

Оптимизация запуска автоматизированного асинхронного электропривода

Р.А. Сафиуллин

Уфимский университет науки и технологий, Нефтекамский филиал

Аннотация: Асинхронный электродвигатель служит основой функционирования практически каждого современного промышленного станка. Они активно эксплуатируются в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве страны. Запуск электроприводов станков, оснащенных асинхронными двигателями, становится серьезной проблемой для владельцев частных мастерских и аграриев, работающих в сельской местности. В настоящей статье представлен способ реализации запуска асинхронного двигателя посредством комбинации умножителя напряжения и частотного преобразователя, обеспечивающий сохранение номинального крутящего момента и полной мощности электропривода.

Использование умножителей напряжения для пуска частотно-регулируемых электроприводов промышленного назначения представляет собой инновационное решение, которое помогает устранить проблемы, вызванные низким уровнем входного напряжения электрической сети. Оно актуально тогда, когда фактическое напряжение электросети оказывается меньше минимально необходимого значения, указанного производителем электрооборудования.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, частотное регулирование, деревообработка, металлообработка, умножитель напряжения.

В настоящее время автоматизированные электроприводы (АЭП) широко эксплуатируются в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, благодаря своей способности обеспечивать точное управление технологическими процессами производства, повышения производительности труда и снижения энергозатрат [1]. Они подключаются к промышленным электрическим сетям, которые обеспечивают трехфазный переменный ток с частотой 50 Гц, преимущественно при напряжении 380 В. Например, в металлургии автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) прокатного производства управляют прокатными станами, подъемниками и транспортными механизмами для создания различного сортамента прокатных заготовок из различных марок стали. Они поддерживают стабильные скорости



деформирования металла при прокатке и осуществляют точность обработки металлических заготовок [2]. В нефтяной и газовой отраслях АЭП эксплуатируются в виде электроприводов насосов и компрессоров, используемые для перекачки буровой смеси, нефти и газа. Системы автоматизации скважин включают процессы добычи природного газа, конденсата и нефти, а в трубопроводных системах - их очищение и доведение до энергетического углеводородного сырья для транспортировки по продуктовым трубопроводам [3]. В химической промышленности АЭП эксплуатируются в виде электроприводов мешалок, дозаторов и конвейеров различных химических веществ. При этом требуются точные регулирования физических параметров химических реакций – температуры, давления, массы и расхода веществ [4]. В машиностроении АЭП используются в виде технологических машин и оборудования – различных станков [5], грузоподъемных механизмов и эскалаторов, а также конвейерных линий и погрузочно- разгрузочной техники [6]. АЭП при производстве строительных материалов эксплуатируются в виде управляемых приводов дробилок, мельниц и транспортеров, а также используются для координации движений механизмов и устройств технологических процессов [7]. В электротранспорте АЭП представляют собой электроприводы трамваев, троллейбусов и поездов метро, а также эффективно управляют тяговыми двигателями - системами движения [8]. В сельском хозяйстве они активно используются в животноводстве, растениеводстве, в процессах транспортировки первичного сельскохозяйственного сырья и механизации труда. Это элеваторные комплексы и зерносушилки, электрические трактора и самоходные комбайны. Также автоматика кормления животных и птиц включают механизмы подачи воды, транспортировки комбикормов, очистки помещений и системы вентиляции. В растениеводстве - это агрегаты орошения водой сельскохозяйственных земельных угодий, внесения

удобрений и химикатов, роботы-помощники в теплицах и кустарниковых полях и др. [9].

В наши дни в отраслях промышленности и сельском хозяйстве современные асинхронные АЭП питаются от промышленных электрических сетей трехфазного переменного тока частотой 50 Герц со стандартными значениями напряжений: 220, 380, 660, 6000 В и т.д. По своей структуре АЭП имеют сложную систему и объединяют в себе различные микропроцессорные системы управления электродвигателями, включающие в себя преобразователи частоты, регуляторы скорости, датчики обратной скорости и алгоритмы автоматического управления. Проектирование и исследование таких электроприводов включают в себя ряд этапов, направленные на обеспечение оптимальной производительности, надежности и энергоэффективности различных технологических процессов производства [10].

