

УДК 62-83

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ: ВЕХИ РАЗВИТИЯ ОТ XIX ВЕКА ДО СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Деменев Дмитрий Андреевич,

Заместитель декана факультета РКТ (Ракетно-космическая техника) МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший преподаватель кафедр ФН-7 (Электротехника и промышленная электроника), ИУ-1 (Системы автоматического управления), Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва.
demenev@bmstu.ru

Прохорова Татьяна Владимировна,

Студентка специалитета, 3 курс
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва.

Шорохова Анастасия Алексеевна,

Студентка специалитета, 3 курс
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва.

Аннотация

В статье рассматривается путь электропривода от фундаментального открытия Фарадея до интеллектуальных систем будущего, основные вехи истории электропривода, представлена классификация современных приводов и их области применения, определены главные тренды будущего, проведен обзор лидеров мирового рынка и проанализированы текущие достижения, проблемы и перспективы российского сектора электроприводов в контексте импортозамещения и технологического суверенитета.

Ключевые слова: электропривод, двигатель, автоматизация, энергоэффективность, электромеханическая система.

ELECTRIC DRIVE SYSTEMS: DEVELOPMENT MILESTONES FROM THE 19TH CENTURY TO MODERN DOMESTIC SOLUTIONS

Demenev Dmitry Andreevich,

Deputy Dean of the Faculty of RKT (Rocket and Space Technology) of the Bauman Moscow State Technical University, Senior Lecturer of the Departments of FN-7 (Electrical Engineering and Industrial Electronics), IU-1 (Automatic Control Systems), Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow.

Prokhorova Tatyana Vladimirovna,

Specialist's degree student, 3rd year Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow.

Shorokhova Anastasia Alekseevna,

Specialist's degree student, 3rd year Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow.

ABSTRACT

The article examines the path of the electric drive from Faraday's fundamental discovery to the intelligent systems of the future, the main milestones in the history of the electric drive, the classification of modern drives and their applications, the main trends of the future, a review of the global market leaders, and the current achievements, challenges, and prospects of the Russian electric drive sector in the context of import substitution and technological sovereignty.

Keywords: electric drive, engine, automation, energy efficiency, electromechanical system.

Электроприводы являются ключевым звеном в преобразовании электрической энергии в механическое движение и составляют основу современной автоматизации и механизации, находя применение практически во всех сферах – от промышленности и транспорта до бытовой техники. Их история, берущая начало в первых опытах XIX века, демонстрирует впечатляющую эволюцию: от доказательства самой возможности такого преобразования к решению задач невиданной ранее сложности. Если первоначальные конструкции решали фундаментальную проблему создания работоспособного устройства, то современные интеллектуальные электроприводы нацелены на достижение высочайшей энергоэффективности, беспрецедентной точности позиционирования и адаптивного взаимодействия с окружающей средой. В связи с этим повышение таких ключевых характеристик, как энергетическая эффективность, быстродействие и надежность, напрямую детерминирует производительность технологических процессов и конкурентоспособность выпускаемой продукции. Несмотря на длительный путь развития и высокую степень зрелости технологий, задача синтеза высокоточной и робастной системы управления электроприводом не теряет своей актуальности, а лишь трансформируется под влиянием новых вызовов цифровой эпохи.

Так что же такое электропривод и как начиналась его история?

Под электроприводом в современной литературе принято понимать электромеханическую систему (Рис. 1.), предназначенную для приведения в движение исполнительных органов машины и управления ее технологическим процессом.[1]

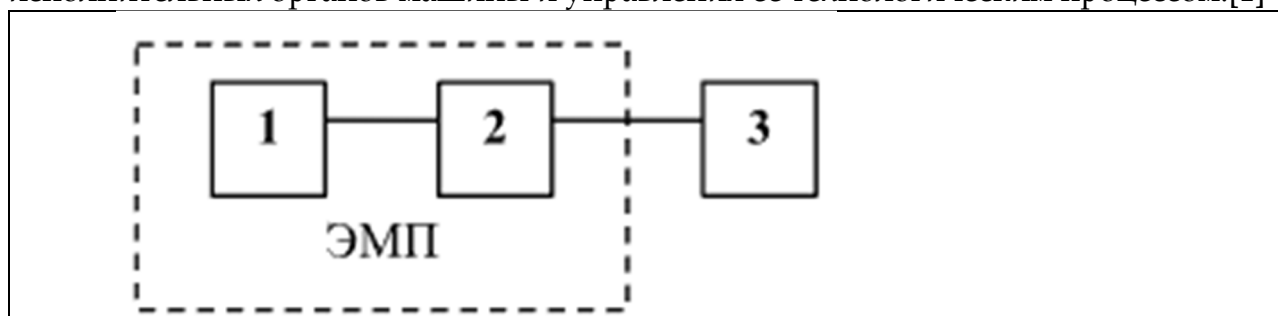


Рис. 1. Схема электромеханического привода. 1 – электродвигатель, 2 – механическая передача, 3 – аппаратура управления.

