов прогнозирования потребления

электроэнергии. Разработаны подходы и алгоритм построения математической модели прогнозирования потребления электроэнергии. В ходе формирования проекта прогнозирования потребления электроэнергии будет выявлен наиболее точный результат, который в свою очередь приближен к фактическому показателю потребления электричества за определенный период времени. Для формирования модели прогнозирования учитывались сезонные факторы, которые влияют на результат прогнозирования. В качестве дополнительного исследования проводится корректировка прогноза в зависимости от погодных условий, которые в свою очередь могут существенно повлиять на прогноз потребления электроэнергии в целом. Сравниваются методы прогнозирования электропотребления на основе предварительного анализа рисков их использования. В статье дается оценка прогнозных уровней электропотребления, демонстрируются проблемы и основные подходы к прогнозированию объемов электропотребления. Анализ правильности расчетов предполагает сравнение статистических данных, полученных на этапе проведения прогнозирования потребления электроэнергии.

**Ключевые слова:** технологический процесс, методы прогнозирования, электроэнергия, показатели, результаты, оценивание, программно-методический комплекс, модель.

**Сташевский Е. О., Шеремет А. И., Ивченков Н. В. Методика синтеза алгоритма фаззи-управления автоматизированными электроприводами // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Некоторые технические задачи, которые трудно решаются классическими методами управления, можно легко решить, применив нетрадиционное управление, основанное на фаззе-логике. Применение фаззи-управления оказывается целесообразным там, где оно решает поставленные задачи лучше или дешевле, чем традиционные способы управления. При этом фаззи-управление может быть как полностью самостоятельным, так и дополнительным. Для работы с данными в фаззи-логике используется математический аппарат теории нечетких множеств. Фаззи-логика обрабатывает неопределенные данные и ситуации, используя ассоциативные понятия человека – лингвистические термины. Для фаззи-регулятора алгоритм заранее неизвестен и его составление при нескольких входах является непростой, нетривиальной задачей, решаемой итерационным способом с применением вычислительной техники. С увеличением количества фаззи-множеств для входных и выходных переменных качество управления улучшается. В статье предложена методика синтеза фаззи-регуляторов для контура положения нелинейных следящих электроприводов. Эта методика позволяет составить алгоритмы фаззи-регуляторов для коррекции следящих электроприводов в режимах больших возмущающих воздействий и компенсации статической ошибки. Относительно следящих электроприводов, в которых для контура положения используется управляющий компьютер или микроконтроллер, целесообразно применить программную реализацию фаззи-управления. При использовании микроконтроллера для создания фаззи-регулятора программа для него может быть написана на ассемблере или на языке высокого уровня C ++. Слежение за помощью предложенной реализации фаззи-регулятора может осуществляться как в программном режиме, когда траектория движения объекта наблюдения известна, так и в режиме автосопровождения, то есть по сигналу рассогласования между рабочим органом и объектом слежения.

**Ключевые слова:** фаззи-логика, синтез, нечеткие правила, дефаззификация, регулятор, алгоритм.

**Токарев А. В., Борягин Д. А., Шеремет А. И. Анализ причин повреждения асинхронных двигателей и средств диагностирования их режимов работы // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Несимметрия напряжения проявляется в резком ухудшении технико-экономических характеристик электродвигателей (увеличение потерь электроэнергии, повышение нагрева их составных частей), снижении эксплуатационной надежности и сокращение срока службы