Структура современных АЭП включают в себя:

1. Электропривод состоит из основных типов электродвигателей (асинхронные, синхронные, фазные, постоянного и переменного тока), а также преобразователей электроэнергии и устройств их управления.
2. Устройство электромеханического преобразования энергии контролирует метрологические электротехнические характеристики, потери и энергетические характеристики электроприводов, способы регулирования скорости и электромеханического момента [11].
3. Автоматизированные системы управления электроприводом включают современные микропроцессорные системы управления, алгоритмы векторного управления, контроллеры и программное обеспечение для автоматизации [12].

4. Силовые полупроводниковые элементы и схемы преобразования включают тиристорные и транзисторные ключи, преобразователи частоты и инверторные схемы.

5. Датчики и обратная связь включают энкодеры, резольверы и тахогенераторы, эксплуатацию датчиков положения и скорости, использование сенсорных технологий в управлении электроприводом [13-15].

Современный автоматизированный электропривод промышленных предприятий является регулируемой электромеханической системой с одним или несколькими электродвигателями постоянного или переменного тока. В основном, такие системы базируются преимущественно на асинхронных электродвигателях (АД) переменного тока и силовых частотных полупроводниковых преобразователях [16]. Хотя такие устройства активно эксплуатируются в промышленности и сельском хозяйстве, проблемы их энергоэффективности и производительности остаются открытым вопросом.

Цель работы – создание автоматизированного устройства для запуска асинхронных электроприводов с более энергоэффективными и мощностными характеристиками. Задача проекта - использование более низкого напряжения $U=220\text{В}$ для создания электропривода на напряжение $U=380\text{В}$ для эксплуатации энергосберегающего АЭП.

В настоящее время частотно- регулируемый привод (ЧРП) (преобразователь частоты) является важным компонентом современных электроприводов осуществляющий следующие функции:

- регулирование плавной скорости вращения ротора электродвигателя путем изменения выходной частоты подаваемого напряжения, что обеспечивает оптимальные режимы ее работы [17];

- энергосбережение путем снижения потребляемой мощности, при работе на оптимальных по величине нагрузках, на пониженных скоростях значительно сокращает потребление электроэнергии;
- защита электродвигателя от перегрузок, коротких замыканий и перегревов существенно увеличивает срок их эксплуатации [18];
- погашение пусковых токов, за счет постепенного разгона электродвигателя, устраняет высокие стартовые нагрузки и продлевает технический ресурс системы [19,20].

Дополнительное электротехническое устройство - умножитель частоты, выполняет следующие функции:

- повышает эффективность электропривода путем использования высоких частот переменного тока, что увеличивает скорость вращения ротора электродвигателя и увеличивает его производительность;
- расширяет диапазон скоростей электродвигателя в системах с регулируемой частотой привода;

Для расчета и проектирования современных АЭП осуществляют:

- исследование системы технологического процесса производства;
- расчет мощности и выбор электрооборудования;
- моделирование или симуляцию работы электропривода, проведение экспериментальных испытаний;
- оптимизацию конструкции, системы управления и параметров силовой схемы электропривода.

Частотные преобразователи в основном включают в себя два основных электротехнического блока: выпрямителя и инвертора. Выпрямительный блок является первым этапом преобразования электрической энергии в ЧРП. Его задача состоит в том, чтобы преобразовать переменный электрический ток промышленной сети (обычно трехфазной АС) в постоянный ток DC, согласно рис. 1.

