



## ПРЕДИСЛОВИЕ

**С**ельское хозяйство, как никакая другая отрасль, характеризуется широким спектром применяемых машин и механизмов, отличающихся видами и параметрами движения исполнительного органа, режимами и условиями работы, приводными характеристиками. Широкое разнообразие машин во многом определяет и типы приводов: гидравлический, пневматический, механический, от вала отбора мощности, электрический. При этом использование электропривода, регулируемого и автоматизированного, неуклонно расширяется в силу известных его преимуществ. Следовательно, знаниями по электроприводу в рамках необходимого должны владеть не только специалисты-электрики, но и механики.

Методически учебник строится по принципу — основы электропривода и электропривод машин и механизмов сельскохозяйственного назначения, объединенных в группы: насосы и вентиляторы, центрифуги, грузоподъемные машины, транспортеры, машины с кривошипно-шатунным механизмом, кормоприготовительные машины, деревообрабатывающие механизмы (пилорамы). Для каждой из групп машин выделены особенности их работы по приводным характеристикам, выбору мощности электродвигателя, возможности применения частотно-регулируемых асинхронных приводов, устройств плавного пуска, рассмотрены возможности использования линейных приводов.

Содержание учебника соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта по дисциплине

СД-0.5 «Электропривод» для студентов специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», направление 110300 «Агроинженерия».

При написании учебника использовались работы известных ученых и специалистов: М. Г. Чиликина, С. А. Ковчина, В. В. Москаленко, И. Ф. Ильинского, И. Я. Браславского, А. П. Фоменкова, В. А. Буторина, Б. И. Вагина, Г. М. Грачева, Р. С. Аипова, А. С. Знаева, А. В. Цупака и др., а также материалы авторского коллектива.

В Приложении приведены данные по физическим свойствам материалов, характеристики помещений, машин, аппаратов.

Предлагаемый учебник является продолжением учебных пособий «Основы электропривода» и «Электропривод в сельском хозяйстве», вышедших в 2008, 2010 гг. и оказавшихся востребованными среди студентов и специалистов.

В результате изучения и освоения дисциплины «Электропривод» у будущих специалистов будут сформированы следующие профессиональные компетенции:

- решение инженерных задач применения систем электропривода с использованием основных законов механики и электротехники, знание устройства и правил эксплуатации электроустановок;
- выбор элементов привода: типа и параметров электродвигателя, преобразователей электроэнергии, элементов защиты, аппаратов управления;
- оптимальный выбор системы электропривода с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, повышения энергоэффективности.

Все замечания и пожелания по содержанию книги будут с благодарностью приняты по адресу: 196608, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, энергетический факультет, кафедра электрических машин и электропривода.

## ВВЕДЕНИЕ

**Р**езкий рост цен на мировых рынках продовольствия в 2007–2008 гг. явился следствием копившихся в последние годы проблем не только сельского хозяйства, а всего социально-экономического комплекса мирового хозяйства. К ним можно отнести: динамичное развитие экономик стран Азии и возросшее потребление мясомолочных продуктов; рост себестоимости продукции АПК за счет удорожания энергоносителей; низкие урожаи зерновых в некоторых странах; рост населения; увеличивающийся отток продукции полеводства на производство биотоплива и др. Эти процессы затронули и экономику России, которая, по данным Госкомстата, импортирует значительную часть продовольствия (до 40%). Поэтому со стороны государства предпринимаются меры по укреплению внутреннего продовольственного рынка, снижению зависимости от импорта, развитию села и новых форм хозяйствования. Они уже привели к снижению импорта мясных и молочных продуктов, особенно свинины и мяса птицы.

