

На правах рукописи



Балденков Александр Александрович

**СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Автоматизированный электропривод».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод» **Кодкин Владимир Львович**.

Официальные оппоненты:

Петушков Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроника и микроэлектроника», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск;

Однокопылов Иван Георгиевич, кандидат технических наук, доцент отделения энергетики и электротехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»).

Защита состоится «17» апреля 2020г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при ФГАОУ «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/baldenkov-aleksandr-aleksandrovich>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, д.76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7(351) 267-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
Д212.298.05 д-р техн. наук, проф.

М.А. Григорьев

Актуальность работы

При внедрении в практику современных систем управления, инженеры, как правило, оперируют категориями линейных систем автоматического управления, параметры и характеристики которых не зависят ни от каких возмущений, и описываются уравнениями, содержащими только линейные компоненты. Однако, все реальные системы управления и дифференциальные уравнения их описывающие, имеют нелинейные компоненты.

В теории управления термином «линеаризация», как правило, определяются методики упрощения исходных нелинейных систем, сведение их к линейным. В данной работе под термином «линеаризация» понимается структурная коррекция, приближающая реальный асинхронный электропривод к линейной системе, по реакции возмущения, испытываемые этой системой.

В электроприводах есть «принципиальные» нелинейности, это операция формирования момента – операция умножения двух переменных функций – тока и магнитного потока. В асинхронных двигателях это периодические функции, в результате – у такого привода даже механическая характеристика сугубо нелинейная. Эта нелинейность очевидна и вытекает из формулы Клосса и T-образной схемы замещения. Таким образом, нелинейности асинхронных электроприводов известны, но скорректировать их простыми средствами (такими как IR -, S -компенсации в преобразователе частоты (ПЧ)) не получается.

Наибольший интерес представляют преобразователи частоты среднего технико-экономического класса. Они имеют относительно низкую стоимость, что позволяет широко применять их на предприятиях различного уровня (включая предприятия малого бизнеса), при этом, обладают широким функционалом, включающим все стандартные, достаточно хорошо отработанные алгоритмы управления, что делает их универсальными с точки зрения применения в различных технических системах. Преобразователи частоты (ПЧ) указанного класса широко представлены компаниями *Schneider Electric*, *Vacon*, *Danfoss* и другими, причем, стандартные алгоритмы управления, реализованные в данных ПЧ имеют ряд серьёзных недостатков.

Нелинейность асинхронных электроприводов (АЭП) на практике проявляется, в первую очередь, а виде различной реакции привода на одинаковые внешние моментные возмущения на различных скоростях работы. В АЭП со стандартными алгоритмами управления на различных скоростях работы, при набросе нагрузки, наблюдается различные статические и динамические «провалы» скорости, различное время переходных процессов, различная

колебательность. Также, наблюдались случаи нарушения устойчивости привода в определенных режимах работы (на определенных скоростях, при различных настройках ПЧ). Приведенные недостатки не свойственны для линейных (или приближенных к линейным) систем.

Проанализирован ряд приводов промышленных и энергетических объектов, построенных на базе ПЧ среднего технико-экономического класса компании *Schneider Electric*: – линия окраски листового материала (привод перемещения листа); – автономная блочная котельная (привод циркуляционных насосов); – башенный кран КБ-407 (привод поворота крана). На всех указанных приводах обнаружены описанные выше проблемы, снижающие эффективность работы данных приводов.

Так как, широко распространенные методы описания АЭП (векторные диаграммы, формулы Клосса, схемы замещения и т.д.) не дают объяснения причин возникновения описанных проблем, необходима разработка нового инженерного метода описания АЭП как нелинейной системы, объясняющая причины их возникновения, и позволяющая предложить методы коррекции, приближающие АЭП к линейным системам.

Предполагается, что АЭП с одинаковой реакцией на одинаковые возмущения, испытываемые приводом во всем диапазоне рабочих скоростей будет близок к линейной системе.

Большинство предлагаемых в настоящее время решений указанных проблем требует изменения базовых структур и программного обеспечения ПЧ, что, чаще всего не возможно. Следовательно, необходимо найти решения, приближающие АЭП к линейным системам, обеспечивающие возможность их внедрения без значительной модернизации промышленного оборудования, и изменения базовых структур ПЧ.

Степень научной проработанности проблемы.

Существенный вклад в развитие систем частотного управления двигателями переменного тока внесли А.А. Булгаков, Г.И. Бабокин, В.А. Дартау, А.Е. Козярук, В.И. Ключев, В.А. Мищенко, А.С. Сандлер, А.С. Сарваров, А.А. Усольцев, И. Я. Браславский, В. Н. Бродовский, А. Б. Виноградов, Т. А. Глазенко, Л. Х. Дацковский, Г. Б. Онищенко, О. И. Осипов, А. Д. Поздеев, В. В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, А.А. Суптель, В.М. Терехов, В. А. Шубенко, И. И. Эпштейн, G.M. Asher, F. Blaschke, J. Holtz, и др. Однако, в трудах данных авторов, как правило, АЭП не рассматриваются как динамические нелинейные системы. Нелинейные уравнения, описывающие процессы в асинхронном электроприводе,

упрощаются – «линеаризуются», т.е. путем применения ряда допущений приводятся к линейным, причем степень влияния таких допущений на эффективность работы системы, также, как правило, не анализируется.

Объект исследования – электроприводы на базе короткозамкнутых асинхронных двигателей и преобразователей частоты среднего технико-экономического класса с бездатчиковыми алгоритмами управления, требующие более высокого качества регулирования, чем могут обеспечить стандартные алгоритмы управления.

Предмет исследования – статические и динамические характеристики асинхронного электропривода с бездатчиковым частотным управлением, методы их идентификации, объясняющие некорректные режимы работы, выявленные в ходе экспериментов и методы коррекции электроприводов, приближающие их к линейным системам и обеспечивающие повышение их эффективности по сравнению с существующими алгоритмами управления.

Цель диссертационной работы – обосновать методы идентификации АЭП с частотным управлением, разработать и внедрить в приводы со стандартными преобразователями частоты алгоритмы управления, приближающие АЭП к линейным системам, и как следствие, повышающие эффективность этих приводов в широком диапазоне возмущений. При этом, данные алгоритмы не должны нарушать устойчивость привода и изменять схемотехнические решения ПЧ. Доказать повышение эффективности подробными экспериментами и моделированием.