электродвигателей. Для повышения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей, эксплуатируемых в промышленном производстве при несимметрии фазных напряжений сети, необходимо совершенствовать средства диагностирования. Это позволит эксплуатационному персоналу иметь точные данные о режиме работы электрооборудования, состоянии рабочих частей, определении время его отключения от источника питания, уменьшить износ изоляции, число отказов и аварийных выходов из строя асинхронных двигателей. Наиболее распространенными являются устройства диагностирования, реагирующие на изменение величины тока в цепи питания асинхронного двигателя. К ним относится токовая защита, которая осуществляется с помощью токовых реле, действие которых основано на электромагнитном и индукционном принципе и тепловых реле, которые реагируют на величину тепла, выделяемого в результате протекания тока по специальным элементам. Основным недостатком при использовании реле тока как устройства защиты является отключение двигателя при его запуске. Чтобы защитное устройство не отключало асинхронный двигатель при нормальном пуске, а также кратковременных пиках нагрузки, оно должно действовать не мгновенно, а с выдержкой времени. Поэтому одновременно с реле тока используют, как правило, реле времени. Для большинства асинхронных двигателей, работающих в промышленном производстве, целесообразно использовать комбинированные устройства для централизованной защиты группы двигателей, особенно работающих в потоковых технологических линиях. Анализ защитных устройств и технических средств диагностирования, выполненный в статье, показывает их несовершенство и ограниченность применения в сложных условиях производства. Повышение надежности асинхронных двигателей в сложных условиях производства требует разработки новых многофункциональных технических средств диагностирования.

**Ключевые слова:** несимметрия напряжения, асинхронный двигатель, диагностирование, комбинированное устройство диагностирования, токовая защита.

**Троцкий А. А., Лауниконис В. В., Ивченков Н. В. Сравнительный анализ современных систем синхронизации координат многодвигательных электроприводов подачи // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Многодвигательная конфигурация электроприводов на сегодняшний день находит применение в текстильной промышленности, конвейерах, полиграфическом и станочном оборудовании. Применение нескольких двигателей на направляющих одной оси даёт выигрыш по массогабаритным показателям, но появляется проблема синхронизации скоростей и положений. Выполнен обзор существующих методов синхронизации механических координат двигателей в многодвигательных электроприводах и систем на их основе. Наибольшее распространение в современной промышленности имеют такие, как система «ведущий-ведомый», метод перекрёстных связей и система с «электронным» линейным валом. Рассмотрены основные особенности структурных схем и принципы регулирования выбранных систем синхронизации многодвигательных электроприводов. Для выбранных систем было проведено моделирование в пакете прикладных программ MATLAB Simulink и получены графики переходных процессов механических координат многодвигательного электропривода при стандартных воздействиях. В результате анализа переходных процессов сделаны выводы о качестве регулирования каждой системы. На основе полученных результатов выявлено, что система синхронизации «ведущий-ведомый», хоть и является самой простой в исполнении, обладает жесткостью, недостаточной для применения в высокоточных электроприводах подачи. Система, построенная по методу перекрёстных связей, является простой в реализации, но обладает ограниченной производительностью и не подходит в тех случаях, где относительный угол является основной координатой. В системе вводится блок перекрёстных связей, величина коэффициента которого значительно влияет на колебания в контурах момента и скорости. За счет наибольшего влияния момента инерции ведущего привода в исходной системе с «электронным» линейным валом и влияния его момента, предложенный метод проще всего практически реализуем.

**Ключевые слова:** моделирование, система автоматического регулирования, электропривод подач, многодвигательный электропривод, синхронизация положения, система «ведущий-ведомый», метод перекрестных связей, «электронный» линейный вал, переходные процессы, металлорежущие станки, сравнительный анализ.

**Шаповалов В. А., Комесаренко В. О. Анализ схемных решений управления электродвигателя частотным преобразователем // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Рассмотрены варианты подключения высоковольтных двигателей к питающей сети посредством: прямого подключения к сети через высоковольтную ячейку с вакуумным выключателем; подключение к сети через устройство плавного пуска и подключение посредством преобразователя частоты. Среди данных схемных решений выделены недостатки относительно условий перегрузочной способности по пусковому току относительно номинальных значений электродвигателя; включений двигателя на предельных оборотах более одного раза в час; ограниченного срока службы вакуумных камер; отсутствия возможности регулирования оборотов двигателя. Выделен способ подключения посредством частотного преобразователя, относительно которого рассмотрены схемные решения подключений частотных преобразователей к высоковольтному электродвигателю: посредством низковольтного частотного преобразователя с использованием понижающего и повышающего трансформаторов; преобразователя частоты среднего напряжения. Рассмотренные схемные решения позволяют добиться плавного синусоидального выходного напряжения и, как следствие, повышения устойчивости системы управления двигателем; время переходных процессов сопоставимо с характеристикой разгона двигателя, при выходе на заданную скорость. Однако при данном типе подключения выделены недостатки относительно высоких токов на участке «повышающий трансформатор-электродвигатель», что приводит к большим наводкам в системе, вплоть до поломки преобразователя частоты. Используя схемное решение частотного преобразователя наборного типа, доступно: получение выходного напряжения заданной величины посредством включения нужного количества элементных ячеек; замена поломанной ячейки посредством шунтирования без остановки работы частотного преобразователя; применение законов регулирования электродвигателя в широком частотном диапазоне. Сделаны выводы относительно выполненного анализа и предоставленной информации относительно вопросов, рассмотренных в данной работе.