Данная система, как правило, включает в себя электродвигательное, преобразовательное, передаточное и управляющее устройства. Электропривод – сердце современной промышленности и бытовой техники – прошел долгий путь от фундаментального научного открытия до массового применения. Его история началась не с готового устройства, а с эксперимента, перевернувшего представление о взаимосвязи сил природы.

Отправной точкой в истории электропривода принято считать опыт английского физика Майкла Фарадея. В 1821 году он продемонстрировал явление электромагнитного вращения. Его установка была простой и гениальной: проводник с током, опущенный в сосуд с ртутью, начинал вращаться вокруг постоянного магнита (Рис. 2.). Это был первый в мире прообраз электродвигателя, доказавший принципиальную возможность преобразования электрической энергии в непрерывное механическое движение. Этот момент можно считать рождением самой идеи электропривода. Однако от демонстрации принципа до создания практически применимого устройства лежал путь преодоления множества технических трудностей.[2]

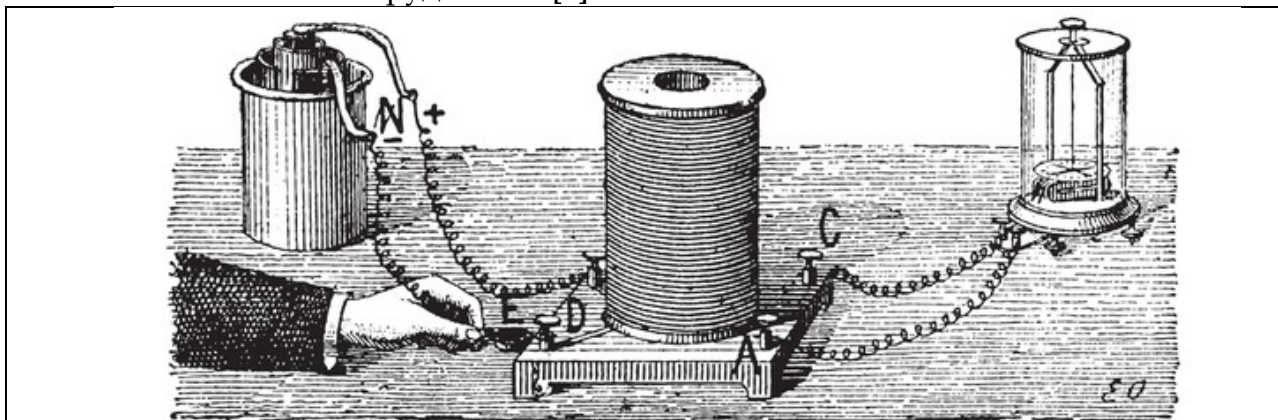


Рис. 2. Опыт Майкла Фарадея.

Следующий шаг был сделан русским академиком Борисом Семёновичем Якоби. В 1834 году он сконструировал первый практичный двигатель постоянного тока (Рис. 3.), который обладал значительной для своего времени мощностью и уже мог выполнять полезную работу.

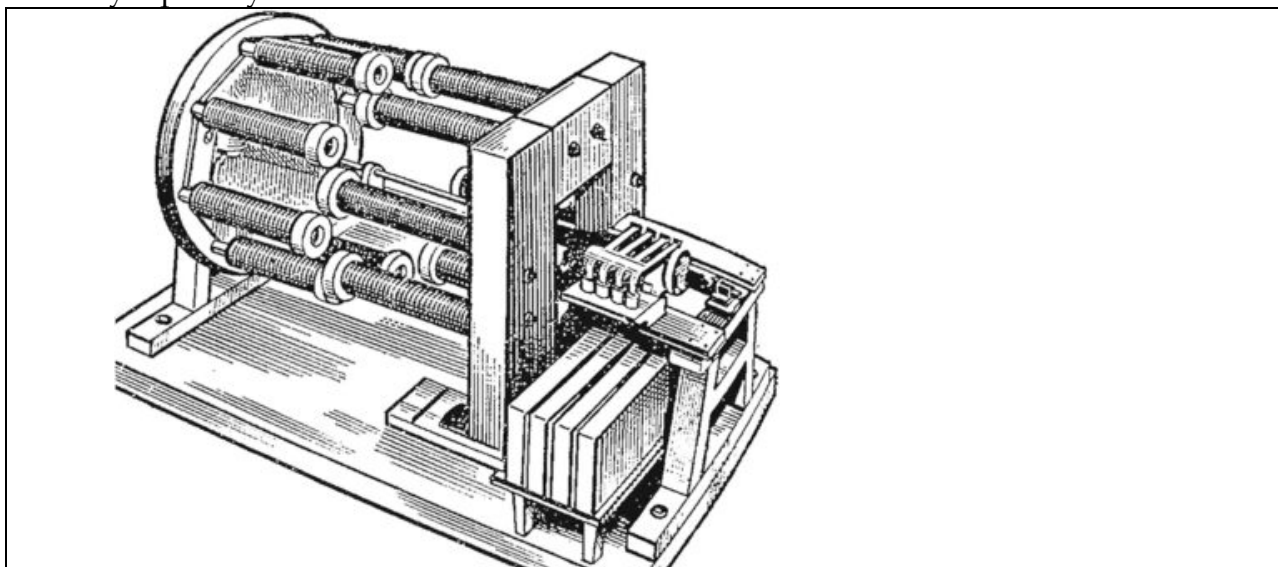


Рис. 3. Действующая модель электродвигателя Б.С. Якоби.