Идея работы. В качестве метода описания асинхронного электродвигателя, как нелинейного динамического звена, предложены семейства частотных характеристик, зависящих от частоты статорного напряжения и скольжения. Предложен метод снижения вариативности частотных характеристик положительной обратной связью по действующему значению тока статора с включением в эту связь динамического звена, близкого к фильтру 1-го порядка, параметры которого адаптируются к частоте статорного напряжения. Показано, что эта коррекция приближает электропривод к линейной системе с достаточным запасом устойчивости. Экспериментально и моделированием доказано, что эта связь – наилучшая коррекция для парирования внешних моментных нагрузок. Предложена методика оценки качества алгоритмов управления электроприводом по спектру токов ротора.

Задачи исследования:

– на основании экспериментальных исследований, моделирования и опыта эксплуатации технологических установок классифицировать особенности асинхронных электроприводов с преобразователями частоты;

– разработать инженерные методы идентификации АЭП с точки зрения их нелинейности и методы коррекции, приближающие АЭП к линейным системам управления;

– подтвердить эффективность предлагаемых методов структурной коррекции экспериментальными исследованиями и моделированием;

– внедрить предлагаемые структурные решения в системы управления электроприводами промышленных технологических линий и в системы управления циркуляционными сетевыми насосами автономных энергетических комплексов;

– разработать методику оценки качества и эффективности системы управления методом спектрального анализа токов ротора.

Методы исследований. В работе использовались методы теории электропривода, теории частотного управления асинхронными электродвигателями, методы теории автоматического управления, методы математического моделирования. Экспериментальные исследования проводились на ряде промышленных и энергетических объектов города Челябинска, а также на специально разработанном лабораторном стенде.

Достоверность полученных результатов определена корректностью применения математического аппарата, обоснованностью методик моделирования, использующих известные, многократно подтвердившие свою достоверность программы, а также подробно описанными методиками экспериментов, позволяющие воспроизвести эти исследования в других научных лабораториях, достоверность также подтверждается адекватностью теоретических положений результатам моделирования и экспериментов.

Научные положения, выносимые на защиту, их научная новизна:

– показано, что динамика процессов в асинхронном электроприводе с частотным управлением, в том числе ее недостатки, достаточно точно описываются семействами частотных характеристик, и важную роль играет их зависимость от частоты статорного напряжения и скольжения (определяемого моментной нагрузкой на валу);

– доказано, что динамическая положительная обратная связь по действующему значению тока статора существенно уменьшает вариативность

частотных характеристик асинхронного электропривода и, тем самым, линеаризует его (приближает к линейной системе);

– доказано, что динамическая положительная обратная связь по действующему значению тока статора (ДОС+) позволяет получить лучшие статические и динамические характеристики асинхронного электропривода в сравнении со стандартными алгоритмами управления, используемыми в промышленных преобразователях частоты и обеспечить устойчивость привода во всем диапазоне возмущений, испытываемых приводом;

– предложен и обоснован метод оценки эффективности алгоритма управления асинхронным электроприводом путем спектрального анализа тока ротора, по его основной гармонике, частота которой определяется реальным скольжением в двигателе, и свидетельствует об эффективности реализуемого алгоритма формирования механического момента в приводе.

Научное значение работы:

– впервые предложен метод построения семейств частотных характеристик асинхронных электроприводов, показана зависимость этих частотных характеристик от частоты питающего напряжения и скольжения (определяемого моментной нагрузкой на валу);

– впервые даны качественные объяснения сложных процессов в асинхронном электроприводе основанные на анализе семейств частотных характеристик асинхронного электропривода;

– впервые предложен и обоснован структурный метод линеаризации асинхронного электропривода введением положительной обратной связи по действующему значению тока статора с динамическим звеном близким к фильтру 1-го порядка с параметрами, адаптируемыми к частоте питающего напряжения;

– впервые предложена методика оценки качества и эффективности алгоритмов системы управления путем спектрального анализа токов ротора.

Практическое значение работы:

– проведен комплекс экспериментальных исследований систем электроприводов с частотным управлением, использующих преобразователи частоты среднего технико-экономического класса различных компаний, доказавший неэффективность существующих стандартных алгоритмов управления, заложенных в программное обеспечение преобразователей частоты данного класса, низкую эффективность применяемых в них коррекций и целесообразность введения внешней структурной коррекции;

– предложено структурное решение, с возможностью внедрения в системы управления асинхронными электроприводами, построенными на базе широко применяемых преобразователей частоты среднего технико-экономического класса, выполняющее функцию линеаризации этих приводов, а также улучшающее статические и динамические характеристики управляемого привода;

– доказано, что реализация предлагаемой структурной коррекции, в виде динамической положительной обратной связи по действующему значению тока статора, адаптированной к частоте питающего напряжения, позволяет получить лучшие статические и динамические характеристики асинхронного электропривода в сравнении с приводом со стандартными алгоритмами работы систем управления;

– показано, что предлагаемая структурная коррекция является эффективным решением для электроприводов с высокими требованиями к динамическим характеристикам, в которых невозможна, либо значительно затруднена установка датчиков скорости;

– реализованный алгоритм структурной коррекции, внедренный в систему управления преобразователями частоты линии по окраске листового материала позволил повысить точность поддержания линейной скорости листа (относительно стандартных решений) в режиме его перемещения по линии окраски и в режиме перехвата листа соседними группами валков, что позволило существенно снизить процент брака (с 20-25% до 1-3%), а также снизить токи статора двигателей;

– разработана методика оценки эффективности и качества работы систем управления методом спектрального анализа токов ротора и статора, которая позволила провести сравнительный анализ эффективности различных систем управления.

Реализация результатов работы

Разработанный метод структурной линеаризации асинхронных приводов с частотным управлением реализован на промышленной линии окраски листового материала ООО «Комплекс» (г. Челябинск), а также внедрен в систему управления циркуляционными насосами автономного теплового пункта (котельной), смонтированного и обслуживаемого НПФ «Восток-Запад» (г. Челябинск).