**Ключевые слова:** электродвигатель, частотный преобразователь, выходное напряжение, трансформатор, переходный процесс, элементная ячейка, схема управления, выходной фильтр.

**Шеремет А. И., Запорожец В. С. Применение рекуррентных нейронных сетей для выполнения машинного рерайта // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Машинное обучение представляет собой актуальную сферу научного знания, которая интенсивно развивается и имеет очень большие перспективы. В более узком смысле под машинным обучением понимают класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение поставленной задачи, а применение для этого специально обученной математической модели. Такая модель учится за счет решения большого количества подобных задач в нужной области. Одной из самых перспективных современных технологий машинного обучения является применение глубоких нейронных сетей, в основе которых лежит применение глубокого обучения. Глубокое обучение – это набор алгоритмов машинного обучения, которые позволяют создавать модели с высоким уровнем абстракции в выходных данных, используя архитектуры нейронных сетей, содержащих нелинейные преобразования сигнала. В статье выполняется демонстрация возможностей, которые предоставляет применение рекуррентных нейронных сетей для решения одной из самых сложных задач, которая стоит перед разработчиками веб-контента – рерайта текстовой информации. Смысл применения машинного обучения для обработки естественных языков заключается

в том, что глубинные нейронные сети выполняют работу, на осуществление которой в течение приемлемого промежутка времени нужно было бы применять десятки или даже сотни команд профессиональных лингвистов. Традиционные нейронные сети не имеют возможности принимать текущие решения на основе своих предыдущих суждений. Большое количество задач, решаемых при машинной обработке естественных языков, требует поэтапного анализа данных с учетом предыдущих результатов. Нейронная сеть должна «читать» предложение слово за словом, «осмысливая» его значение исходя из контекста. Рекуррентные нейронные сети содержат обратные связи и позволяют кратковременно хранить информацию, благодаря чему они как нельзя лучше подходят для обработки последовательностей слов и символов, которыми являются предложения естественного языка. Техническую реализацию рерайта предложений предложено осуществить с помощью библиотеки seq2seq, которая входит в состав TensorFlow – программного обеспечения, разработанного компанией Google для решения задач построения и обучения нейронных сетей.

**Ключевые слова:** рекуррентная нейронная сеть, рерайт, обратная связь, кратковременная память.

**Власов А. Ф., Грицай Т. С. Исследование влияния повышенной плотности тока на процесс сварки в среде защитных газов // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

