

## **Автоматизированные электроприводы, обеспечивающие управление скоростью и положением различных объектов управления**

Ганиев Т.М., Брылёв В.О., Астапов В.Н.

Самарский Государственный технический университет  
Самара, Россия (443100, Самара ул. Молодогвардейская, 244),  
e-mail: ganievtimur699@gmail.com, asta-2009@mail.ru

---

### **Аннотация**

В данной статье рассмотрены устройства и принципы работы асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Приведены методы регулирования скорости двигателей, как основы электрических приводов. Проведен аналитический обзор функциональных схем цифровой системы стабилизации скорости электропривода и управления положением объекта. Сферы применения электроприводов управления скоростью широко распространены как в промышленности, так и в коммунальном хозяйстве, как пример, лифтовое хозяйство. В системах с меньшей точностью регулирования скорости контур скорости делают комбинированным – цифроаналоговым. Регулятор скорости имеет аналоговую схему, которая работает по пропорциональному закону, а интегрирующая часть – цифровую схему. Задание скорости в таких системах является цифровым. В настоящее время широкое внедрение во все сферы деятельности, и особенно в коммунальном хозяйстве, водоснабжение, применяются асинхронные двигатели с частотным управлением. Такие электроприводы являются автоматизированными и работают с преобразователями частоты питающей сети.

**Ключевые слова:** Электроприводы, автоматизированные электроприводы, управление, аналоговая, цифровая.

### **Annotation**

This article discusses the devices and principles of operation of asynchronous motors and DC motors. Methods of motor speed regulation as the basis of electric drives are given. An analytical review of the functional circuits of the digital system for stabilizing the speed of the electric drive and controlling the position of the object is carried out. The fields of application of electric speed control drives are widespread both in industry and in public utilities, as an example, elevator facilities. In systems with lower speed control accuracy, the speed contour is made combined – digital-analog. The speed controller has an analog circuit that operates according to a proportional law, and the integrating part has a digital circuit. The speed setting in such systems is digital. At present, asynchronous motors with frequency control are widely used in all spheres of activity, and especially in utilities, water supply. Such electric drives are automated and work with frequency converters of the supply network.

**Keywords:** Electric drives, automated electric drives, control, analog, digital.

### **Введение**

Электропривод – электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса.

Автоматизированный электропривод – электропривод, часть операций управления в котором выполняют соответствующие устройства управления без участия оператора. [1]

Принимая во внимание, что основными средствами управления в электроприводах являются программируемые микроконтроллеры и (или) промышленные компьютеры, уместно определять современный автоматизированный электропривод как компьютеризированный. Это определение подходит для интегрированных систем многодвигательных электроприводов, объединяемых с компьютерными средствами автоматизации и разветвленными информационными сетями в составе технологических агрегатов и комплексов. [2]

Во многих отраслях промышленности производительность технологического оборудования в значительной степени определяется уровнем его автоматизации, основным звеном которой является электропривод. Прогресс во многих отраслях науки и техники (машиностроение, микроэлектроника, транспорт, космическая техника, добыча и переработка полезных ископаемых и т. д.) все более подчеркивает его важнейшую роль. [3]

### **Развитие электропривода**

В начале 20 века внедрение электропривода пошло более широко – в транспорт и промышленность. Особенную роль в этом сыграло изобретение в 1889 году асинхронного двигателя и трансформатора М.О. Даливо-Добровольским.

За прошедшие с тех пор десятилетия электродвигатель стал основным видом приводных машин. Сейчас на долю электрических двигателей приходится более 90 мощностей всех силовых установок.

Одновременно с развитием электромашиностроения развивались и другие отрасли электротехнической промышленности, что привело к широкому применению новейших средств автоматизации. Основными задачами являлось создание регулируемых приводов на базе асинхронного двигателя. Регулирование скоростью асинхронных двигателей осуществляется изменением частоты питающего напряжения. Для управления частотой напряжения, а значит и частотой вращения ротора двигателя применяются частотные преобразователи с применением тиристоров и мощных транзисторов. Что послужило широкое применение цифровых вычислительных машин и микроконтроллеров для управления электроприводами. [4]

### **Принцип действия двигателей постоянного тока**

Принцип действия двигателей постоянного тока основан на свойствах проводников с током в магнитном поле.