Апробация работы

В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедры «Автоматизированный электропривод» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» г. Челябинск. Основные положения и результаты диссертационной работы рассматривались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: 2-я Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" 2016, Челябинск, 19-20.05.2016; Международный конгресс «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность», Москва, 13-14.10.2016; 11-я Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин», Омск, 14-16.11.2017; 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE2017), Shenzhen, China, 16-17.09.2017; 2nd International Conference on Applied Mathematics, Simulation and Modelling (AMSM2017), Phuket, Thailand, 6-7.08.2017; 3-я Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" 2017, Челябинск, 16-19.05.2017; 4-я Международная научно-техническая конференция "Пром-Инжиниринг" 2018, Челябинск, 15-18.05.2018; научно-технических конференциях ЮУрГУ в 2014–2019 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 28 научных статей, включая 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для спец. 05.09.03, 4 статьи в прочих периодических изданиях, 9 статей в изданиях, входящих в системы цитирования *Scopus* и *Web of Science*, 1 монография. На оригинальные технические решения получено 3 патента РФ на изобретения.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке методов исследований, в формулировании и доказательстве научных положений. В работах [2, 5, 6, 8–10, 12, 14, 15] автору принадлежат: разработка методики проведения физического эксперимента, в работе [4] разработка математических моделей и результаты моделирования; в публикациях [1, 3, 7, 13, 16] – ведущая роль в обосновании методов исследований.

Соответствие научной специальности: исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и п. 1, 3, 4 области исследования, приведённой в паспорте специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и одного приложения, изложенных на 145

страницах машинописного текста, содержит 92 рисунка, 12 таблиц, список используемой литературы из 153 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна, практическая значимость.

В первой главе рассмотрены существующие варианты алгоритмов управления асинхронными электроприводами, приведены результаты компьютерного моделирования и краткие результаты экспериментальных исследований, показавшие недостатки существующих алгоритмов управления, приведена методика проведения экспериментов для исследования статических и динамических характеристик асинхронного электропривода, сформулированы задачи исследований;

Во второй главе предложена методика оценки динамических характеристик асинхронного электропривода с частотным управлением путем анализа семейств частотных характеристик; показана большая вариативность этих семейств в зависимости от частоты статорного напряжения и скольжения (определяемого внешней моментной нагрузкой); предложен метод коррекции семейств частотных характеристик, позволяющий значительно снизить их вариативность; приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие эффективность предлагаемой коррекции;

В третьей главе приведены подробные результаты экспериментальных исследований и сравнительный анализ статических и динамических характеристик асинхронных электроприводов с системами управления со стандартными алгоритмами, применяемыми в преобразователях частоты и с системой управления, с предлагаемой в работе коррекцией; предложена методика оценки качества и эффективности работы систем управления с различными структурами путем спектрального анализа токов ротора асинхронного двигателя;

В четвертой главе приведены описание и результаты внедрения предлагаемой структурной коррекции в сложные промышленные технологические объекты, такие как, технологическая линия по окраске листового материала, и система управления циркуляционными насосами автономного теплового пункта; показана бóльшая эффективность предлагаемого решения в сравнении со стандартными системами управления;

В заключении сформулированы основные выводы и даны результаты исследований в соответствии с целью и задачами исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1-е научное положение: динамика процессов в асинхронном электроприводе с частотным управлением, в том числе ее недостатки, достаточно точно описываются семействами частотных характеристик, и важную роль играет их зависимость от частоты статорного напряжения и скольжения (определяемого моментной нагрузкой на валу).

Наиболее эффективным инженерным методом оценки динамики электроприводов является метод частотного анализа. Прямое применение этого метода к асинхронным электроприводам затруднено наличием в них существенных нелинейностей. Построение частотных характеристик таких систем сопряжено с рядом неизбежных допущений. После рассмотрения разных вариантов этих допущений наиболее приемлемым оказался изложенный в работе А.А. Усольцева [«Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.], расчет динамической механической характеристики. Расчет отталкивается от формулы, в которой устанавливается связь между текущим моментом (m) и скольжением (β) на номинальной частоте $\omega_{1ном}$:

$$m = \frac{2M_k}{(1 + T_2'p) \left[\frac{S_k}{\beta} (1 + T_2'p) \right] + \frac{\beta}{S_k}}, \quad (1)$$

где, $T_2' = \frac{L_k}{R_2}$ – переходная постоянная времени ротора, $\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – относительное скольжение, M_k , S_k – критический момент и критическое скольжение на номинальной частоте $\omega_{1ном}$.

Для частотного анализа необходимо уточнить исходное уравнение (1):

$$m \left[(T_2')^2 p^2 + 2T_2'p + 1 + \left(\frac{\beta}{S_k} \right)^2 \right] = \frac{2M_k}{S_k} \beta (1 + T_2'p), \quad (2)$$

при этом, передаточная функция связывающая абсолютное скольжение и момент примет вид:

$$W(p) = \frac{2M_k(T_2'p + 1)S_k}{\omega_1[(1 + T_2'p)^2 S_k^2 + \beta^2]}, \quad (3)$$

где ω_1 – частота статорного напряжения

Структурная схема привода на рабочем участке примет вид, представленный на рис. 1.

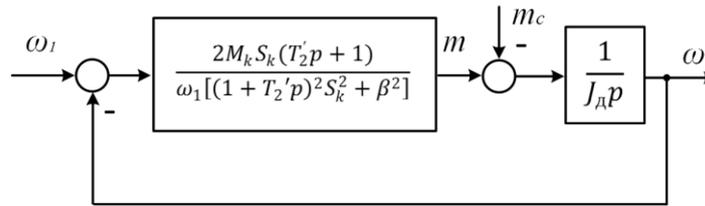


Рис. 1. Структурная схема АД на рабочем участке

Передаточная функция формирователя момента изменяется при изменении частоты статорного напряжения и скольжения, т.е. является существенно нелинейной.

В предлагаемой нелинейной интерпретации формула (3) и структурная схема (см. рис. 1) объясняют часть проблем асинхронного электропривода. Для этого предлагается рассмотреть передаточные функции и соответствующие им частотные характеристики при «замороженных», но разных значениях частоты статорного напряжения и скольжений. При этом вместо традиционных характеристик объекта управления необходимо будет рассматривать «семейства», сгруппированные по изменяющемуся напряжению статора (его частоты) или скольжению.