В последние годы в связи с расширением использования смесей на основе аргона интерес к сварке на повышенных токах заметно растет. Одним из путей решения задачи повышения качества свариваемого металла при автоматической сварке в среде защитных газов является повышение плотности тока. Под влиянием электромагнитных и других сил разогретый и расплавленный торец электрода начинает вращаться. Сила сварочного тока, вылет и диаметр электрода оговаривают условия перехода от струйного переноса в струйно-вращательный. Процессы сварки на повышенных плотностях тока в режиме мелкокапельного или струйно-вращательного переноса требуют сварочные материалы высокого качества и надежных систем подачи электродной проволоки со скоростями 10–50 м/мин. Установлено, что плотность тока и напряжение дуги значительно влияет на характер переноса металла. Экспериментально установлено, что при сварке электродной проволокой диаметром 1,2, 1,6 и 2,0 мм в повышенной плотности тока увеличивается производительность расплавления  $G_n$  (14,6 кг/ч) и коэффициент наплавки  $\alpha_n$ . (28 г / А·ч), что в 1,5 ... 4 раза больше, чем при сварке с обычной плотностью сварочного тока (90 ... 230 А/мм<sup>2</sup>). При увеличении силы сварочного тока с 350 до 700 А глубина проплавления увеличивается с 5 до 11 мм, а ширина шва увеличивается с 12 до 21 мм, высота усиления с 1,5 до 4,5 мм. При сварке в смесях с большим содержанием аргона характерно резкое снижение разбрызгивания, улучшение формирования и внешнего вида шва. Эксперименты показали, что при токах, больших чем 200 А, процесс сварки с увеличением тока становится более стабильным, крупнокапельный перенос металла переходит в мелкокапельный, разбрызгивание уменьшается. Учитывая чувствительность процесса сварки на повышенных токах к изменению напряжения дуги и длине вылета электрода, основное преимущество следует отдавать автоматической и роботизированной сварке.

**Ключевые слова:** механизированная сварка, струйно-вращательный перенос, крупнокапельный перенос, плотность тока, защитные газы, разбрызгивание.

**Ковалевский С. В., Савченко С. С., Костюков И. А. Разработка и исследования метода уменьшения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

В публикации представлены результаты создания и исследования нового метода поличастотной вибрационной обработки сварных конструкций. Показано на примере сварной конструкции базовых деталей узлов, что они подвергаются неизбежному короблению

в последствии возникновения остаточных напряжений, которые могут иметь разнообразный характер распределения как в отдельных частях сварной конструкции, так и непосредственно в сварном шве. Представлена методика экспериментальных исследований, что предполагает фиксацию амплитудно-частотных характеристик акустического спектра свободных колебаний отдельных участков сварной конструкции. Показаны этапы проведения замеров и обработки полученных результатов, что свидетельствует об эффективности поличастотного воздействия на элементы конструкции для уменьшения пиковых значений остаточных напряжений. Результаты экспериментальных исследований подтверждают необходимость вибрационной обработки сварной конструкции путем воздействия на каждый элемент вибрацией на резонансных частотах соответственно к каждому элементу. Обоснована экономическая эффективность применения принципов к проектированию комплекса, с использованием новейшего механосборочного оборудования, рассмотрены меры по технике безопасности на механосборочном участке.

**Ключевые слова:** остаточное напряжение, коробление, сварная конструкция, акустический контроль.

**Ковалевский С. В., Коваленко Д. В. Исследование связи спектра с диагностированием нанопокрывтий деталей машин // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

В работе проанализирована литература, относительно методов измерения толщины покрытий. Выявлена проблема измерения покрытий малой толщины, нанопокрывтий. Для решения проблемы предложен новый способ измерения покрытий малой толщины с помощью созданного измерительного устройства, которое фиксирует значения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) пьезоэлектрическим элементом. Проанализирована связь спектра акустического сигнала с покрытием малой толщины, нанопокрывтием. Выдвинута гипотеза о прогнозировании толщины покрытия на основе значений АЧХ полученных спектров акустических сигналов. Приведена принципиальная схема измерения покрытия малой толщины благодаря предложенному измерительному устройству: на измерительное устройство сигнал-генератор подает возбуждающее излучение в виде «Белого шума», в пьезоэлектрическом датчике происходит составление возбуждающего излучения, АЧХ которого имеет постоянную амплитуду на всем диапазоне излучения 20–20 000 Гц, и излучения, что относится к объекту измерения, то есть образца с покрытием. Приведена последовательность проведения эксперимента. В ходе экспериментальных исследований выявлена связь спектра акустического сигнала с входными и выходными данными. Создана модель нейронной сети на основе входных данных амплитудно-частотных характеристик и исходных данных толщины покрытия. На основе этой модели спрогнозированы значения толщины покрытия. При калибровке измерительного устройства рассчитаны отклонения от действительных значений толщины покрытия и построены графики.