По схеме включения обмоток возбуждения различают двигатели независимого (шунтовой двигатель), последовательного (серийный двигатель) и смешанного

(компаундный двигатель) возбуждения. В общем случае в цепях обмоток могут быть включены добавочные сопротивления. [4]

### **Автоматизированные электроприводы управления скоростью**

Цифроаналоговые системы стабилизации скорости и момента двигателя, как и аналоговые системы, выполняются по структуре с подчиненным регулированием координат. Они содержат аналоговую и цифровую часть и поэтому называются цифроаналоговыми. Аналоговыми элементами таких систем являются преобразователи и двигатели. Вследствие способности датчиков тока точно измерять ток двигателя, контуры тока в системе также выполняются аналоговыми. Цифровая часть системы электропривода относится к контуру регулирования скорости и включает в себя цифровые устройства задания скорости и информационно - измерительные устройства скорости в виде датчика и регулятора скорости.

В системах с меньшей точностью регулирования скорости контур скорости делают комбинированным – цифроаналоговым. Пропорциональная часть регулятора скорости является аналоговой, а интегрирующая – цифровой. Задание скорости в таких системах является цифровым. Задание скорости электропривода вводится в форме числа  $N_{3C}$  с помощью устройства ввода задания  $SZ$ . Темп нарастания задающего напряжения, а соответственно и скорости обеспечивается цифровым задатчиком интенсивности  $SJZ$ . Далее цифровой сигнал задания  $N'_{3C}$  цифроаналоговым преобразователем (ЦАП)  $UZV$  преобразуется в аналоговый сигнал задания скорости  $U_{3C}$ , подается на аналоговый регулятор скорости  $AR$ . Одновременно число  $N'_{3C}$  в управляемом делителе частоты  $A1$  определяет частоту следования импульсов задания скорости  $f_3$ , которые получают из импульсов эталонной частоты  $f_э$ , задаваемых высокостабильным кварцевым генератором  $Gf$ .

Импульсы задания с частотой  $f_3$  поступают в цифровой интегратор (ЦИ)  $AJZ$ , являющийся интегрирующей частью регулятора скорости и на который также подаются импульсы обратной связи по скорости, следующие с импульсного датчика скорости  $BRZ$  с частотой  $f_c$ , пропорциональной текущей скорости двигателя. ЦИ состоит из трех основных узлов: узла разделения импульсов задания и обратной связи по времени, реверсивного счетчика РС и ЦАП. УРИ распределяет во времени импульсы с частотами  $f_3$  и  $f_c$ , чтобы они поступали на РС последовательно, т. е.  $f_3$  во время пауз  $f_c$  и наоборот  $f_c$  - во время пауз  $f_3$ . Реверсивный счетчик имеет два входа: сложение и вычитание, на которые соответственно поступают последовательно импульсы  $f_3$  и  $f_c$ . РС считает количество импульсов  $f_3$  и  $f_c$ . При этом, если  $f_c = f_3$  т. е. скорость двигателя равна заданной, счетчик на выходе числа не меняет; если  $f_c < f_3$  (скорость двигателя ниже заданной), то

счетчик сосчитает число  $+f = f_3 - f_c$ , что повысит на выходе ЦАП цифрового интегратора напряжение  $U_{ци}$ , являющееся интегральной составляющей рассогласования регулятора скорости, и соответственно напряжение  $U_{зт}$  и скорость двигателя. Если  $f_c > f_3$ , т. е. скорость двигателя выше заданной, то счетчик сосчитает число  $-f = f_c - f_3$ , что снизит на выходе  $U_{ци}$  значение, а затем  $U_{зт}$  и скорость двигателя. Таким образом, счетчик обеспечивает интегрирование рассогласования между импульсом задания и обратной связи, следующими с частотами  $f_3$  и  $f_c$  которое в ЦАП ЦИ превращается в аналоговый сигнал интегральной составляющей рассогласования  $U_{ци}$ , величина которого пропорциональна числу, записанному в счетчике. Далее сигнал  $U_{ци}$  складываясь арифметически с  $U_{зс}$  в  $AR$ , обеспечивает повышение или снижение скорости двигателя. [5]

## **Сферы применения электроприводов управления скоростью**

### **Эскалатор**

Одним из примеров использования электроприводы управления скоростью является эскалатор.

У эскалатора ступени лестничного полотна связаны шарнирами с двумя замкнутыми цепями, которые приводятся в движение ведущей звездочкой. Ступени катятся по бегункам по направляющим. Нижние звездочки связаны с натяжной станцией, которая обеспечивает постоянное натяжение тяговых цепей. Вал верхней звездочки через цепную передачу и редуктор связан с приводным двигателем.