На рисунках 2 и 3, приведены частотные характеристики асинхронного электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором малой мощности. На рис. 2 приведены характеристики электродвигателя при частоте статорного напряжения 10Гц и скольжениях, соответствующих малой и номинальной нагрузкам, на рис 3 – аналогичные характеристики для частоты статорного напряжения 50Гц. Характеристики построены в программе *Matlab Simulink R2014b* на базе параметров двигателя лабораторного стенда, применяемого для проведения экспериментов.

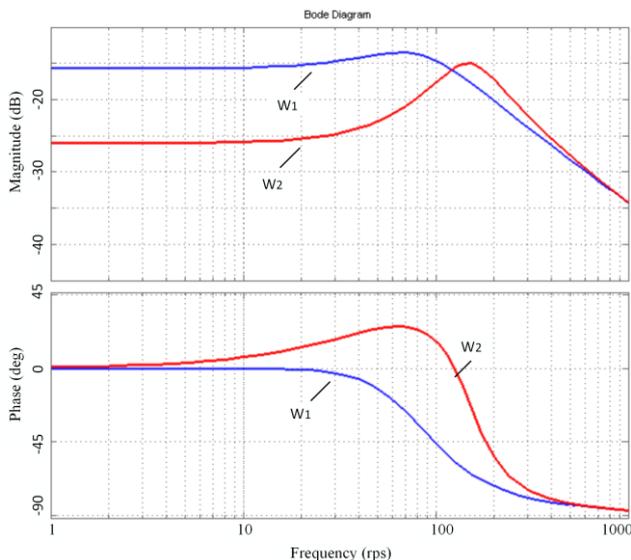


Рис. 2. Частотные характеристики звена формирования момента при частоте статорного напряжения 10 Гц и скольжениях, соответствующих малой (w1) и номинальной (w2) нагрузкам

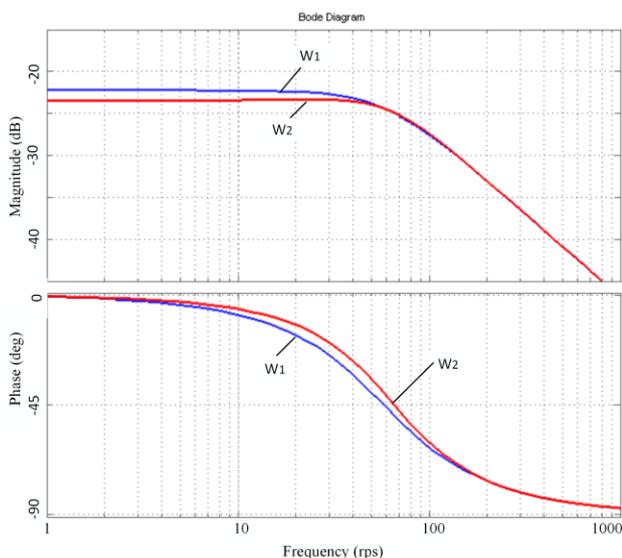


Рис. 3. Частотные характеристики звена формирования момента при частоте статорного напряжения 50 Гц и скольжениях, соответствующих малой (W1) и номинальной (W2) нагрузкам

Приведенные частотные характеристики хорошо объясняют некоторые проблемы АЭП. При работе на низких частотах статорного напряжения фазовые сдвиги при изменении нагрузки (и скольжения) существенно меняются, что приводит к неустойчивости и неэффективной работе на малых скоростях. Сопоставление частотных характеристик на частотах статорного напряжения 10 и 50 Гц показывает, что в диапазоне от 10 до 100 рад/с фазовые сдвиги частотных характеристик имеют существенно разные значения, от 25 до -60 эл.град. Т.е. при разгонах и торможениях фазовые сдвиги меняются таким образом, что система с запасом устойчивости на частоте статорного напряжения 50Гц может стать неустойчивой на частоте статорного напряжения 10Гц. Это может быть причиной разной колебательности привода на разных частотах статорного напряжения, которые отмечались при проведении экспериментов. Таким образом, нелинейности передаточных функций звена формирователя момента (рис. 1) требуют линеаризации для повышения эффективности электропривода и одинакового поведения на разных частотах.

2-е научное положение: динамическая положительная обратная связь по действующему значению тока статора существенно уменьшает вариативность частотных характеристик асинхронного электропривода и, тем самым, линеаризует его.

Рассмотрим вариант применения локальной обратной связи по электромагнитному моменту в данной структуре. Структурная схема приведена на рисунке 4.

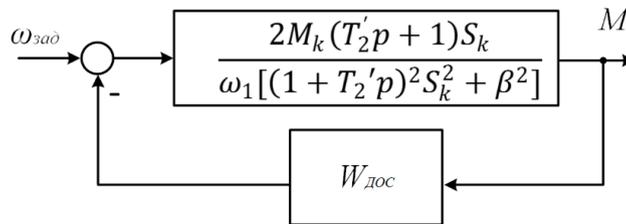


Рис. 4. Структурная схема АЭП с локальной обратной связью по электромагнитному моменту

При этом, передаточная функция формирователя момента примет вид:

$$W_{\text{эКВ}} = \frac{2M_k S_k (T_2' p + 1)}{\omega_1 [(1 + T_2' p)^2 S_k^2 + \beta^2] + 2M_k S_k (T_2' p + 1) W_{\text{ДОС}}}. \quad (5)$$

При выполнении следующего условия:

$$\omega_1 \beta^2 = -2M_k S_k (T_2' p + 1) W_{\text{ДОС}},$$

т.е. если корректирующее звено будет иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{ДОС}} = -\frac{\omega_1 \beta^2}{2M_k S_k (T_2' p + 1)}, \quad (6)$$

передаточная функция формирователя момента принимает вид:

$$W_{\text{эКВ}} = \frac{2M_k S_k (T_2' p + 1)}{\omega_1 [(1 + T_2' p)^2 S_k^2]} = \frac{2M_k}{\omega_1 S_k (1 + T_2' p)}, \quad (7)$$

т.е. становится линейным звеном, не зависящим от скольжения (нагрузки).

Корректирующее динамическое звено представляет собой инерционность первого порядка с коэффициентом зависящем, от частоты статорного напряжения и от абсолютного скольжения. Знак $(-)$ перед формулой означает, что связь должна быть положительной. Назовем эту связь – динамическая положительная обратная связь (ДОС+). Таким образом, предложенная положительная обратная связь, выбранная по условию (6) позволяет компенсировать действие внешней нагрузки и нелинейности асинхронного электропривода, распространив передаточную функцию двигателя как звена 1-го порядка для любых значений β .