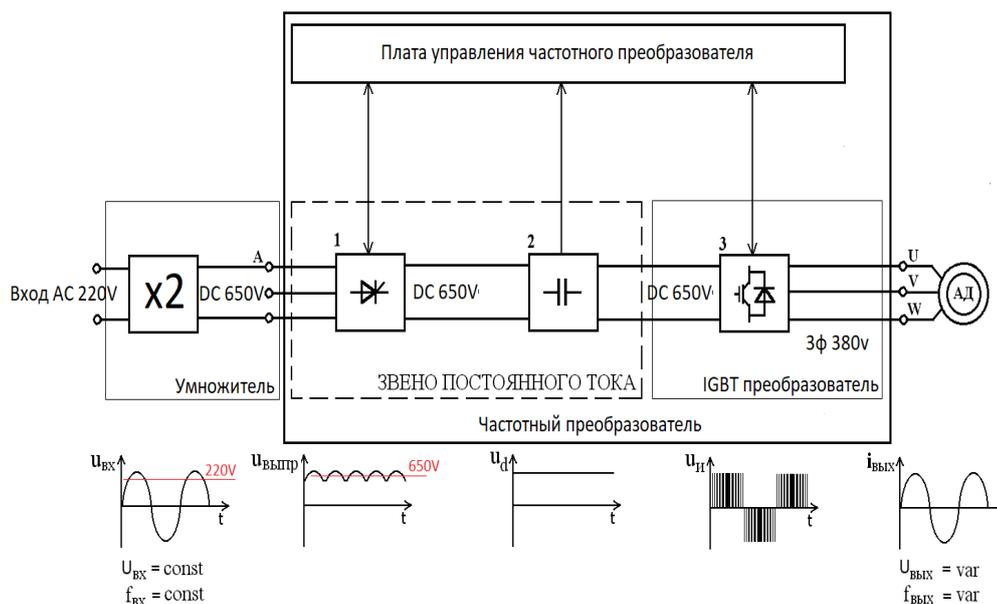


Рис. 1 - Электрическая схема проектируемого АЭП

Инверторный блок является вторым ключевым компонентом ЧРП. Его задача заключается в обратном процессе: преобразовании постоянного тока в переменный, но уже с требуемой частотой и напряжением. Этот процесс осуществляется с использованием мощных транзисторов (*IGBT*) и специальной схемы управления. Инвертор создает переменное напряжение $U = 380\text{В}$ нужной частоты путем быстрого переключения силовых ключей (транзисторов). В новом электротехническом решении, для получения в системе АЭП более мощного постоянного напряжения $U = 650\text{В}$, изначально мы будем использовать обычный умножитель, питающийся с низкого переменного напряжения $U = 220\text{В}$.

Дополнительный умножитель частоты, представленный на рис. 2, выполняет следующие функции [16,18]:

- повышает эффективность электропривода путем использования высоких частот переменного тока, что увеличивает скорость вращения ротора электродвигателя и увеличивает его производительность;

- расширяет диапазон скоростей электродвигателя в системах с регулируемой частотой привода.

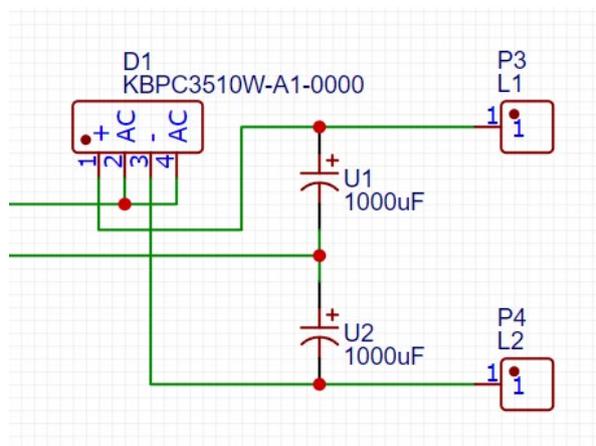


Рис. 2 – Умножитель напряжения

Умножитель напряжения – это электрическая схема, состоящая из конденсаторов $U1 = U2 = 1000 \mu\text{F}$ и диодного моста марки *KBPS3510W-A1-0000*. Диодный мост является однофазным двухполупериодным преобразователем переменного в постоянный ток.

