

УДК 621.313

## Принципы построения и алгоритмы регулирования управляемых приводов автоматизированных систем

Лисицын Ф.П., Астапов В.Н.

ФГБОУ ВО Самарский Государственный технический университет

Самара, Россия (443100, Самара ул. Молодогвардейская, 244),

e-mail: [feddor86@yandex.ru](mailto:feddor86@yandex.ru), [asta-2009@mail.ru](mailto:asta-2009@mail.ru)

### Аннотация

Рассмотрены вопросы механики электропривода переменного и постоянного тока, описаны способы управления асинхронным электродвигателем. Раскрываются некоторые особенности автоматизированного управления электроприводом переменного тока. Особое внимание уделено современным и перспективным способам управления, рассмотрен способ частотного регулирования скорости в системах «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель». Также в данной статье проведен аналитический обзор принципов построения управляемых приводов автоматизированных систем и разобраны какие системы являются наиболее простыми и экономичными, а какие более сложными, но наиболее действенными.

**Ключевые слова:** Автоматизация, электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, алгоритм

### Annotation

Questions of the mechanics of AC and DC electric drives are considered, methods of controlling an asynchronous electric motor are described. Some features of the automated control of the AC electric drive are revealed. Particular attention is paid to modern and promising methods of control, the method of frequency control of speed in the systems "frequency converter - asynchronous electric motor" is considered. Also in this article, an analytical review of the principles of building-controlled drives of automated systems is carried out and which systems are the simplest and most economical, and which are more complex, but the most effective.

**Keywords:** Automation, DC drive, AC drive, algorithm

### Введение

Под управлением электропривода понимается не только пуск, торможение, реверс, но и регулирование скорости вращения в соответствии с требованиями технологического процесса. Используют в основном электрические методы регулирования скорости, которые осуществляются воздействием на параметры электрической цепи двигателя или на параметры источников питания. [1]

Требования высокой точности регулирования и высокого быстродействия, которые предъявляются к современному электроприводу, обуславливают применение замкнутых систем. Только замкнутые системы позволяют осуществить реализацию в электроприводе двух основных принципов: [2]

1. Регулируемая величина на выходе электропривода (скорость, угол, момент и т.д.) должна по возможности точнее повторять задающий (входной) сигнал.

2. Регулируемая величина на выходе электропривода по возможности не должна зависеть от возмущающих воздействий на электропривод. Такими возмущающими воздействиями могут быть напряжение питания, температура, момент нагрузки, временные зависимости параметров и т. д. [2]

Энергетическую основу производства составляет электрический привод, технический уровень которого определяет эффективность функционирования технологического оборудования. Развитие электрического привода идет по пути повышения экономичности и надежности за счет дальнейшего совершенствования двигателей, аппаратов, преобразователей, аналоговых и цифровых средств управления. [3] Регулируемые приводы применяются в металлообрабатывающей, горной промышленности, в машиностроении, в сельском хозяйстве и других отраслях хозяйственной деятельности. [4]

Таким образом, тема работы является актуальной и представляет интерес для специалистов в области управления и регулирования технологическими процессами и объектами.

Цель данной работы – провести аналитический обзор принципов построения и алгоритмов регулирования управляемых приводов автоматизированных систем.

В статье проведен анализ принципов построения систем управления электроприводами и методов регулирования электроприводов

## **1 Принципы построения систем управления электроприводами**

Рассмотрим принципы построения систем управления электроприводами на примерах станков с ЧПУ и управления электроприводами манипуляторов, как наиболее сложных систем управления.

В станках с ЧПУ функции, выполняемые электроприводом главного движения, довольно сложные. Кроме стабилизации частоты вращения, при силовых режимах резания требуется обеспечение режимов позиционирования шпинделя при автоматической смене инструмента и производстве легких долбежных и строгальных работ, а также возможность нарезания резьбы метчиками и резцами. Это ведет к увеличению диапазона регулирования частоты вращения. Так, при требуемой точности позиционирования шпинделя 0,1% и максимальной частоте вращения двигателя 3000...5000 мин<sup>-1</sup> суммарный диапазон изменения частоты вращения должен быть не менее 10 000:1.

На скоростях ниже номинальных регулирование осуществляется с постоянным моментом.

Стабильность работы привода характеризуется изменением частоты вращения при изменении нагрузки, напряжения питающей сети, температуры окружающей среды и т.п.

Погрешность регулирования определяется суммированием следующих отклонений: частоты вращения при изменении тока нагрузки на  $0,4I_{ном}$  по сравнению со значением  $0,6I_{ном}$  при номинальном напряжении питания и постоянной температуре окружающей среды ( $20 \pm 5$ )°С; частоты вращения при изменении температуры окружающей среды от 20°С до 45°С при питании номинальным напряжением при номинальной нагрузке; частоты вращения при изменении напряжения питания на 10% от номинального напряжения при холостом ходе и постоянной температуре.

Отличительной особенностью главного привода для высокоавтоматизированных станков с ЧПУ является необходимость применения реверсивного привода даже в тех случаях, когда по технологии обработки реверс не требуется.

В электроприводах подач распространены такие передачи, как «винт-гайка» и «шестерня-рейка». Применяются высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, рассчитанные на установку на ходовой винт, снижающий его момент инерции и повышающий КПД.

Электроприводы вспомогательных движений, как правило, не требуют регулирования скорости и осуществляются от асинхронных двигателей (АД) с передающими устройствами и без них.

## 1 Управление скоростью двигателей постоянного тока

Работу двигателя постоянного тока, можно выразить через формулу

$$\omega = (U - IR)/k\Phi$$

где  $\omega$  - скорость вращения;  $U$  – напряжение питания;  $I$  – ток якоря;  $R$  – сопротивление якоря;  $\Phi$  – магнитный поток,  $k$  – конструктивный коэффициент.