В широко применяемых АЭП реализовать связь по механическому моменту достаточно сложно. Учитывая, что момент равен $I_1 * \Psi_2$ и практически во всех расчетах предполагается, что роторное потокосцепление постоянно, можно заменить исходный сигнал в этой локальной связи на действующее значение тока статора, или его активную составляющую, вычисление которого осуществляется во всех ПЧ.

Эффективность предлагаемого структурного решения подтверждается моделированием и экспериментами.

3-е научное положение: динамическая положительная обратная связь по действующему значению тока статора (ДОС+) позволяет получить лучшие статические и динамические характеристики асинхронного электропривода в сравнении со стандартными алгоритмами управления, используемыми в промышленных преобразователях частоты и обеспечить устойчивость привода во всем диапазоне возмущений, испытываемых приводом.

Для подтверждения данного положения были проведены сравнительные эксперименты на специально разработанном стенде.

Стандартные алгоритмы управления, заложенные в преобразователи частоты среднего технико-экономического класса, не всегда обеспечивают заявленные производителями характеристики и в некоторых режимах приводят к неустойчивости привода (рис. 5). Исследовались стандартное скалярное управление с максимальными IR - и S - компенсациями, не нарушающими устойчивость привода, бездатчиковое векторное управление, векторное управление с контуром и регулятором скорости и скалярное управление с положительной обратной связью по току статора ДОС+. Диаграммы процессов приведены на рис. 6, основные статические и динамические характеристики в таблице 1.

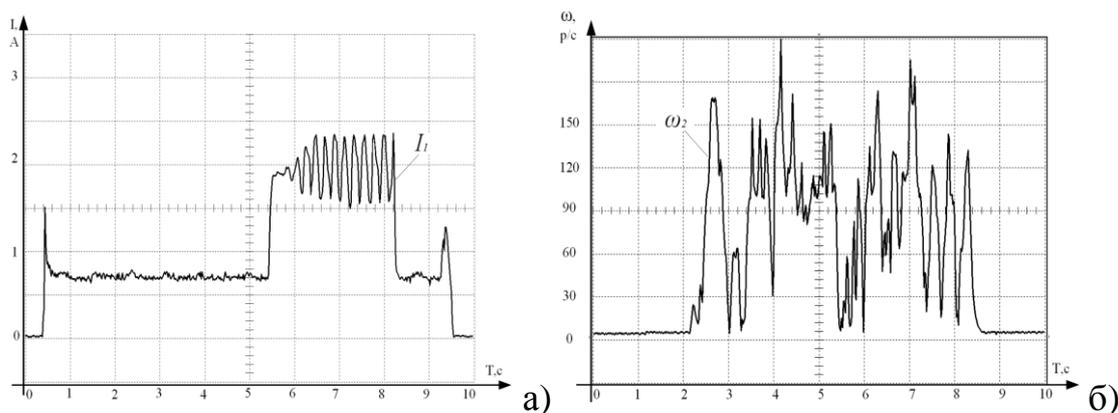


Рис. 5. Неустойчивые состояния АЭП со стандартными алгоритмами управления (а– колебания тока при изменении нагрузки, б– колебания скорости при большом (более 200%) значении S -компенсации).

Векторное управление с контуром скорости, имеет очень большое время переходного процесса и большой динамический провал скорости, который не уменьшается настройками. В механизмах, с требованиями быстрой отработки внешних возмущений применение таких алгоритмов управления контуром скорости нежелательно.

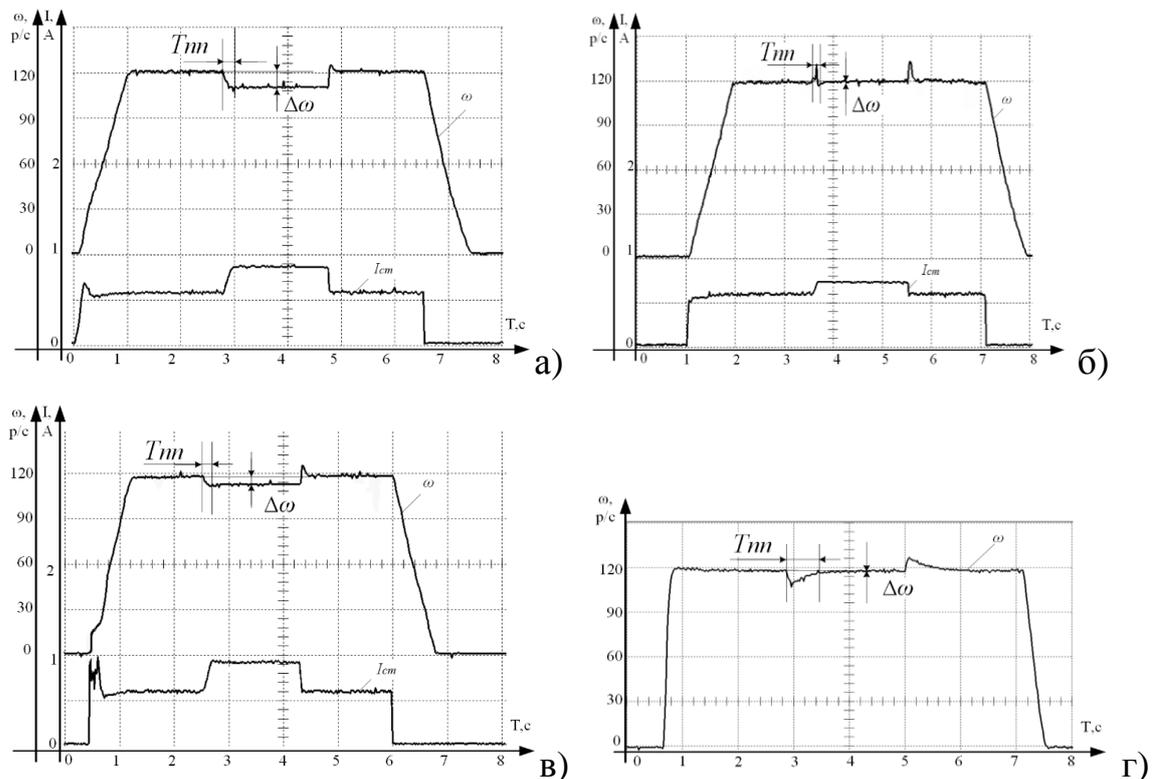


Рис. 6. Обработка внешнего статического возмущения (наброса нагрузки) (а–скалярное управление, с максимальными значениями компенсаций и б–скалярное с положительной обратной связью по току статора (ДОС+), в–векторное бездатчиковое управление и г–векторное управление с контуром скорости)