Согласно структурной схеме частотного преобразователя (рис. 1), данный умножитель как дополнительный электрический аппарат, устанавливается на вход питающих линий частотника. Данный умножитель позволяет запустить большую часть промышленных частотных преобразователей. Возможно, что некоторые более совершенные модели с контролем пропажи фазы, могут не запуститься, так как постоянные $U = 650\text{В}$ подключаются ко входам *L1* и *L2* на рис. 1, но эта проблема решается установкой перемычки с одной фазы на не подключенную другую фазу.

Во время экспериментальных испытаний АЭП под нагрузкой, были выявлены следующие недостатки метода запуска электропривода в начальный переходной период:

- нагрузка на компоненты проявляется работой с большими мощностями, что увеличивает риск повреждения электронных компонентов умножителя из-за значительных токов и тепловых нагрузок;

- высокоэффективные электронные схемы требуют эффективного охлаждения, что увеличивает затраты на монтаж и эксплуатацию;

- процесс умножения напряжения сопровождается появлением сильных электромагнитных полей, что вызывает нежелательные эффекты электромагнитной совместимости в окружающих устройствах;

- чтобы избежать повреждений оборудования, нужно установить специальные фильтры и предохранительные устройства;

- умножитель снижает качество электроэнергии потребителя сети;

- показатель мощности при экспериментальных испытаниях составил $\cos\varphi = 0,53$.

Независимо от того, насколько мощный и качественный умножитель напряжения используется в системе, общая мощность, которую можно извлечь из электрической сети, ограничивается несколькими факторами:

- бытовая или промышленная электрическая сеть должна обеспечивать определенную максимальную мощность. Обычно бытовые розетки рассчитаны на мощность около 3 кВт, а промышленные электрические линии поддерживают гораздо большие нагрузки;

- толщина проводки (его сечение) определяет максимальный ток, который может проходить через него без риска перегрева или повреждения изоляции. Чем толще провод, тем больший ток он способен выдержать. Поэтому сечение проводов необходимо выбирать соответственно мощности;

- при увеличении длины кабеля или снижении сечения провода возрастает сопротивление, что ведет к падению напряжения. Это падение напряжения должно оставаться в пределах номинальных значений, иначе электрооборудование начнет работать некорректно;

- даже самые мощные диоды и конденсаторы имеют ограничение по максимальному рабочему току и напряжению. Перегрузка этих компонентов приводит к выходу из строя умножителя;

- мощные электрические устройства выделяют большое количество тепла. Отсутствие адекватного охлаждения может вызывать перегрев, выход из строя или отказ компонентов, короткое замыкание или возникновение пожара.

Чтобы рассчитать необходимую мощность и выбрать подходящие компоненты, используем формулу расчета электрической мощности

$$P = I \cdot U, \quad (1)$$

где P – мощность (Вт), U – напряжение (В), I – сила тока (А).

Нужно обеспечить мощность в 3 кВт при напряжении 220В, то номинальный ток, согласно формуле (1) который потребуется, составит: $I = P/U = 13,64$ А. Следовательно, выбранные диоды и конденсаторы должны выдержать данный рассчитанный ток и соответствующее напряжение. Также электрические вводы и автоматические выключатели должны соответствовать требованиям по мощности и защите от коротких замыканий и перегрузок.

В начальный переходной период частотные преобразователи создают сильные кратковременные импульсы тока, представленные на рис. 3, особенно это проявляется при запуске и остановке электродвигателя, а также при изменении частоты вращения ротора.

При этом размах шкалы тока имеет пределы $\Delta I = \pm 60$ А, а напряжения $\Delta U = \pm 1000$ В.

Наличие таких всплесков переменного тока можно объяснить следующим образом. Активный выпрямитель (или умножитель напряжения) предназначен для преобразования переменного сетевого напряжения в постоянное напряжение требуемого уровня [18]. Этот процесс

осуществляется путем включения-выключения мощных полупроводниковых ключей (IGBT- транзисторов). Каждый цикл переключения сопровождается резким изменением величины тока в электрической сети.