Уже в 1838 году лодка, оснащенная двигателем Якоби (Рис. 4.), совершила плавание по Неве с пассажирами. Работа Якоби перевела электропривод из области чисто научных

экспериментов в плоскость практической инженерии, обозначив его колоссальный потенциал, но до широкого внедрения было еще далеко.

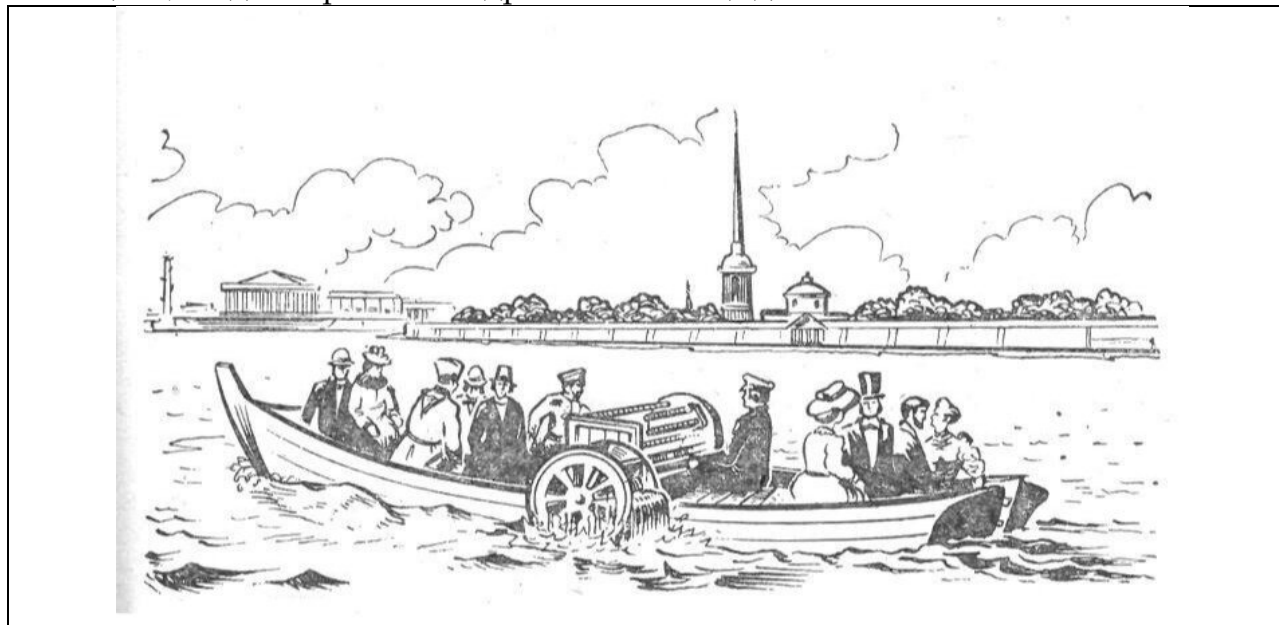


Рис. 4. Первая в мире электролодка.

Между изобретением Якоби и промышленной революцией электроприводов прошло почти 50 лет. Такой продолжительный разрыв был обусловлен необходимостью решения комплекса взаимосвязанных технологических и инфраструктурных задач, выходящих далеко за рамки создания самого двигателя. Для перехода к массовой электрификации производства требовалось создание целостной технологической системы, ключевыми элементами которой являлись:

1. Эффективный и экономичный источник электроэнергии. Первоначальные двигатели, включая конструкцию Якоби, питались от гальванических элементов, что было крайне дорого и неэффективно для промышленных масштабов. Промышленный электропривод стал возможен лишь с появлением и совершенствованием электромеханических генераторов (динамо-машин). Работы таких инженеров, как З.Т. Грамм (создатель кольцевого якоря в 1869 году), В. Сименс (разработчик динамо-машины с самовозбуждением) и Т. Эдисон, позволили создать генераторы постоянного тока с приемлемым коэффициентом полезного действия, способные производить дешевую электроэнергию в значительных объемах.

2. Развитая система передачи и распределения энергии. Даже при наличии генераторов оставалась проблема доставки электроэнергии от центральных станций непосредственно к потребителям — заводам и фабрикам. Использование постоянного тока, доминировавшего на раннем этапе, было сопряжено с высокими потерями при передаче на расстояние, что ограничивало радиус эффективного электроснабжения. Кардинальный прорыв в этой области связан с внедрением систем переменного тока. Теоретические и практические работы Н. Теслы (двухфазная система, 1888 г.), М.О. Доливо-Добровольского (трехфазная система, 1889-1891 гг.) и других инженеров доказали технико-экономическое превосходство переменного тока. Ключевую роль здесь сыграл трансформатор, изобретенный независимо П.Н. Яблочковым и Л. Голаром, который позволял легко повышать напряжение для минимизации потерь при дальнейшей передаче и понижать его для безопасного использования на месте.