Поставленные перед АПК задачи призваны не только обеспечить население страны качественными продуктами, но и повысить ее роль на мировом рынке продовольствия. Для этого необходимо:

- 1) существенно увеличить производство основных видов продукции, особенно зерна (валовой сбор, обеспечивающий независимость от импорта, должен быть около 1 т на человека, т. е. около 150 млн т. В нашей стране в последние годы он составил 80–100 млн т);

2) проводить на селе технологическое перевооружение, развивать лизинг, долгосрочное кредитование;

3) обеспечить стабильность цен на горючее и электроэнергию, уменьшить дисбаланс цен на продукцию промышленности (машиностроение), минеральные удобрения, строительные материалы, с одной стороны, и сельского хозяйства — с другой;

4) создать современный рыночный механизм регулирования цен на сельскохозяйственную продукцию при ее экологической чистоте;

5) развивать инфраструктуру, жилищное строительство, бытовые условия, чтобы сделать жизнь и работу на селе привлекательной для людей.

Решение поставленных задач лежит на путях перехода к интенсивным методам производства, комплексной механизации и электрификации технологических процессов с внедрением современного оборудования. При этом широкое использование автоматизированного электропривода позволит повысить производительность труда, улучшить качество за счет более высокой степени управляемости технологическими процессами. Сказанное одинаково характерно для животноводства и птицеводства, послеуборочной обработки зерна и тепличных комплексов, переработки молока, приготовления и раздачи кормов, водоснабжения, систем обеспечения микроклимата помещений. В полеводстве наблюдается внедрение систем электропривода, работающих от установленных на борту машин источников электроэнергии.

Комплектация электроприводов в сельском хозяйстве производится стандартными блоками: электродвигатель, редуктор, преобразователь параметров электроэнергии (УВ, ТРН, ШИР, ПЧ), алгоритмы и схемы управления.

Используемые машины и механизмы во многих случаях те же самые, что и в других отраслях народного хозяйства:

- центрифуги, основной особенностью которых является большой приведенный момент инерции;
- насосы и вентиляторы, центробежные и лопастные, для систем водоснабжения, полива, орошения, доиль-

ных установок, обеспечения микроклимата, обработки и сушки зерна. Объединенные в категорию «Турбомеханизмы», они имеют сходные механические характеристики;

- подъемно-транспортные: грузоподъемные механизмы циклического (краны) и непрерывного (транспортеры) действия;
- машины с кривошипно-шатунным механизмом, применяемые для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное: поршневые насосы, компрессоры, пилорамы, различного рода вибромеханизмы сельскохозяйственных машин;
- машины для приготовления кормов: дробилки, клубне-резки, прессы и т. д. (обладают особенностями всех приводных характеристик, поэтому выделены в отдельную группу).

Специфика электроприводов в сельском хозяйстве определяется, прежде всего, разнообразием приводных характеристик, режимами и условиями работы (окружающая среда, качество электроэнергии). Следовательно, выбору систем электропривода с целью обеспечения требуемых характеристик должно уделяться особое внимание.

Основным типом электропривода в сельском хозяйстве, как нерегулируемого, так и регулируемого, является привод переменного тока на основе короткозамкнутого асинхронного двигателя. Нерегулируемый электропривод широко используется в насосных и вентиляторных установках, работающих в длительном режиме с неизменной подачей, многих грузоподъемных машинах и транспортерах, пилорамах, молочных сепараторах, различных сельскохозяйственных машинах с вибромеханизмами. При этом пуск осуществляется прямым включением в сеть или с использованием устройств плавного пуска на основе тиристорных регуляторов напряжения для снижения динамических нагрузок и при недостаточной мощности сети.

Регулируемый привод по системе «асинхронный двигатель — преобразователь частоты» все шире внедряется в системах водо- и теплоснабжения, воздухоудувках, дымососах и других механизмах при работе с переменной

производительностью. Такие системы позволяют решить вопросы регулирования скорости, пуска с минимальными потерями, являясь мощным энерго- и ресурсосберегающим средством. Кормоприготовительные машины оборудуются также регулируемым приводом с целью снижения энергоемкости конечного продукта. Альтернативным вариантом являются многоскоростные асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов.