Таблица 1 – Параметры процессов, приведенных на рис. 8

Тип управления	$T_{пп}$, с	$\Delta\omega$, p/c	$I_{ст}$, А
Скалярное разомкнутое управление	0,23	10,7 (8,68%)	0,87
Векторное бездатчиковое управление	0,1	8 (6,67%)	0,95
Векторное управление с контуром скорости	0,85	0 (0%)	1,1
Скалярное управление с положительной обратной связью по току статора	0,1	0 (0%)	0,75

Необходимо обратить внимание на значения токов статора. В электроприводе с положительной обратной связью по току статора (ДОС+) эти значения наименьшие, что свидетельствует о лучшей энергетике такого привода и целесообразности применения такого решения в приводах, которые испытывают перегрузки по току статора. Данное положение подтверждается результатами моделирования (рис. 7).

Также необходимо учесть, что отсутствуют противопоказания применения, предлагаемого в работе структурного решения, в многодвигательных приводах, в отличие от векторного управления, при котором управление многодвигательным приводом не рекомендуется фирмами-изготовителями преобразователей частоты, так как один преобразователь не

может точно управлять несколькими векторами статорных напряжений или токов. Некоторые отклонения параметров двигателя, разваливающие векторное управление, для структуры ДОС+ приведут только к некоторому ухудшению параметров.

4-е научное положение: метод оценки эффективности алгоритма управления асинхронным электроприводом путем спектрального анализа тока ротора, по его основной гармонике, частота которой определяется реальным скольжением в двигателе, и свидетельствует об эффективности реализуемого алгоритма формирования механического момента в приводе.

Эффективность формирования момента в асинхронном электроприводе с различными структурами систем управления, по координатам статорного тока или скорости вращения определить достаточно сложно. Как видно из диаграмм переходных процессов, пускотормозные режимы асинхронного электропривода в лабораторных условиях мало различаются, вместе с тем значительной информативностью обладает ток ротора, частота которого жестко связана с реальным скольжением.

Компьютерное моделирование, проведенное с целью идентификации асинхронных электроприводов с различными структурами систем управления (рис. 7) показало, что при набросе одной и той же внешней моментной нагрузки частота роторных токов при разных структурах систем управления различна. Спектральный анализ сигналов этих токов позволит сделать вывод об эффективности той или иной структуры системы управления. Поскольку, в асинхронном электродвигателе вращающий момент создается за счет отставания вращающегося ротора от вращающегося магнитного поля статора, логично предположить, что более эффективный алгоритм формирования момента потребует меньшего рассогласования. Поскольку частота роторного тока жестко соответствует этому рассогласованию, то меньшая частота роторного тока будет соответствовать более эффективному алгоритму. Как установлено, частота роторного тока в приводе с положительной обратной связью по току статора существенно ниже.

Измерить роторные токи экспериментально в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором – непростая задача. Для ее выполнения на лабораторном стенде один из двигателей был заменен на асинхронный двигатель с фазным ротором, в роторной цепи которого были установлены датчики тока.

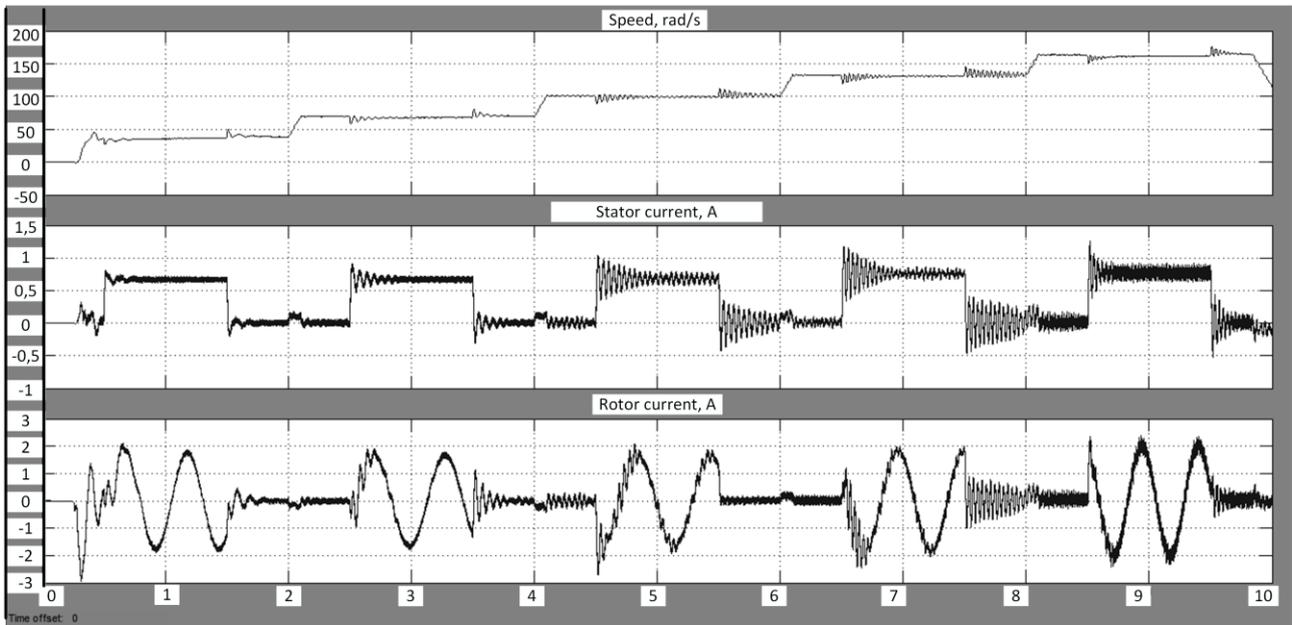


Рис. 7. Моделирование процессов разгона и наброса нагрузки при скалярном управлении, с ДОС+

На рисунках 8, 9 представлены диаграммы скорости, тока ротора и спектральный анализ тока ротора для систем управления АЭП различных структур. Значения основных частот приведены в таблице 2.