**Ключевые слова:** нанопокрывтие, покрытие малой толщины, амплитудно-частотная характеристика, пьезоэлектрический излучатель, пьезоэлектрический датчик.

**Ковалевский С. В., Королевский Д. М. Производство металлургической оснастки для изготовления литейных форм с применением трехмерного прототипирования // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

В данной работе представлены результаты замены существующего технологического процесса изготовления модельной оснастки вручную из древесины с применением вспомогательного оборудования на способ трехмерного прототипирования. Рассмотрены особенности существующей технологии изготовления моделей и элементов модельного комплекта, перечислено требуемое оборудование, материал и виды работ. Раскрыты недостатки традиционной технологии. Показано, что, используя технологию трехмерного прототипирования, возможна печать оболочковых моделей, с минимальным заполнением

массива модели, при этом сохраняя качество и стойкость к разрушению при формовке. Это приводит к экономии времени печати и материала, из которого производится модель. Продемонстрировано поэтапно изготовления модельной оснастки по технологии (FDM), построения модели путем послойного наплавления, которое повторяет контуры цифровой модели. Выполнен расчет времени и количества материала для изготовления модельного комплекта с помощью программного обеспечения Ultimaker Cura. Так же с помощью этого программного обеспечения произведен перевод STL модели в управляющий G-код и подготовлен к печати. Выполнено сравнение двух материалов для изготовления моделей ABS и PLA, продемонстрировано преимущество и возможность применения пластика ABS в литейном производстве для изготовления форм по моделям. Проведен анализ и сделаны выводы на основе двух сравнительных технологических расчетов производства модельных комплектов ручным способом и используя трехмерное прототипирование. В качестве объекта принят существующий технологический процесс изготовления модельного комплекта «Крышка». Анализ показал снижение себестоимости за счет уменьшения трудоемкости, количества материала, затрат на электроэнергию и технологического времени для расчета расходов.

**Ключевые слова:** трехмерное прототипирование, модельный комплект, оболочковая модель, Ultimaker Cura, 3D печать, технология FDM.

**Холодняк Ю. С., Подлесный С. В., Капорович С. В. Развитие методологии силовых расчётов плоских рам в условиях вынужденных колебаний // Научный Вестник ДГМА. – 2018. – № 1(25E).**

Выполнен анализ существующих методик силового расчёта балок и плоских рам, пребывающих под действием вынужденных колебаний. Показано, что расчёты балок не являются проблематичными. Для них разработаны как упрощённые методики, использующие математические модели невесомых балок с закреплёнными на них точечными массами, так и более сложные, учитывающие массы балок. Существующие методики силового расчёта плоских рам имеют в своей основе сложные двухмерные математические модели. Их реализация требует углублённой математической подготовки и сложных вычислительных средств. Поэтому их трудно применить в обычной инженерной практике. Упрощённых методик силового расчёта колеблющихся рам не существует. Целью настоящей работы является разработка упрощённой двухмерной математической модели вынужденных колебаний плоских рам с последующим использованием этой модели в их силовых расчётах. Предложенная в работе математическая модель описывает колебания невесомой рамы с точечной массой при одновременном действии на них вертикальной и горизонтальной гармонических возмущающих сил. В основу модели положен метод сил, устанавливающий связь перемещений рамы с действующими на неё силами. Вместе с моделью получены зависимости для вычисления резонансных частот колеблющейся системы. Выполненные разработки позволяют определять динамические характеристики колебательного процесса и рассчитывать раму на прочность и жёсткость. Методика такого расчёта реализована в среде Mathcad 15 и успешно апробирована на ряде учебных задач. Результаты работы могут быть полезны студентам и преподавателям технических ВУЗов, а также специалистам-практикам, выполняющим силовые расчёты.

**Ключевые слова:** плоские рамы, вынужденные колебания, математическая модель, резонансные частоты, силовые расчёты.