Приводная станция эскалатора снабжена двумя рабочими тормозами и аварийными. Рабочие тормоза устанавливаются непосредственно у двигателя, а аварийный тормоз – у вала тяговой звездочки.

Для удобства и безопасности пользования с двух сторон от лестничного полотна эскалатор снабжен движущимися поручнями. Поручни приводят в движение через цепные передачи или редуктор от главного двигателя тяговых цепей. [6]

### **Лифт**

Современные лифты имеют автоматизированную точную остановку, которая выполняется системой электропривода. В ряде случаев необходимость обеспечения требований точности остановки оказывает решающее влияние на выбор системы электропривода лифта.

В современных пассажирских и грузовых лифтах, оборудованных системой электропривода переменного тока, процесс точной остановки происходит следующим образом. При подходе кабины лифта к этажной площадке срабатывает датчик точной остановки, который выполняют в самых различных конструктивных вариантах. После срабатывания датчика точной остановки и отключения электродвигателя движение

кабины продолжается до момента замыкания механического тормоза, под действием которого кабина останавливается. Неточность остановки возникает из-за того, что все величины, от которых зависит путь «точной остановки», изменяются в довольно широких пределах. Моменты инерции и статический момент на валу электродвигателя зависят от загрузки кабины. Значения начальной скорости свободного выбега определяются «жесткостью» механической характеристики электродвигателя и т. д. Для получения заданной точности остановки лифта при номинальной скорости движения от 0,5 м/с необходимо перед остановкой заблаговременно снижать скорость кабины. Ж это в свою очередь определяет необходимый диапазон регулирования скорости подъемного электродвигателя.

После срабатывания датчика точной остановки скорость электропривода снижается до нуля. Затем замыкается механический тормоз. Если по каким-либо причинам произошло перерегулирование, тормоз не замыкается и электропривод возвращает кабину в нулевое положение, после чего тормоз замыкается. Система электропривода рассчитана таким образом, что может удерживать кабину лифта в точной остановке даже при неисправности механического тормоза. Такая система точной остановки обеспечивает наиболее приближающийся к оптимальному график движения лифта. [7]

### **Городской транспорт и автомобиль**

Еще одним примером использования автоматизированных электроприводов управления скоростью является городской транспорт и автомобиль, в данном случае тяговый электропривод.

Тяговый электропривод (ТЭП) состоит из электрического двигателя постоянного или переменного тока, преобразователя и накопителя энергии, собранного на электрохимических конденсаторах. Питание ТЭП может осуществляться от контактной сети постоянного тока, аккумуляторной батареи, ДВС - или дизель - или газотурбинной - генераторной установки или электрохимического генератора на топливных элементах. [8]

Для проведения анализа процессов изменения скорости тягового электродвигателя (скорости движения автомобиля) классифицируем их следующим образом.

1. Процесс естественного изменения скорости тягового электродвигателя (первый процесс) как процесс автоматического ее изменения электродвигателем при изменении нагрузки на валу ЭД (сопротивления движению автомобиля).

2. Процесс регулирования скорости тягового электродвигателя (второй процесс) как процесс автоматического ее изменения двигателем при принудительном воздействии на тот или иной элемент электрической цепи водителем или автоматическим устройством,

рассматриваемый при постоянном значении нагрузки на валу ЭД (сопротивления движению автомобиля). [8]

### **Автоматизированные электроприводы управления положением**

При автоматизации механизмов, основным рабочим движением которых является угловое или линейное перемещение исполнительного органа и его остановка в требуемых положениях, широкое распространение получил позиционный электропривод с системами управления положением.

Независимо от способа управления электропривод обеспечивает дискретное или непрерывное задание позиции или значения перемещения; контроль перемещения в позиции, определяемый требуемой точностью останова исполнительного органа и производительностью рабочей машины, зависящей от скорости перемещения в заданную позицию; точный останов в заданной позиции.

При дискретном позиционировании задается определенное конечное положение движения исполнительного органа. Контроль этого положения осуществляют дискретные датчики положения – контактные и бесконтактные конечные или путевые выключатели с погрешностью срабатывания 1– 0,01 мм. В этом случае обычно используются разомкнутые системы управления электроприводом, обеспечивающие остановку электродвигателя в заданной позиции с наложением механического тормоза. Такой вид управления применяется при невысокой точности позиционирования с редко переналаживаемым циклом перемещений.