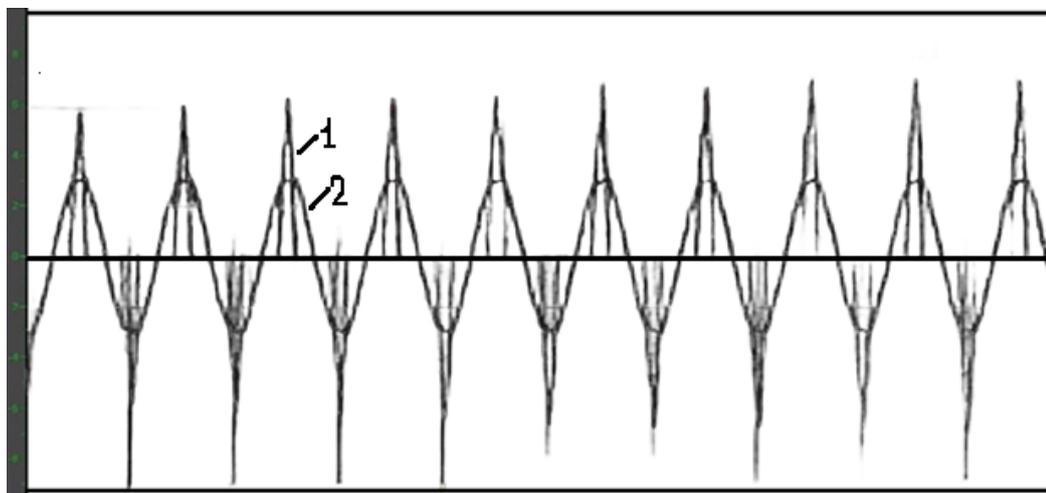


Рис. 3 – Импульсы тока и напряжения в режиме разгона электропривода: 1- импульсы тока; 2 – импульсы напряжения

При включении активного выпрямителя, емкость фильтра постоянного тока (*DC-link*) быстро заряжается высоким напряжением. Так как эта емкость велика, зарядный ток тоже достигает значительных величин, создавая короткие мощные импульсы. Чем быстрее проходит этот переходной процесс, тем сильнее пиковые значения тока [19].

В момент подключения частотного преобразователя и умножителя к электрической сети, будет проявляться кратковременная сильная нагрузка на электрическую сеть, что вызвано большой емкостью конденсаторов в умножителе, а также необходимостью заряжания конденсаторов внутри самого частотного преобразователя.

Решить данную проблему позволяет более усовершенствованная электрическая схема цепочек активного фильтра плавного пуска АЭП, представленная на рис. 4.

Электрическая схема цепочек активного фильтра плавного пуска АЭП собрана на основе параллельно соединенных реле *RLY1 SRD-24VDC-SL-C*, диодного моста марки *KBPS3510W-A1-0000*, стабилитронов и фильтров на основе резисторов и конденсаторов.

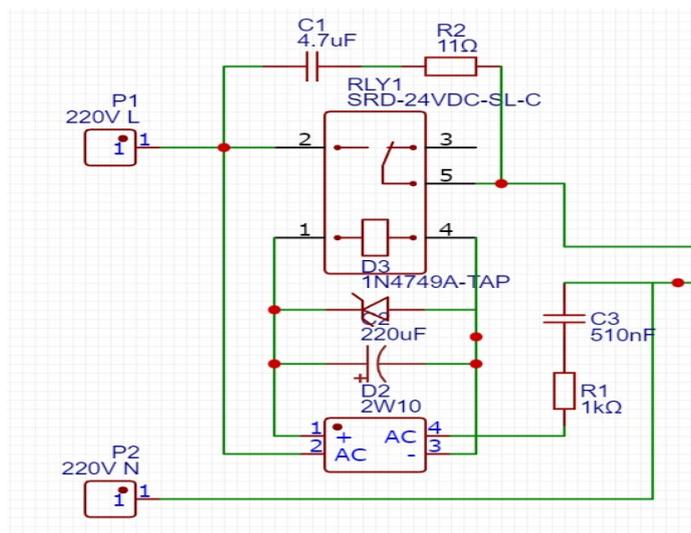


Рис. 4 – Электрическая схема плавного пуска АД

После ввода цепочек активного фильтра плавного пуска АЭП осциллограммы тока и напряжения в установившемся режиме приобретают более плавный вид, представленные на рис. 5.