В качестве серводвигателей мобильных машин в полевом производстве используются вентильные двигатели (синхронный двигатель с постоянными магнитами плюс вентильный коммутатор).

В деревообрабатывающей сфере широко применяются асинхронные электроприводы (токарные станки, фрезерные, рубанки, фуганки и др.), как нерегулируемые, так и регулируемые — по системе ПЧ–АД, а при малых мощностях (ручной инструмент) — однофазные коллекторные машины.

Для теплиц и животноводческих комплексов перспективными представляются монорельсовые транспортные средства, в том числе с линейным асинхронным приводом.

В целом широкое применение автоматизированного электропривода в сельском хозяйстве позволит повысить производительность труда и конкурентоспособность отечественной продукции.



# **1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

## **1.1. НАЗНАЧЕНИЕ И СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Под электроприводом понимают электромеханическую систему, состоящую из электродвигательного, преобразовательного и управляющего устройств, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов (ИО) рабочей машины и управления этим движением. Иными словами, электропривод — это управляемое электромеханическое преобразование энергии [1, 2, 3, 4, 5].

Основным элементом электропривода (ЭП) является электродвигатель, который преобразует электрическую энергию в механическую (в тормозных режимах наоборот — механическую энергию в электрическую). Управление электроприводом с целью обеспечения требуемого характера движения в оптимальных режимах работы машин по производительности, точности, экономичности осуществляется с помощью соответствующих преобразовательных и управляющих устройств, определяющих работу непосредственно электродвигателя.

Структурная схема автоматизированного электропривода приведена на рис. 1.1 [3]. Основные элементы схемы:

ИЭЭ — источник электрической энергии (ЭЭ): сеть переменного или постоянного тока, автономный источник электроэнергии — дизель-генератор, аккумуляторная батарея и т. д.

ПУ — преобразовательное устройство, предназначено для питания двигателя электроэнергией с различными параметрами (напряжение  $U$  и частота  $f$  при переменном

токе, напряжение  $U$  — при постоянном). На практике используются: выпрямители, управляемые (УВ) и неуправляемые (НУВ); широтно-импульсные преобразователи (ШИП); тиристорные регуляторы напряжения (ТРН); преобразователи частоты (ПЧ) для питания асинхронных и синхронных двигателей и др.

ЭД — электрический двигатель постоянного или переменного (асинхронный, синхронный) тока; вращающийся, шаговый, линейный, электромагнитный; преобразует электрическую энергию (ЭЭ) в механическую (МЭ).

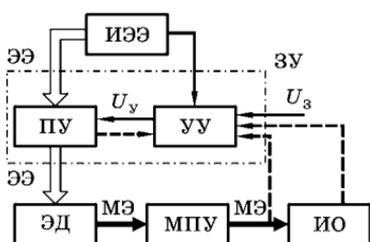


Рис. 1.1

Структурная схема автоматизированного электропривода

УУ — устройство, управляющее работой ПУ по командным сигналам задающего устройства (ЗУ) и обратных связей о состоянии электропривода и технологического процесса. В УУ сигналы обратных связей сравниваются с заданными и при наличии рассогласования вырабатывается сигнал, воздействующий на преобразователь ПУ, электродвигатель ЭД, устраняя, таким образом, рассогласование.

УУ состоит из аппаратов управления и защиты, а также электронных и микропроцессорных устройств управления. Совокупность информационных (датчики технологических, механических, электрических величин и др.) и управляющих устройств образует информационный канал электропривода, предназначенный для управления переменными величинами (координатами) привода в соответствии с требованиями технологического процесса. Не менее важной функцией УУ является реализация процесса с минимальными затратами электроэнергии. УУ (рис. 1.1) называется *регулятором*.

Перечисленные выше элементы относятся к электрической части привода (ЭЧ).