3. Создание универсального, надежного и технологичного промышленного двигателя. Ранние двигатели постоянного тока, часто требующие сложного коммутатора и регулярного обслуживания, не отвечали запросам промышленности на надежность и простоту эксплуатации. Технологический ответ на этот вызов был найден в области

переменного тока. В 1888 году Галилео Феррарис и Никола Тесла независимо друг от друга открыли принцип вращающегося магнитного поля, что привело к созданию асинхронного двигателя. Однако именно трехфазный асинхронный двигатель, разработанный Доливо-Добровольским в 1889 году, стал тем универсальным решением, которое определило дальнейший путь развития электропривода. Его конструкция отличалась исключительной простотой: отсутствие коллектора и щеточного механизма существенно повышало надежность, снижало стоимость производства и минимизировало эксплуатационные расходы.

Таким образом, к концу 1890-х годов произошел качественный технологический синтез: были созданы экономичные генераторы, решена проблема дальней передачи энергии благодаря триумфу трехфазных систем переменного тока, а асинхронный двигатель стал эталоном промышленного электропривода. Знаковым событием, продемонстрировавшим эффективность этой новой парадигмы, стала Международная электротехническая выставка во Франкфурте-на-Майне в 1891 году, где была успешно осуществлена передача трехфазного тока на расстояние 175 км с рекордно высоким КПД. Этот комплексный прорыв ознаменовал начало конца эры громоздких и неэффективных систем трансмиссий с линейными валами и ремнями, открыв путь к созданию гибких, энергоэффективных и автоматизированных производственных линий.

Электроприводы сейчас.

Эволюция электропривода не остановилась на достигнутом. Спустя столетие, современная промышленность характеризуется широким разнообразием систем электропривода, оптимизированных для решения специфических задач. Их классификация по типу двигателя и принципу управления отражает ключевые векторы развития: энергоэффективность, точность, интеллектуализацию и прямую интеграцию. К основным классам относятся:

1. Частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) на базе асинхронных двигателей. Данный тип по праву считается «золотым стандартом» современной промышленности. Его работа основана на принципе векторного управления, при котором полупроводниковый преобразователь формирует выходное напряжение переменной частоты и амплитуды (Рис. 5.). Это позволяет осуществлять плавное и точное регулирование скорости вращения и момента асинхронного двигателя, обеспечивая значительное энергосбережение (до 50% и более) в насосных, вентиляторных и компрессорных установках. Универсальность и экономичность обусловили его повсеместное применение в системах общепромышленного назначения, таких как автоматизированные системы вентиляции крупных объектов, где приводы динамически адаптируются к изменяющейся нагрузке.

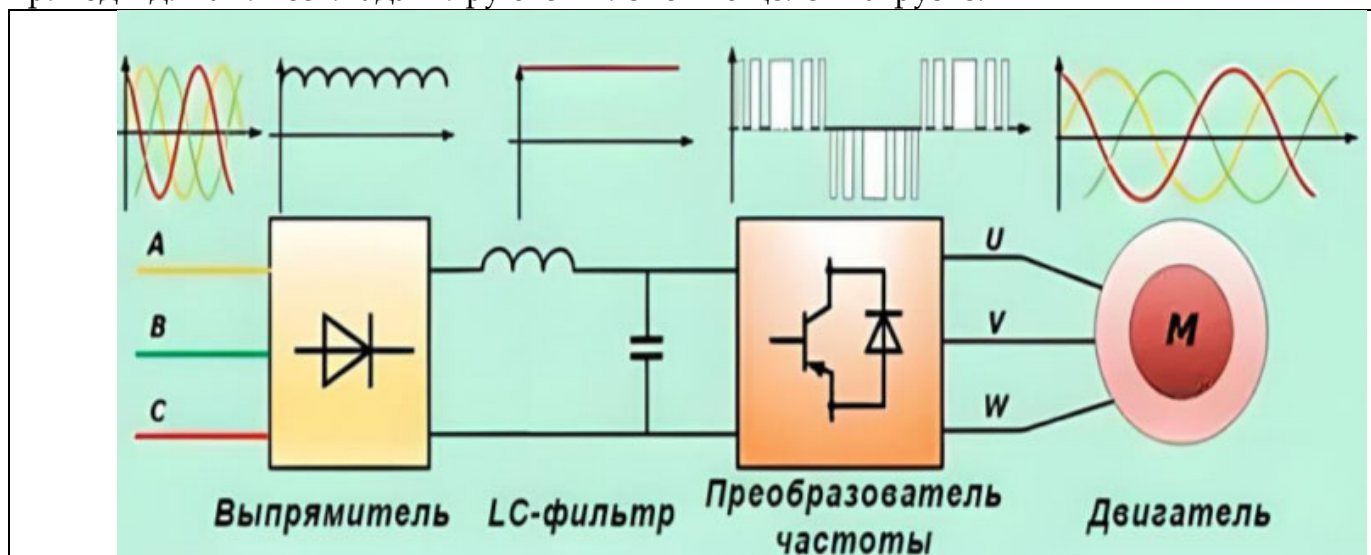


Рис. 5. Принцип работы частотно-регулируемого электропривода.