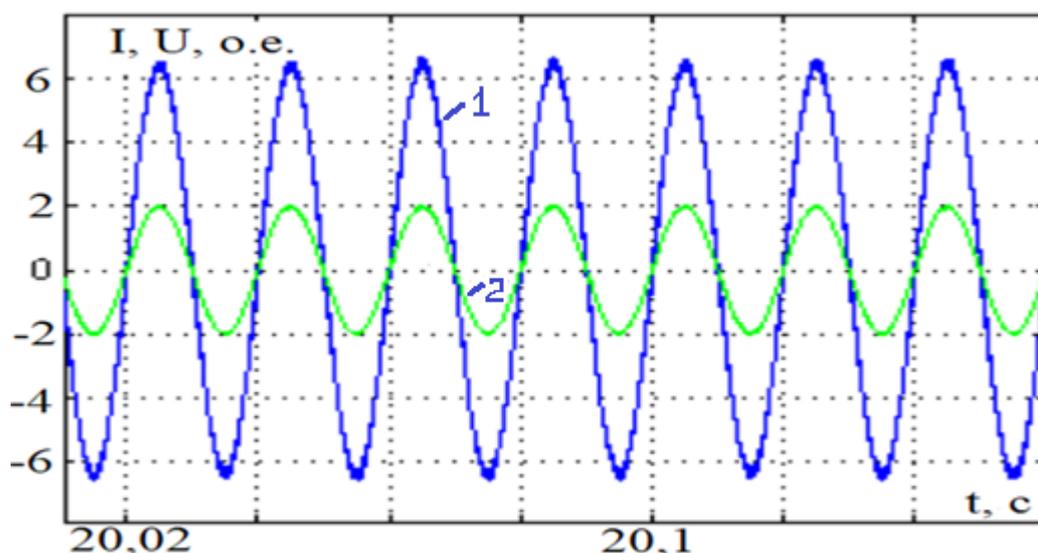


Рис. 5 – Осциллограммы тока и напряжения после дополнительной их фильтрации: 1- кривые тока; 2 – кривые напряжения

Как видно из представленной осциллограммы рис.5, использование активного выпрямителя и умножителя обеспечивают работу АЭП без негативного влияния на форму напряжения сети электроснабжения, а потребление АЭП с асинхронным электродвигателем преобразуются в синусоидальные токи и напряжения.

На рис. 6 представлены осциллограммы заданного ($n_{13АД}$) и действующего значений частот ($n_{1Д}$) вращения приводного асинхронного электродвигателя (АД). Анализ осциллограммы позволяет сделать вывод о высоком качестве системы автоматического управления процессом регулирования режимом работы АВП и частоты вращения АД.

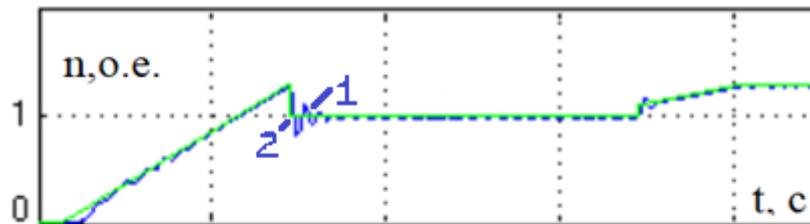


Рис. 6 – Осциллограммы частот вращения АД:

1- значения $n_{13АД}$; 2- значения $n_{1Д}$

Как видно из рис. 5 и 6, регулирование режима работы АЭП выполняется с минимальной погрешностью. Отклонение регулируемого параметра (частоты вращения) от заданного значения незначительна и фактически отсутствует заметная статистическая ошибка. Она достигается за счет правильно настроенной структуры регулятора и алгоритма обратной связи:

- переходные процессы имеют выраженный монотонный характер без появления значительного перерегулирования. Отсутствие импульсных колебаний свидетельствует о хорошо подобранных коэффициентах регуляторов и стабильной работе системы даже при резких изменениях нагрузки. Подобная динамика необходима для точного поддержания

технологических режимов работы электротехнических устройств в системах автоматизации производственных процессов [20];

- частота вращения регулируется с высоким уровнем точности, как в установившемся режиме, так и при изменении нагрузок.