При непрерывном управлении положением контроль положения исполнительного органа производится непрерывно в течение всего перемещения до остановки в заданном положении. С этой целью используют непрерывные аналоговые или цифровые датчики перемещения, характеризующиеся высокой точностью (до 0,001 мм). В этом случае применяют замкнутые системы электропривода. Такой вид управления целесообразен в системах позиционирования высокой точности с часто переналаживаемым циклом перемещений. Точные системы позиционирования строятся по принципам подчиненного регулирования с двигателями постоянного тока, причем к внутренним контурам тока и скорости добавляется аналоговый или цифровой контур положения.

В ней используется тиристорный электропривод постоянного тока с трехконтурной системой управления, построенной по принципу подчиненного регулирования скорости и тока с контурами тока, скорости и положения. Сигнал задания положения  $U_{зп}$  подается на регулятор положения  $AQ$ , на который также с датчика положения  $BQ$  подается сигнал обратной связи по положению  $U_n$ . Внутренние контуры скорости и тока выполнены как в системах стабилизации скорости. В таких системах

управления позиционного электропривода в качестве датчиков перемещения обычно используются датчики углового перемещения в виде сельсинов или поворотных трансформаторов, валы которых соединяются как с валом двигателя, так и с валом ИОРМ непосредственно или через редукторы (рисунок 3.2). Для преобразования сигнала управления переменного тока определенной фазы, идущего с сельсина или поворотного трансформатора, в сигнал управления постоянного тока определенной полярности в схеме используются фазочувствительные выпрямители (ФЧВ)  $UB$ . Задание положения обеспечивается задатчиком (сельсином-датчиком  $BC$ ), который поворачивается на требуемый заданный угол  $q_3$ , определяющий требуемое перемещение ИОРМ. Текущее положение ИОРМ контролируется датчиком положения, который называется сельсином-приемником  $BE$ . Задачей рассматриваемой системы управления является точная остановка двигателя и соответственно ИОРМ в заданном положении. Это произойдет, когда двигатель или ИОРМ отработает заданный угол  $q_3$  и угол сельсина приемника  $BE$  станет равным углу задания ( $q_{п} = q_3$ ), а рассогласование будет равно нулю.

При высоких требованиях к позиционированию применяются цифроаналоговые системы управления положением. Так как система позиционирования не предъявляет высоких требований к точности регулирования скорости и тока электропривода, то система выполняется с аналоговыми контурами тока и скорости и цифровым контуром положения. Схема содержит аналоговую часть системы в силовой части с преобразователем и двигателем и в системе управления с контурами тока и скорости с аналоговыми регуляторами  $AA$  и  $AR$  и датчиками тока и скорости  $UA$ ,  $BR$ . Регулятор положения выполнен как цифроаналоговый с аналоговой частью  $AQ$ . В цифровую часть контура положения входят арифметическое устройство (АУ)  $AW$ , цифроаналоговый преобразователь (ЦАП)  $UZV$ . Арифметическое устройство получает на вход цифровой сигнал задания положения  $N_{\theta 3}$  с цифрового устройства ввода задания  $SZ$  и цифровой сигнал  $N_{\theta п}$ , соответствующий реальному положению. Этот сигнал подается от датчика положения  $BQ$  и преобразуется в цифровой сигнал преобразователем кода  $UZ$ . Числа  $N_{\theta 3}$  и  $N_{\theta п}$  поступают в АУ в двоично-параллельном коде. АУ сравнивает  $N_{\theta 3}$  и  $N_{\theta п}$  и вырабатывает на входе числовой сигнал управления, равный разности  $\Delta N = N \Delta \theta = N_{\theta 3} - N_{\theta п}$ . Это число с помощью цифроаналогового преобразователя  $UZV$  преобразуется в аналоговый сигнал задания положения  $U_{3п}$ , поступающий на аналоговую часть РП. Остальная часть системы работает как аналоговая. [5]

## **Сферы применения электроприводов управления положением**

### **Манипулятор**

В современном оборудовании в приводах могут использоваться шаговые и серводвигатели.