2. Сервоприводы. Эти системы представляют собой высокоточные электромеханические комплексы, замкнутые по обратной связи (Рис. 6.). В их состав входит двигатель, датчик положения и специализированный контроллер. Сервоприводы обеспечивают точное управление положением, скоростью и моментом с минимальной статической и динамической ошибкой. Благодаря этому они являются основным исполнительным механизмом в робототехнике, станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и другом технологическом оборудовании, где требуется ювелирная точность позиционирования.

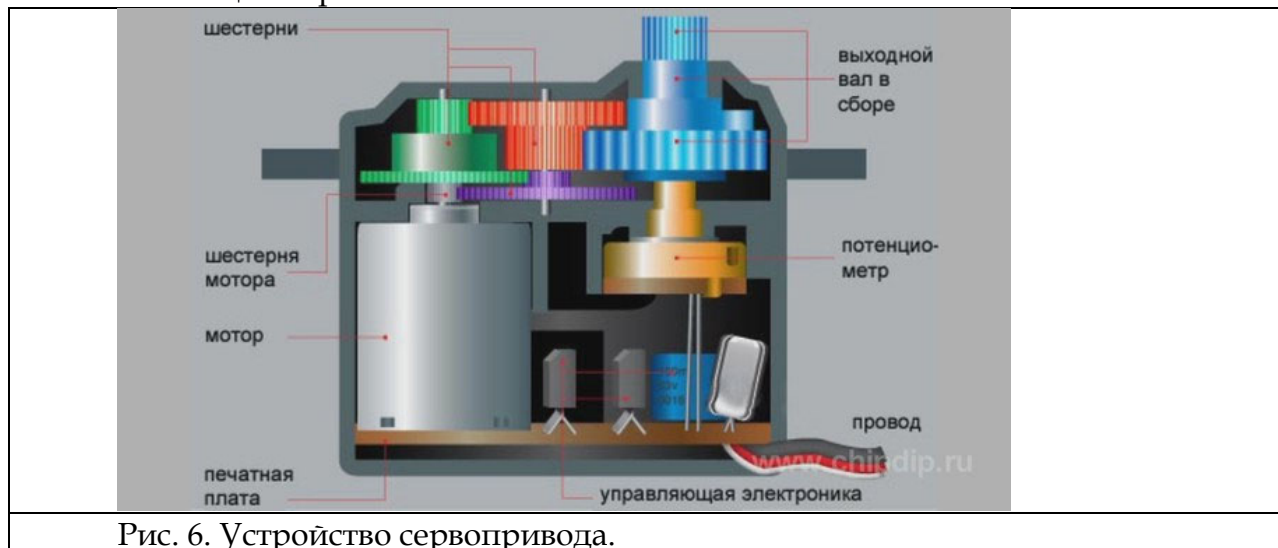


Рис. 6. Устройство сервопривода.

3. Шаговые приводы. Принцип действия данных приводов основан на дискретном преобразовании последовательности электрических импульсов в фиксированные (шаговые) угловые перемещения ротора (Рис. 7.). Их ключевыми преимуществами являются простота конструкции, невысокая стоимость и возможность позиционирования без датчика обратной связи. Несмотря на ограничения по мощности и динамике, шаговые двигатели нашли широкое применение в устройствах, где требуется точное перемещение с относительно невысокими скоростями и нагрузками, таких как приводы печатающих головок 3D-принтеров или координатные столы измерительных машин.

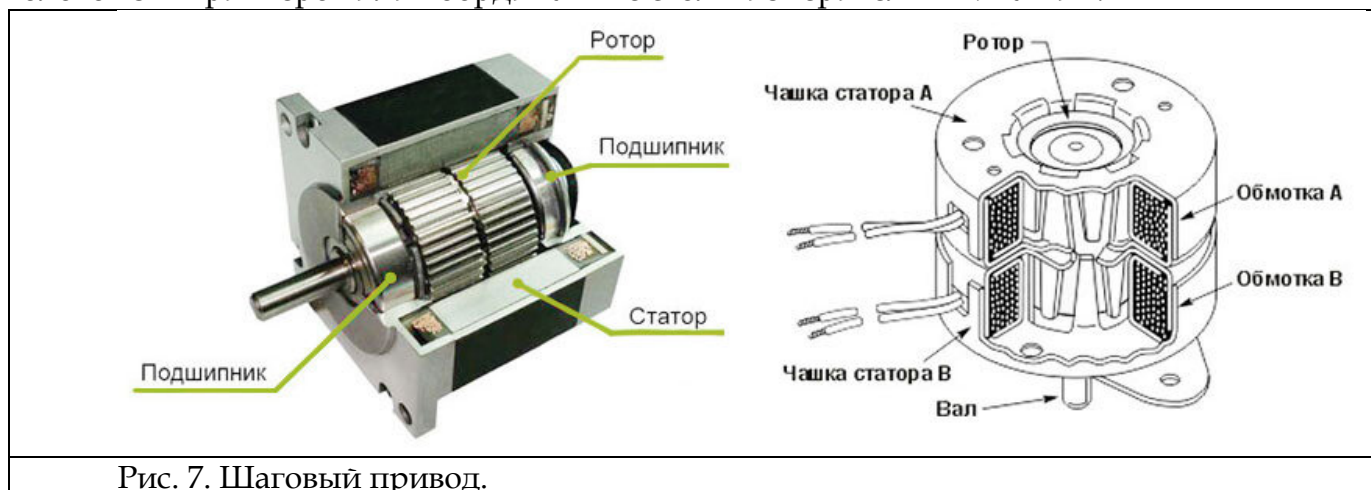


Рис. 7. Шаговый привод.