Все это показывает способность электротехнической системы поддерживать оптимальные условия эксплуатации электрооборудования и обеспечивать высокую производительность технологического процесса.

Таким образом, применение дополнительного электротехнического устройства - умножителя напряжения для запуска промышленных ЧРП является новым решением, позволяющим решить проблему недостаточного входного напряжения, особенно в случаях, когда доступное сетевое электрическое напряжение ниже рекомендованного производителем уровня.

Для минимизации негативных последствий применяются специальные устройства фильтрации гармоник и схемы подавления перенапряжений в системе электроснабжения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность разработанных технических решений для преобразования электроэнергии и управления электродвигателем в условиях деревообрабатывающего предприятия (пилорамы).

Представленная система АЭП демонстрирует высокие показатели качества регулирования, обеспечивает стабильность технологического режима и надежность функционирования автоматизированного производства.

Литература

1. Белов М.П. Новиков В.А. Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007. 576с.

2. Селиванов И.А., Карандаев А.С. Инновационные разработки МГТУ в области совершенствования автоматизированных электроприводов металлургического производства // Вестник МГТУ им Г.И. Носова. 2006. №2. С.17-21.

3. Садиков Д.Г., Титов В.Г. Выбор перспективной топологии построения преобразователя частоты для электроприводного газоперекачивающего агрегата // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244.

4. Хасанов З.М., Н. В. Хасанова Н.В., Хасанов О.З., Губайдуллин В.И. Проектирование и исследование быстродействующего вентильного электропривода с учетом информационной оценки параметров исполнительных механизмов // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016): Proceedings of the 4th International Conference, Ufa, 17-19 мая 2016 года. Том 3. Ufa: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2016. С. 26-29.

5. Сафиуллин Р.А. К вопросу о математическом и программном обеспечении станков с ЧПУ. Успехи современной науки и образования. 2017. №1(1). С. 118-125.

6. Mitryaeva O.E., Pechaikina M.A. Application of power semiconductor devices for control of technological processes // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. №50. pp. 45-47.

7. Маршаков Д.В, Цветкова О.Л., Айдинян А.Р. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n3y2011/504.

8. Токтаров И.В., Мухамедзянов Э.А., Мухаметзянов Р.Р. Разработка автоматизированного электропривода для электромобиля // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ : материалы докладов, Казань, 05-06

декабря 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 331-333.

9. Джораев М.К., Хусенов Д.Р., Сафаров Ш.Ф., Уринов Д.А., Рахманов Б.Р. Теоретические основы частотного регулирования и принципы работы устройства плавного пуска // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 2(70). С. 86-92.

10. Ахмад З. Сравнение автоматизированных интеллектуальных систем управления электроприводами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. № 7(253). С. 32-42.

11. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов // Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции, Благовещенск, 11–12 марта 2019 года. Благовещенск: Амурский государственный университет. 2019. С. 555-561.

12. Сафиуллин Р.А. Управление движением электромеханического микроробота // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. №6(63). С. 57-65. DOI 10.17213/0136-3360-2020-6-57-65.

13. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine // Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, Moscow, 12–14 марта 2020 года. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. p. 9059225. DOI 10.1109/REEPE49198.2020.9059225.

14. Сафиуллин Р.А. Математическая модель асинхронного двигателя с полым ротором с прорезями со скосом // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1(17). С. 19-26. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-19-26.

15. Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated Electric Drive for the Control System of a Two-Coordinate Welding Machine // Steel Transl. 51, 314–319 (2021).

16. Сафиуллин Р.А. Математическое моделирование и экспериментальные исследования вибрации асинхронных двигателей // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 7. С. 15-23.