Во всех случаях анализировались низкочастотные спектры в диапазоне от 0 до 5-6 Гц, которые описывают механические процессы (спектральный анализ статорных и роторных токов в диапазоне частот выше 100 Гц может дать оценку уровню помех, создаваемых приводом при том или ином способе управления. В данной работе эти оценки не проводились).

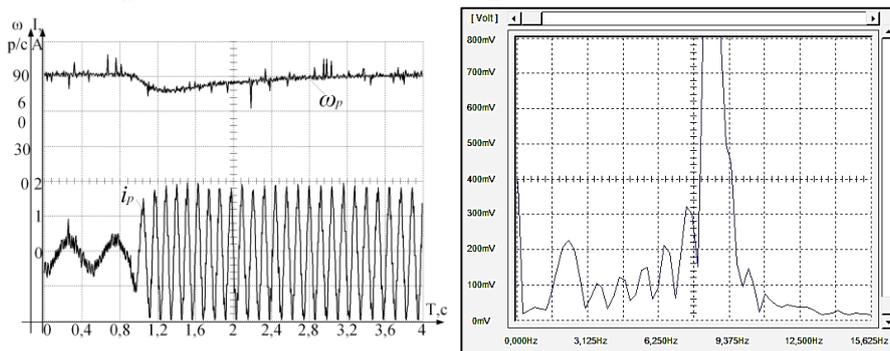


Рис. 8. Диаграмма скорости и тока ротора асинхронного привода с векторным управлением, с контуром скорости. Спектр тока ротора.

Результаты спектрального анализа токов ротора следующие:

Все сигналы содержат два ярко выраженных пика, соответствующих холостому ходу и работе под нагрузкой. При этом, параметры холостого хода близки для всех вариантов управления, а частоты токов при нагрузках имеют существенные различия. Кроме того, частотный интервал между этими значениями при векторном управлении, а также, при векторном управлении с

контуром скорости (рис. 8), содержат значительно больше составляющих чем при скалярном управлении и особенно при скалярном управлении с ДОС+ (рис. 9).

То есть, форма роторного тока при векторном управлении значительно отличается от синусоидальной, которую предполагают допущения, сопровождающие анализ уравнений машины переменного тока, и вывод закона векторного управления.

Необходимо обратить внимание на диаграммы роторных токов привода с векторным управлением с контуром скорости (рис. 8). При таком управлении, частота роторных токов максимальна (в сравнении с другими приведенными алгоритмами управления), и не изменяется в процессе восстановления скорости после наброса нагрузки, что говорит о том, что поддержание скорости осуществляется в основном за счет повышения частоты статорного напряжения, что негативно сказывается на эффективности такого управления.

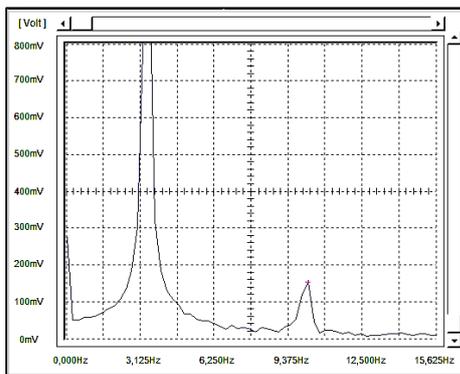
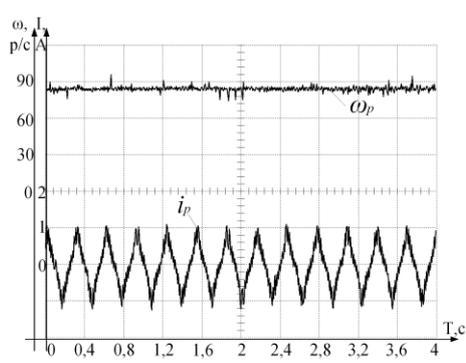


Рис. 9. Диаграмма скорости и тока ротора асинхронного привода со скалярным управлением с ДОС+. Спектр тока ротора.

Таблица 2 – Значения основных частот роторных токов под нагрузкой и на холостом ходу.

	на холостом ходу	под нагрузкой
Векторное управление	2,1 Hz	6,25 Hz
Векторное управление с обратной связью по скорости	2,1 Hz	8,75 Hz
Скалярное управление без ОС	1,69 Hz	4,75 Hz
Скалярное управление с обратной связью по току статора (ДОС+)	1,75 Hz	3,5 Hz

Сравнительный спектральный анализ токов ротора асинхронного двигателя, управляемого преобразователем частоты со стандартными алгоритмами работы системы управления (скалярное, векторное управление) и с предлагаемой в работе структурной коррекцией, результаты которого приведены в таблице 2, показал, что наиболее эффективным, с точки зрения формирования вращающего момента является алгоритм скалярного управления с ДОС+. Роторный ток при данном алгоритме (рис. 9) имеет наименьшую частоту основной гармоники (3,5 Гц). В диапазоне от 0 до 3,5 Гц нет других пиковых

значений. Наличие 3-й гармоники (9,75 Гц) в спектре роторного тока свидетельствует о насыщенности магнитного поля. Т.е. данный алгоритм обеспечил насыщение магнитного потока под нагрузкой без нарушения устойчивости и увеличения токов холостого хода, которыми сопровождается обычное усиление потока (увеличение U/f), увеличение потока способствует снижению статорного тока при работе под нагрузкой.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования асинхронных электроприводов с широко применяемыми методами управления – скалярным, векторным бездатчиковым, векторным с контуром скорости, показали, что такие электроприводы ведут себя как нелинейные системы, а общепринятые описания таких систем – векторные диаграммы, формулы Клосса имеют недопустимо большие погрешности для оценки их эффективности в современных технологических и энергетических комплексах;

2. В работе предложен метод описания динамических режимов асинхронного электропривода, основанный на динамической формуле Клосса - метод семейств частотных характеристик, позволивший объяснить главные проблемы асинхронных электроприводов – нелинейную динамику на различных скоростях вращения и нелинейную реакцию на моментные возмущения, а также предложить новый метод эффективной коррекции;