4. Интеллектуальные электроприводы. Данный класс знаменует переход от простого исполнительного устройства к сложной киберфизической системе. Эти приводы представляют собой готовые функциональные узлы, оснащенные встроенным программируемым логическим контроллером (ПЛК), развитой системой диагностики, сетевыми интерфейсами и возможностями удаленного мониторинга и управления. Интеллектуализация позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления

непосредственно на периферии, повышая гибкость, надежность и ремонтпригодность оборудования.

5. Системы прямого привода. Концепция прямого привода предполагает непосредственное соединение ротора двигателя с рабочим органом механизма, минуя традиционные кинематические элементы (редукторы, ремни, муфты). Это позволяет достичь максимальных показателей точности, динамики и надежности, устранив люфты, потери на трение и необходимость технического обслуживания передач. Прямые приводы находят применение в высокоточных и высокоскоростных применениях, от главных приводов мощных ветрогенераторов и барабанов промышленных стиральных машин до шпинделей прецизионных станков.

В итоге, современный электропривод — это не просто двигатель, а целое семейство технологий, точно подобранных под конкретную задачу. От простых и надежных решений до сложных «умных» систем — это позволяет гибко и эффективно автоматизировать любое производство.

К чему мы стремимся? Главные тренды будущего.

Современные исследования и разработки в области электроприводов направлены на трансформацию этого ключевого элемента автоматизации из простого исполнительного механизма в сложную автономную систему. Можно выделить несколько определяющих трендов, формирующих облик технологий ближайшего будущего.

1. Повышение энергоэффективности как глобальный приоритет. В условиях растущих требований к устойчивому развитию фокус смещается на максимальное снижение энергопотерь. Выполнение международных стандартов высших классов КПД (IE4, IE5) становится базовым требованием. Следующей задачей является оптимизация эффективности не только двигателя в номинальном режиме, но и всей системы «преобразователь-двигатель-механика» во всем диапазоне рабочих скоростей и нагрузок.

2. Глубокая цифровизация и переход к прогнозному обслуживанию. Электропривод превращается в источник данных, интегрированный в промышленную сеть. В режиме реального времени передаются параметры энергопотребления, температура, вибрация, данные о состоянии подшипников. Это позволяет создавать «цифровые двойники» приводов и переходить от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, минимизируя внеплановые простои.

3. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии. Развитие «умных» сетей стимулирует создание приводов, способных адаптироваться к нестабильным параметрам питания от солнечных панелей и аккумуляторных накопителей. Это включает алгоритмы для гибкого управления мощностью и оптимизации энергопотребления в реальном времени.

4. Миниатюризация на основе новых материалов. Рост мощности при одновременном снижении массогабаритных показателей достигается за счет применения новых материалов. К ним относятся постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой (например, на основе редкоземельных металлов) и широкозонные полупроводники (SiC, GaN), которые позволяют создавать более компактные, легкие и мощные преобразователи частоты для передовых областей, таких как электромобилестроение и робототехника.

5. Развитие безредукторных и высокоскоростных решений. Тенденция к отказу от промежуточных механических передач (прямой привод) и увеличению рабочих скоростей вращения продолжает набирать силу. Это позволяет создавать приводы с высочайшим быстродействием, надежностью и точностью, устраняя потери, люфты и необходимость обслуживания механических компонентов.

Таким образом, эволюция электропривода вышла далеко за рамки задач простого преобразования энергии. Ключевыми драйверами развития становятся интеграция в киберфизическое пространство «умных» фабрик, достижение максимальной энергоэффективности и экологической устойчивости, а также создание высокоадаптивных и интеллектуальных систем. Синергия этих направлений определяет траекторию движения создания приводов нового поколения, которые станут основой для полностью автономных и ресурсосберегающих производств.

Лидеры: кто задаёт тон в разработке электроприводов.

Мировая гонка за лидерство в сфере электроприводов определяется не только мощностью инженерной мысли, но и развитием смежных отраслей: полупроводниковой промышленности, робототехники и цифровых технологий. Карта мирового влияния в этой области имеет четкие очертания, где у каждой страны-лидера своя стратегия и ниша.

1. Европа.

Неоспоримыми лидерами в области высокоточной промышленной автоматизации и интеграционных решений являются Германия, Швейцария и Австрия. Именно здесь рождаются концепции «Индустрии 4.0» и создается оборудование для «цифровых фабрик».