Механическая часть (МЧ) включает в себя сам рабочий механизм (РМ) или исполнительный орган (ИО), который приводится в движение электродвигателем через

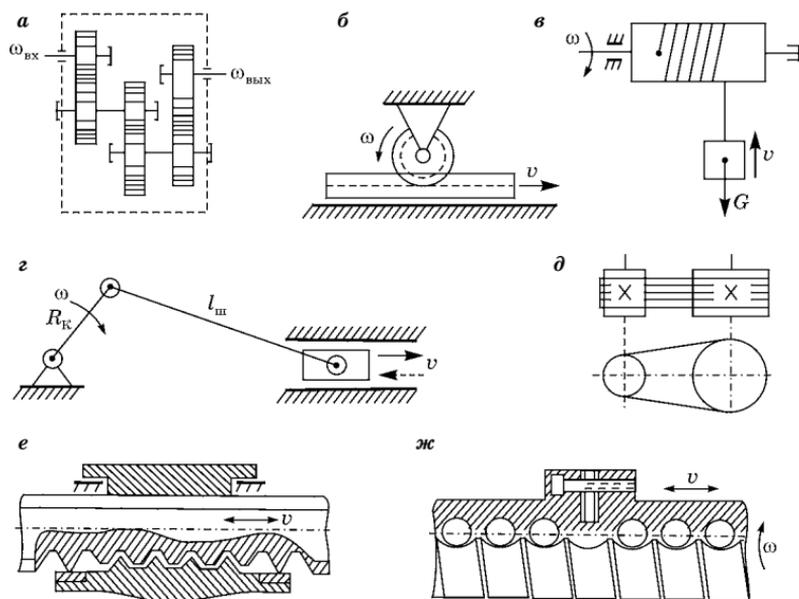


Рис. 1.2

Схемы механических передаточных устройств:

*a* — редуктор:  $\omega_{\text{вх}}$ ,  $\omega_{\text{вых}}$  — скорости входная и выходная соответственно; *б* — зубчато-реечная передача; *в* — барабанно-канатная передача:  $G$  — вес груза; *г* — кривошипно-шатунный механизм:  $R_{\text{к}}$  — радиус кривошипа;  $l_{\text{ш}}$  — длина шатуна; *д* — ременная передача; *е* — винтовая передача; *ж* — шарико-винтовая передача.

механическое передаточное устройство (МПУ). МПУ может изменять вид движения, например вращательное в поступательное или возвратно-поступательное (пара «винт — гайка», кривошипно-шатунный механизм), изменять скорость и момент (редуктор, ременная, цепная и другого вида передача) и т. д. Отметим, что ротор двигателя относится и к механической части, и учитывается при расчетах моментов и сил инерции. На рис. 1.2 приведены схемы механических передаточных устройств.

ЭД, ПУ и МПУ образуют силовой канал электропривода (рис. 1.1). Во всех звеньях силового канала часть энергии теряется (потери), а энергическая эффективность привода обычно оценивается величиной КПД как

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}}} = \frac{P_2}{P_1} = \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{эд}} \eta_{\text{мп}}, \quad (1.1)$$

где  $\eta_{пр}$ ,  $\eta_{эд}$ ,  $\eta_{мпц}$  — КПД преобразователя, электродвигателя и МПУ соответственно;  $P_{пол}$ ,  $P_{потр}$  — полезная и потребляемая мощности.

КПД системы «электропривод — рабочая машина»

$$\eta = \frac{P_{техн}}{P_{потр}} = \eta_{ЭП} \eta_{рм}, \quad (1.2)$$

где  $P_{техн}$  — технологически необходимая мощность для выполнения производственного процесса;  $\eta_{рм}$  — КПД рабочей машины;  $\eta_{ЭП}$  — КПД электропривода.