17. Юдаев И.В., Глушко И.В., Зуева Т.М. История науки и техники: электроэнергетика и электротехника: учебное пособие для вузов. СПб: Лань. 2024. 340 с.

18. Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П. Автоматизированный электропривод с частотным управлением. Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2020. 121с.

19. Зюзев А.М., Костылев А.В., Нестеров К.Е. Математическая модель активного выпрямителя напряжения с нейтральным проводом // Электротехнические системы и комплексы. 2020. №2(47). С.41-46.

20. De Doncker R. W., Pule D. W. J., Veltman A. Advanced electrical drives: analysis, modeling, control. Springer Nature, 2020. 417p.

References

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. Avtomatizirovanny elektroprivod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes]. Moscow: Academy, 2007. 576 p.

2. Selivanov I.A., Karandaev A.S. Vestnik MGTU im G.I. Nosova. 2006. №2. pp. 17-21.

3. Sadikov D.G., Titov V.G. Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №.2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244.



4. Khasanov Z.M., N.V. Khasanova, N.V. Khasanov, O.Z. Khasanov, V.I. Informatsionnyye tekhnologii dlya podderzhki prinyatiya intellektual'nykh resheniy (ITIDS'2016): trudy (Proc. of the 4th International Conference). Ufa, 2016. Vol. 3. pp. 26-29.

5. Safiullin R.A. Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya. 2017. №1(1). pp. 118-125.

6. Mitryaeva O.E., Pecheikina M.A. Application of power semiconductor devices for control of technological processes // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. №50. pp. 45-47.

7. Marshakov D.V., Tsvetkova O.L., Aidinyan A.R. Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504.

8. Toktarov I.V., Mukhametzyanov E.A., Mukhametzyanov R.R. XXVII Vserossiyskiy aspirantsko-magisterskiy nauchnyy seminar, posvyashchenny Dnyu energetika i 55-letiyu KGEU: materialy dokladov. Kazan, 2023. pp. 331-333.

9. Dzhoraev M.K., Khusenov D.R., Safarov Sh.F., Urinov D.A., Rakhmanov B.R. Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire. 2021. №2(70). pp. 86-92.

10. Ahmad Z. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. 2025. №7(253). pp. 32-42.

11. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzyanov I.A. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Blagoveshchensk, 2019. pp. 555–561.

12. Safiullin R.A. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. 2020. №6(63). pp. 57-65. DOI 10.17213/0136-3360-2020-6-57-65.

13. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Proc. of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020, Moskva, 2020. p. 9059225. DOI 10.1109/REEPE49198.2020.9059225.



14. Safiullin R.A. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. 2021. №1(17). pp. 19-26. DOI 10.17122/1999-5458-2021-17-1-19-26.
15. Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated Electric Drive for the Control System of a Two-Coordinate Welding Machine. Steel Transl. 2021. 51, pp. 314–319.
16. Safiullin R.A. Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. 2021. №7. pp.15-23.
17. Yudaev I.V., Glushko I.V., Zueva T.M. Istoriya nauki i tekhniki: elektroenergetika i elektrotekhnika: uchebnoye posobiye dlya vuzov [History of Science and Technology: Electric Power Industry and Electrical Engineering]: A Textbook for Universities. St. Petersburg: Lan. 2024. 340 p.
18. Evsikov A.A., Kokovina V.A., Leonov A.P. Avtomatizirovannyy elektroprivod s chastotnym upravleniyem: uchebnoye posobiye [Automated electric drive with frequency control]. Dubna: State University Dubna, 2020. 121 p.
19. Zyuzev A.M., Kostylev A.V., Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. 2020. №2(47). pp. 41-46.
20. De Doncker R.W., Pille D.W. J., Veltman A. Peredovyye elektroprivody: analiz, modelirovaniye, upravleniye [Advanced electrical drives: analysis, modeling, control]. Springer Nature, 2020. 417 p.

Автор согласен на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 2.01.2026

Дата публикации: 25.02.2026