Лидирующие компании: Такие компании, как Siemens, Bosch Rexroth, SEW-Eurodrive и швейцарская ABB, задают планку качества и надежности.[7]

Фокус разработок: Их сила — в создании высокоинтегрированных комплексов «двигатель-привод-редуктор», которые поставляются как готовое, идеально сбалансированное решение. Основной акцент делается на энергоэффективность, бесшумность и непрерывную работу в составе сложных автоматизированных систем.

2. Азия.

Азия представлена двумя мощными, но разными подходами к развитию приводной техники.

Япония — это синоним высочайшей точности и надежности. Японские компании — законодатели мод в робототехнике и станкостроении.

Лидирующие компании: Yaskawa, Mitsubishi Electric, Fanuc.

Фокус разработок: Их специализация — высокодинамичные сервоприводы и приводы для промышленных роботов и станков с ЧПУ. Японские разработки характеризуются феноменальной точностью позиционирования и способностью выдерживать интенсивные циклы работы.

Китай демонстрирует феноменальную скорость роста и агрессивную рыночную экспансию. Из догоняющего игрока Китай стремительно превращается в одного из лидеров.

Лидирующие компании: INOVANCE, Estun.

Фокус разработок: Китай делает ставку на массовое производство, активно развивая собственное производство ключевых компонентов, включая силовую электронику (карбид кремния - SiC). Основные усилия сосредоточены на захвате рынка электрообъемности и предложении конкурентоспособных по цене решений для общей промышленности.

3. США.

Соединенные Штаты Америки занимают прочные позиции, ориентируясь на потребности своих традиционно сильных отраслей и благодаря влиянию инновационных компаний.

Лидирующие компании: Rockwell Automation, Eaton.

Фокус разработок: Американские производители сильны в создании решений для конкретных применений: нефтегазовой отрасли, авиакосмической промышленности (концепция «more electric aircraft»). Отдельным драйвером роста выступают такие компании, как Tesla, чьи амбициозные задачи стимулируют спрос на передовые и компактные виды приводов.

4. Россия.

Ситуация в России характеризуется уникальной динамикой, сложившейся под влиянием необходимости ускоренного импортозамещения. С одной стороны, это открыло «окно возможностей» для отечественных производителей, с другой – обнажило системные вызовы.

Текущие достижения и позитивные сдвиги:

Наблюдается оживление деятельности отечественных компаний. На первый план вышли разработчики, ранее работавшие в тени международных гигантов. Ярким подтверждением этого тренда стали экспозиции на ключевых отраслевых мероприятиях, таких как 24-я международная выставка «Нефтегаз-2025» в Москве (Рис. 8.). На ней АО «АБС ЗЭиМ Автоматизация» представило новое поколение высокотехнологичных отечественных электроприводов с цифровым управлением для трубопроводной арматуры. Оборудование отличается высокой точностью регулирования, оснащено интеллектуальными блоками для цифрового управления и функциями аварийного срабатывания, что критически важно для нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.

Как отметил генеральный директор компании Юрий Сушко: «Электроприводы ориентированы не только на нефтегаз и энергетику. Они востребованы в самых разных технологических системах – и это работает на стратегическую устойчивость России. Отрасль активно движется по пути локализации. Несмотря на то, что российский рынок электроприводов никогда не испытывал острой нехватки оборудования, ранее многие компании по инерции отдавали предпочтение зарубежным решениям... Это происходило при наличии проверенных отечественных аналогов».[5]



Рис. 8. Выставка «Нефтегаз-2025».

Среди других ключевых достижений:

- Создание полностью локализованных (до 95%) электроприводов для спецтехники (Рис. 9.) на базе современных вентильно-индукторных двигателей (ВИД) мощностью от 5 до 60 кВт компанией «Априорные решения машин» для применения в погрузчиках и коммунальной технике.[6]

- Освоение серийного производства отечественных синхронных двигателей с постоянными магнитами для общепромышленных применений, таких как станки и насосные агрегаты.



Рис. 9. Спецтехника.

Эти усилия напрямую поддерживаются государственной политикой. В утвержденной в апреле 2025 года Энергетической стратегии РФ до 2050 года декларировано приоритетное использование отечественного оборудования. По данным Минпромторга, доля российского оборудования в нефтегазовом секторе выросла с 60% в 2021 году до 70% в 2024 году, с прогнозом превысить 80% к концу 2025 года.

Главной проблемой, однако, остаётся критическая зависимость от импорта компонентов. Производство современной силовой электроники и специализированных микроконтроллеров в серийных масштабах пока не налажено. Это ограничивает возможности российских компаний в создании конкурентоспособных решений высшего эшелона, фокусируя их усилия на закрытии базовых потребностей промышленности.

Одновременно нарастает конкуренция с китайскими поставщиками, которые активно наращивают экспорт в условиях ограничений с Запада. По данным UN Comtrade, импорт нефтегазового оборудования из Китая в 2023 году значительно вырос, и эта тенденция продолжилась в 2024-м. Отечественный ТЭК, как один из крупнейших в мире, представляет большой интерес для иностранных поставщиков.

В связи с этим отраслевые эксперты указывают на необходимость дополнительных регуляторных мер. Считается, что для успешного развития отечественной промышленности и укрепления энергетического суверенитета важно внедрить особые требования для иностранных поставщиков, а также обеспечить гарантированную долю импортозамещения на объектах энергетической инфраструктуры. Такой подход рассматривается как необходимое условие для защиты внутреннего рынка, создания здоровой конкуренции и долгосрочного технологического суверенитета.