При работе на различных скоростях (искусственных характеристиках)

$$\eta_{ЭП} = \frac{W_{пол}}{W_{потр}} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{2i} t_i}{\sum_{i=1}^n (P_{2i} + \Delta P_i) t_i}, \quad (1.3)$$

где  $\eta_{ЭП}$  — усредненный КПД привода;  $P_{2i}$ ,  $\Delta P$ ,  $t_i$  — полезная мощность, потери и время работы привода на  $i$ -й скорости;  $n$  — число участков (по нагрузочной диаграмме);  $W_2$ ,  $W_1$  — полезная и потребляемая энергия.

С точки зрения экономичности потребления активной мощности важным является и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , определяемый как

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (1.4)$$

где  $P$ ,  $S$ ,  $Q$  — потребляемые активная, полная и реактивная мощности.

Для цикла работы рассчитывается средневзвешенный  $\cos \varphi_{св}$

$$\cos \varphi_{св} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \cdot t_i)}. \quad (1.5)$$

Для асинхронных двигателей, работающих от сети переменного тока, произведение  $(\eta \cdot \cos \varphi)$  называется энергетическим фактором, и по этому критерию зачастую определяются оптимальные параметры системы [24].

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Электроприводы, используемые в различных технологических установках, разнообразны по своим функциональным возможностям, схемному и конструктивному исполнению, степени автоматизации, что связано с большим разнообразием рабочих машин. Основные признаки, по которым классифицируют электроприводы:

- число рабочих органов, приводимых электроприводом: индивидуальный, групповой;
- вид движения электродвигателя: вращательного, линейного, многокоординатного;
- способ соединения двигателя с рабочим органом: редукторный, безредукторный, конструктивно-интегрированный;
- регулируемость: нерегулируемый, регулируемый;
- основной контролируемый параметр: регулируемый по моменту, регулируемый по скорости, регулируемый по положению;
- вид управления: ручное, полуавтоматическое, замкнутая система автоматического регулирования (САР) скорости с ручным заданием или с заданием от системы управления технологическим процессом, замкнутая САР положения, обеспечивающая точное позиционирование; программное, следящее.

*Классификация по числу рабочих органов, приводимых в движение электроприводом.* Электроприводы бывают индивидуальными и групповыми. Если каждый рабочий орган машины приводится в действие своим электроприводом, то последний называется индивидуальным. Такой привод может быть однодвигательным либо многодвигательным. При групповом электроприводе один двигатель приводит в движение несколько рабочих органов. При этом усложняется кинематическая цепь рабочей машины и затрудняется управление рабочими органами, так как для отдельного управления необходимо применять специальные механические устройства: управляемые муфты, коробки передач, фрикционы и др. По мере развития техники групповой электропривод все больше вытесняется индивидуальным.

*Классификация по виду движения электродвигателя.* Наибольшее применение, а до недавнего времени исключительное, получили электроприводы вращательного движения. Сейчас значительное внимание уделяется линейным двигателям. В тех механизмах, где рабочий орган совершает поступательное или возвратно-поступательное движение, применение линейных двигателей конструктивно гораздо удобнее, чем использование специальных кинематических пар: винт-гайка, кривошипно-шатунный механизм и др. Создание новых эффективных конструкций линейных двигателей с питанием от полупроводниковых преобразователей частоты открывает новые возможности использования линейных электроприводов для ряда производственных машин, в том числе и на предприятиях АПК.

Многокоординатные электроприводы на основе специальных шаговых электродвигателей являются отечественной разработкой и находят применение в высокоточных робототехнических установках, сборочных автоматах и используются для других целей. Они позволяют осуществлять пространственные движения рабочего органа по нескольким координатам.

*Классификация по способу соединения двигателя с рабочим органом.* Электродвигатели соединяются с рабочим органом машины либо непосредственно, либо через редуктор или другую кинематическую передачу. Непосредственное соединение двигателя с рабочим органом характерно для высокоскоростных рабочих машин, например, насосов и вентиляторов. В других рабочих машинах, где скорость рабочего органа меньше (или больше) номинальной скорости электродвигателя, применяются редукторы (или мультипликаторы), которые изменяют скорость и момент на валу рабочего органа.