Электроприводы в манипуляторе работают по следующему принципу. В результате задающего воздействия от устройства управления, на выходе регулятора по определенному закону вырабатывается управляющее воздействие, поступающее в двигатель. Двигатель превращает это воздействие (электрическую энергию) в механическую энергию, происходит вращение вала двигателя. Вал двигателя соединен одновременно с датчиком положения, который определяет угол поворота вала двигателя и подает сигнал на регулятор, и редуктором, который, непосредственно, с определенным коэффициентом редукции приводит в движение исполнительный орган. [9]

### **Карьерный экскаватор**

Двигатель с экскаваторной характеристикой подразумевает работу с номинальной частотой вращения вплоть до стопорного максимального момента, по достижении которого двигатель останавливается, но не теряет усилие на приводном валу. То есть когда, к примеру, груженный ковш упирается в неподвижный массив и усилия, развиваемого подъемной лебедкой, недостаточно для внедрения ковша, не должно происходить «опрокидывание» двигателя, т. е. падение оборотов и снижение момента на валу двигателя. Для сохранения наибольшей производительности экскаватора желательно, чтобы двигатель работал с постоянной наибольшей частотой вращения до момента начала стопорения. Это означает, что механическая характеристика должна быть жесткой, состоять из рабочего участка с минимальной линейной зависимостью частоты вращения от момента и нерабочего участка, соответствующего падению частоты вращения при максимальном моменте стопорения. К такому экскаваторному режиму наиболее близок режим работы двигателей постоянного тока.

Питание двигателей постоянного тока (главных приводов экскаватора) долгий период времени осуществлялось от генераторов постоянного тока (система Г–Д). Это достаточно надежная и простая в управлении система электропривода, она используется уже много десятилетий в приводах карьерных экскаваторов.

Индивидуальный привод основных механизмов автоматизирован. Машинист управляет только частотой вращения и проводит реверсирование двигателя в процессе копания. Остальные процессы регулирования происходят автоматически. В основу принципа автоматизации управления отдельного механизма положена специальная система автоматического регулирования (САР). Регулятором здесь выступает силовой магнитный усилитель. В САР генератор является одновременно усилительным и исполнительным элементом, двигатель – объектом регулирования, а регулируемой величиной является



частота вращения двигателя. При управлении машинист, желая установить определенную частоту двигателя, воздействует на цепь возбуждения генератора, т. е. изменяет величину тока в его обмотке возбуждения посредством командоконтроллера. Для поддержания заданного режима в САР присутствует обратная связь, обеспечивающая корректирующее воздействие на магнитные усилители и далее на ток в цепи возбуждения генератора. [10]

### Список литературы

1. Электроприводы. Термины и определения. М.Г. Юньков, Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко, Г.М. Иванов, В.И. Ключев, В.Г. Русаков, А.О. Горнов, А.Ю. Хромов, Технический комитет ТК ЗФ «Низковольтное оборудование», 2002
2. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений, М. П. Белов, В.А. Новиков, Л. Н. Рассудов. - 3-е изд., Издательский центр «Академия», 2007
3. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учебное пособие, А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016
4. Электрический привод: курс лекций, А.В. Кириллов, Д.П. Степанюк, Н.Д. Яснев, 2016 (URL: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13509/1/Kirillov\\_Stepanyuk\\_Yasenev.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13509/1/Kirillov_Stepanyuk_Yasenev.pdf))
5. Системы управления электроприводами, Ю.А. Цыба, 2007 (URL: [https://libr.aues.kz/facultet/eef/kaf\\_e\\_i\\_apu/13/umm/eiapu\\_1.htm](https://libr.aues.kz/facultet/eef/kaf_e_i_apu/13/umm/eiapu_1.htm))
6. Электропривод эскалатора (URL: <https://stud-baza.ru/elektroprivod-eskalatora-1t-4-kursovaya-rabota-promyishlennost-proizvodstvo>)
7. Электропривод лифтов (URL: <https://www.liftspas.ru/read/4/3-elektroprivod-liftov.html>)
8. Тяговый электропривод транспортного средства (URL: [https://mpei.ru/Science/AcademicWork/Documents/project\\_93.pdf](https://mpei.ru/Science/AcademicWork/Documents/project_93.pdf))
9. Адаптивный электропривод робота-манипулятора с вертикально-ангулярной кинематической схемой (URL: <https://studizba.com/files/show/doc/229186-1-adaptivnyu-elektroprivod-robota.html>)
10. Электропривод карьерного экскаватора (URL: <https://os1.ru/article/7261-elektroprivod-karernogo-ekskavatora>)