Таким образом, мировой рынок электроприводов представляет собой сложную и многополярную систему. Для наглядного сравнения стратегий и фокуса лидеров отрасли сведём все основные данные в таблицу (Таблица 1).

Таблица 1

Регион / Страна	Ключевые игроки	Фокус и особенности
Европа (Германия, Швейцария, Австрия)	Siemens, Bosch Rexroth, ABB	Высокоинтегрированные решения для «Индустрии 4.0». Фокус на энергоэффективность, надежность и бесшумность.
Азия: Япония	Yaskawa, Mitsubishi Electric, Fanuc	Высочайшая точность и надежность. Лидеры в сервоприводах для робототехники и станков.

Азия: Китай	INOVANCE, Estun	Массовое производство и агрессивная экспансия. Фокус на электромобильность и конкурентные цены.
США	Rockwell Automation, Eaton, Tesla	Отраслевые решения (нефтегаз, авиация). Инновации, стимулируемые такими компаниями, как Tesla.
Россия	АБС Автоматизация, Априорные решения машин ЗЭиМ	Импортозамещение для базовых нужд промышленности (нефтегаз, спецтехника). Зависимость от импорта компонентов и растущая конкуренция с Китаем.

Проведенный анализ позволяет заключить, что эволюция электропривода — от демонстрации физического принципа до сложной киберфизической системы — заложила основу современной автоматизации. Его развитие определялось решением комплексных задач: созданием генераторов, систем передачи энергии и универсальных двигателей.

Современный этап характеризуется глубокой дифференциацией: от массовых ЧРП до высокоточных сервоприводов, что обеспечивает рост энергоэффективности и гибкости производств. Превратившись в источник данных для «умных» производств, электропривод развивается в русле глобальных трендов энергосбережения, цифровизации и миниатюризации.

Мировое лидерство распределено между европейскими, японскими и китайскими производителями. Для России актуальной задачей остается ускоренное импортозамещение и развитие собственной компонентной базы, успех которых зависит от сбалансированной государственной политики, направленной на технологический суверенитет.

Список литературы:

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978 – 832 с., ил.
2. Гладышев Г.П. «Управление электроприводом: от опытов Фарадея до современных технологий». / Г.П. Гладышев. // «Control Engineering Россия». – 2018. – №6. – С. 54-56.
3. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с., ил.
4. Красовский А.Б. Основы электропривода: учебное пособие / А.Б. Красовский. – 2-е изд., испр. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 407, [1] с.: ил.

5. «Нефтегаз 2025»: импортозамещение электроприводов в нефтегазовой отрасли набирает темп» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nprom.online/trends/neftegaz-2025-importozameshhenie-elektroprivodov-v-neftegazovoi-otrasli-nabiraet-temp-nft25/> (дата обращения: 15.09.2025)
6. «Разработаны полностью российские электроприводы для спецтехники» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://reis.zr.ru/news/razrobotany-polnostiu-rossiiskie-elektroprivody-dlya-spetstekhniki/?ysclid=mfwxyti0t3691141654> (дата обращения: 15.09.2025)
7. «Review on the Development Trends of Electric Drive Systems for Electric Vehicles» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10774516> (дата обращения: 09.09.2025)
8. Электропривод и развитие техники // Докл. науч.-метод. Семинара. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 88 с.

References:

1. Voldek A.I. Electric Machines. Textbook for Students of Higher Technical Educational Institutions. 3rd edition, revised. Leningrad: Energiya, 1978, 832 p., ill.
2. Gladyshev G.P. "Electric Drive Control: From Faraday's Experiments to Modern Technologies." / G.P. Gladyshev. // Control Engineering Russia. – 2018. – No. 6. – Pp. 54-56.
3. Kopilov I.P. Electric Machines: Textbook for Universities. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 360 p., ill.
4. Krasovsky A.B. Fundamentals of Electric Drive: Textbook / A.B. Krasovsky. – 2nd edition, revised. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press, 2019. – 407, [1] p.: ill.
5. "Neftegaz 2025: Import Substitution of Electric Drives in the Oil and Gas Industry Gains Momentum" [Electronic resource]. – Access mode: <https://nprom.online/trends/neftegaz-2025-importozameshchenie-elektroprivodov-v-neftegazovoi-otrasli-nabiraet-temp-nft25/> (date of access: 15.09.2025)
6. "Fully Russian electric drives for special equipment have been developed" [Electronic resource]. – Access mode: <https://reis.zr.ru/news/razrobotany-polnostyu-rossiiskie-elektroprivody-dlya-spetstekhniki/?ysclid=mfwxyti0t3691141654> (accessed: 15.09.2025)
7. «Review on the Development Trends of Electric Drive Systems for Electric Vehicles» [Electronic resource]. – Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10774516> (date of access: 09.09.2025)
8. Electric drive and development of technology // Report of the scientific and methodological seminar. – М.: Publishing house of MEI, 2012. – 88 p.