3. В работе обоснована эффективность предложенного метода оценки качества алгоритма частотного управления асинхронного электропривода по спектрам роторных токов асинхронного электродвигателя;

4. Предложена структурная коррекция динамических характеристик асинхронного электропривода без датчика скорости вращения двигателя, использующая положительную обратную связь по действующему значению тока статора двигателя, обеспечивающая достаточную линеаризацию частотных характеристик электропривода и наилучшую эффективность в пускотормозных режимах и при отработке моментных возмущений;

5. Предложены варианты технической реализации структурной коррекции характеристик асинхронных электроприводов, построенных на базе широко применяемых преобразователей частоты среднего технико-экономического класса компании *Schneider Electric*, без изменения схмотехники ПЧ и их базового программного обеспечения, с применением программируемого логического контроллера (ПЛК).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций (для спец. 05.09.03)

1. Кодкин В.Л. Оптимизация динамических режимов комплекса асинхронных электроприводов технологической линии // В.Л. Кодкин, А.С. Аникин, А.А. Балденков, Цзян Яньмин, Хуан Чжи Чен / Вестник ЮУрГУ. Серия: «Энергетика». – 2018. Т. 18. – № 4. – С. 121–129.
2. Кодкин, В.Л. Спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя – показатель его эффективности // В.Л. Кодкин, А.С. Аникин, А.А. Балденков / Омский научный вестник. – 2019. – №5 (167). – С.39–45.
3. Балденков, А.А. Оценка динамики асинхронного привода по нелинейной передаточной функции. Коррекция нелинейности асинхронного электропривода // А.А. Балденков, В.Л. Кодкин, А.С. Аникин / Омский научный вестник. – 2019. – №5 (167). – С. 51–57.

Публикации в периодических изданиях

4. Kodkin, V.L. Methods of Optimizing the Speed and Accuracy of Optical Complex Guidance Systems Based on Equivalence of Automatic Control System Domain of Attraction and Unconditional Stability of Their Equivalent Circuits // V.L. Kodkin, А.А. Baldenkov / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17. – № 1. – С.23–33.
5. Kodkin, V.L. Experimental Studies of Energy Systems of Automatic Control Heat Supply of Residential Buildings and Methods of Increasing Their Efficiency // V.L. Kodkin, А.А. Baldenkov, A.S. Anikin, A.U. Kachalin / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17. – № 2. – С.156–161.
6. Kodkin, V.L. The Comparative Analysis of Automatic Control Systems for the Heat Supply of Residential Buildings in Monotonous Transient Processes and in Processes Recommended by Regulator Manufacturers // V.L. Kodkin, А.А. Baldenkov, A.S. Anikin / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18. – № 2. – С.156–163.
7. Kodkin, V.L. Control of Nonlinear Dynamics of Electromechanical Systems // V.L. Kodkin, А.А. Baldenkov, A.S. Anikin / Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19. – № 3. – С.42–51.

Статьи, индексированные Scopus и Web of Science

8. Kodkin, V.L. Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Positive Dynamic Feedback on Stator Current // V.L. Kodkin, А.А. Baldenkov, A.S. Anikin / III International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proc. – 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076179
9. Kodkin, V.L. Spectral Analysis of Rotor Currents in Frequency-controlled Electric Drives / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, А.А. Baldenkov // 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering, AMEE 2017 – Proc. – 2017.
10. Kodkin, V.L. The analysis of the quality of the frequency control of induction motor carried out on the basis of the processes in the rotor circuit // V.L. Kodkin, A.S. Anikin, А.А. Baldenkov / 11th International Scientific and Technical Conference on Applied Mechanics and Dynamics Systems, AMDS 2017 – Proc. – 2017. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012052.

11. Kodkin, V.L. Analysis of Stability of Electric Drives as Non-linear Systems According to Popov Criterion Adjusted to Amplitude and Phase Frequency Characteristics of Its Elements // V.L. Kodkin, **A.A. Baldenkov**, A.S. Anikin / Proceedings of 2nd International Conference on Applied Mathematics, Simulation and Modelling (AMSM 2017)

12. Kodkin, V.L. Spectral analysis of rotor currents in frequency-controlled electric drives // V.L. Kodkin, **A.A. Baldenkov**, A.S. Anikin / IV International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018 – Proc.– 2018.

13. Kodkin, V.L. Families of frequency characteristics, as a basis for the identification of asynchronous electric drives / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, **A.A. Baldenkov** / 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018 (8501840)
DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501840

14. Kodkin, V.L. Prospects for use of AC drives in industrial robots. Identification of quality of asynchronous electric drives from spectra of rotor currents / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, **A.A. Baldenkov** / 2018 Proc.–2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018. (8570111). DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570111.

15. Kodkin, V.L. Performance identification of the asynchronous electric drives by the spectrum of rotor currents / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, **A.A. Baldenkov** / 2019 International Journal of Power Electronics and Drive Systems 10(1), С. 211–218

16. Kodkin, V.L. The dynamics identification of asynchronous electric drives via frequency response / V.L. Kodkin, A.S. Anikin, **A.A. Baldenkov** / 2019 International Journal of Power Electronics and Drive Systems 10(1), – С. 66–73.

Патенты

17. Патент на изобретение №2599529 РФ, МПК H02P23/02; H02P25/02 №2014151549/07, заявл. 17.11.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №28. «Устройство частотного управления асинхронным электроприводом», авторы: Кодкин В.Л., Шмарин Я.А., Аникин А.С., **Балденков А.А.**

18. Патент на изобретение №2660460 РФ, МПК H02P25/02 №2017121247; заявл. 16.06.2017; опубл. 06.07.2018; «Устройство частотного управления асинхронным электроприводом», авторы: Кодкин В.Л., Аникин А.С., **Балденков А.А.**

19. Патент на изобретение №2666494 РФ, МПК В66С13/38 №2017134210; заявл. 02.10.2017; опубл. 07.09.2018; «Электропривод механизма подъема башенного крана с параметрическим управлением», авторы: Нестеров А.С., Кодкин В.Л., **Балденков А.А.**, Аникин А.С.

Монографии

20. Кодкин В.Л. Структурные методы коррекции динамики электроприводов как нелинейных систем регулирования / В.Л. Кодкин, **А.А. Балденков**, А.С. Аникин/ Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017, – 55 с.