До 60-х гг. XX в. регулируемые ЭП строились на основе машин постоянного тока. К настоящему времени в связи с разработками и массовым выпуском управляемых полупроводниковых приборов, а на их основе преобразователей частоты, регуляторов постоянного и переменного напряжения основным регулируемым электроприводом стал частотно-

управляемый асинхронный с короткозамкнутым двигателем и вентильный (синхронный двигатель + ПЧ).

Для высокоточных механизмов и машин, работающих в динамических режимах, стремятся исключить механические передачи между валом двигателя и рабочим органом. Такие электроприводы называются безредукторными. При этом, однако, возрастают габаритные размеры и масса приводного двигателя, поскольку при одинаковой его мощности эти параметры примерно обратно пропорциональны номинальной скорости двигателя. В последние годы стремятся, особенно для высокоточных электроприводов, конструктивно объединить рабочий орган с приводным электродвигателем. Примерами таких конструктивно интегрированных электроприводов являются электрошпиндели (для шлифовальных станков), мотор-колеса (для транспортных средств), мотор-редукторы и др.

Новым направлением в технике является создание мехатронных модулей — электромеханических модулей, включающих в себя рабочий орган, электромеханическое устройство (двигатель) с системой его регулирования (ПЧ, ШИП и др.) и микропроцессорное управляющее устройство. Такие модули применяются в роботах и на станках с числовым программным управлением.

*Классификация по регулируемости.* Под регулируемостью понимается возможность изменения или точного поддержания скорости, ускорения или момента (усилия) приводного электродвигателя.

Исторически сложилось, что большинство существующих электроприводов выполнено на базе короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, не допускающих в стандартной схеме их питания регулирования скорости или момента. Модификацией односкоростных асинхронных электродвигателей являются двух- и трехскоростные двигатели. Электроприводы с многоскоростными двигателями дают возможность получать две или три фиксированные рабочие скорости, но не могут обеспечить их плавного регулирования в заданном диапазоне. По плавности регулирования приводами можно также отнести электроприводы с реостатно-контакторным управлением.

В приводах центрифуг при частотах вращения до 10 000 об/мин используются редукторы с передаточным числом  $i = \frac{n_{дв}}{n_{рo}} < 1$ , так называемые мультипликаторы.

Регулируемый электропривод выполняет следующие функции:

- установка требуемой скорости в заданном диапазоне;
- стабилизация установленного значения скорости с заданной точностью при возмущающих воздействиях, например изменении нагрузки на валу двигателя;
- регулирование момента, развиваемого двигателем в двигательном и тормозном режимах, и ускорения (замедления) привода;
- формирование требуемого характера изменения скорости во времени  $\omega = f(t)$  с заданной точностью.

В настоящее время все более широкое применение получают регулируемые электроприводы.

*Классификация по основному контролируемому параметру.* В зависимости от технологических требований электропривод должен осуществлять регулирование по одной из главных контролируемых величин (координат): моменту, скорости или положению рабочего органа машины. При этом регулируются и другие величины, например при регулировании положения необходимо регулировать скорость и т. п.

Регулирование момента как основной регулируемой величины характерно для тех производственных машин, где контролируется натяжение обрабатываемого материала: намоточных устройств, линий обработки ткани и др. Часто такой величиной является скорость: для механизмов главного движения станков, клетей прокатных станов, конвейеров, питателей, насосов и многих других машин в соответствии с технологическим процессом требуется ее регулирование. Есть механизмы, для которых необходимо позиционирование рабочего органа или перемещение его по заданной траектории. Такие электроприводы управляются по положению (лифты, подъемные краны).

*Классификация электроприводов по виду управления.* Электроприводы с системами управления различаются по

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)