Из формулы электромеханической характеристики двигателя постоянного тока следует, что для него возможны два способа регулирования скорости вращения:

### 3.1. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока изменением тока в цепи якоря;

Данное регулирование находит широкое применение из-за своей простоты и экономичности. Оно осуществляется только вверх от основной скорости, так как магнитный поток можно только уменьшать. Допустимый момент при регулировании изменяется по гиперболе, мощность остается постоянной. [5] Скоростные характеристики имеют различные скорости идеального холостого хода, что видно также из уравнения скоростной характеристики. С изменением магнитного потока  $\omega_0$  возрастает, принимая значения  $\omega'_0$ ,  $\omega''_0$ . Жесткость скоростных характеристик уменьшается, наклон к оси абсцисс увеличивается. Механические характеристики имеют те же скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ ,  $\omega'_0$ ,  $\omega''_0$ , что и скоростные. Однако критический момент у них различный,  $M_k = kI_k$ . Верхний предел

скорости при таком регулировании ограничен условиями коммутации и механической прочностью якоря. Нижний предел ограничен магнитным насыщением машин. [5] Данный метод регулирования является экономичным, так как это приводит к незначительным потерям.

3.2. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока изменением питающего напряжения якоря при неизменном токе обмотки возбуждения статора.

Данное регулирование обеспечивает изменение  $\omega$  пропорционально изменению  $U$  при неизменном угле наклона механических характеристик. Механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением также смещаются в область меньших или больших частот вращения и располагаются параллельно.

Для регулирования частоты вращения двигателя указанным способом он должен быть подключен к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением: к генератору с независимым возбуждением системы Г-Д, или управляемому выпрямителю. Обмотка возбуждения двигателя в этом случае должна питаться от источника, напряжение которого не изменяется, например, от дополнительного генератора или выпрямителя. Несмотря на то, что рассмотренный способ регулирования требует довольно сложного оборудования, его широко применяют в современных мощных электроприводах, так как он обеспечивает плавное и экономичное регулирование частоты вращения в очень широких пределах. Пуск двигателя при этом происходит без потерь энергии, так как нет пускового реостата.

## 2 Двигатели переменного тока. Синхронные и асинхронные

Синхронная скорость вращения магнитного поля статора определяется формулой

$$\omega_0 = (2\pi f_1)/z_p$$

где  $\omega_0$  – синхронная скорость вращения;  $f_1$  – частота переменного тока;  $z_p$  – количество пар полюсов.

Из данной формулы можно вывести два способа регулирования скорости вращения асинхронного двигателя – переключением числа пар полюсов и регулированием частоты напряжения. Способ переключения пар полюсов, в настоящее время практически не применяется, так как двигатели с дополнительными обмотками имеют большие габариты и их надежность не высока. В настоящее время широкое применение нашел способ регулирования скорости вращения двигателя за счет изменения частоты напряжения.

Наиболее совершенным является частотный способ регулирования скорости асинхронных электродвигателей, обеспечивающий возможность регулирования «вверх» и «вниз», жесткие механические характеристики при любой скорости, широкий диапазон регулирования. Регулирование частоты питающей сети осуществляют специальными

источниками переменного тока - статическими преобразователями частоты. В качестве источника напряжения с регулируемой частотой применяют частотные преобразователи со звеном постоянного тока и, реже, непосредственного (прямого) преобразования, которые регулируют частоту от 0 до 100 Гц. Преобразователи со звеном постоянного тока (ПЧ) состоят из звена постоянного тока (регулируемый или нерегулируемый выпрямитель) и инвертора напряжения или тока. [5]

Существует два типа инверторов: однофазные и трёхфазные. Ключи инверторов делают на незапираемых и запираемых тиристорах и на биполярных, полевых и IGBT транзисторах. Трёхфазные инверторы на не запираемых тиристорах имеют векторное управление и поэтому формируют выходное напряжение ступенчатой формы, амплитуда которого изменяется через  $\pi/3$ , что требует установки перед двигателем специального фильтра, искажающего форму напряжения сети. Современные инверторы на транзисторах позволяют использовать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) с частотой 0,3-15кГц, что обеспечивает получение на выходе синусоидального напряжения с пульсацией в десятки мВт из чего следует, что не требуются фильтры, искажающие форму напряжения сети. В зависимости от мощности ПЧ питаются от однофазной и трёхфазной сети.

Такой способ регулирования скорости АД является преобладающим. Это обуславливается в основном тремя факторами:

- Развитием теории машин переменного тока, что дало возможность найти оптимальные с некоторых позиций законы управления АД;
- Развитием промышленной электроники, что позволило в полной мере реализовать данные законы в «железе»;
- Развитием вычислительной техники, приведшей к возможности создания сложных программных продуктов для управления объектами в реальном времени.

Существуют системы скалярного, векторного и прямого управления моментом. Выбор способа и принципа управления определяется совокупностью статических, динамических и энергетических требований к асинхронному электроприводу.

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода основан на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитного потока, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Этот принцип является наиболее распространенным в связи с тем, что ему свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных АД. Принцип векторного управления связан как с изменением частоты и текущих значений переменных АД, так и с взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат. Благодаря контролю положения углов переменных, такой способ обеспечивает полное управление АД как в статических, так

и в динамических режимах, что дает заметное улучшение качества переходных процессов по сравнению со скалярным управлением.

Частотное регулирование с использованием оптимальных законов управления обеспечивает плавное регулирование скорости, высокую экономичность способа, высокий диапазон регулирования скорости.

В настоящее время получили свое развитие регулируемые электроприводы с управляемым преобразователем и системами управления, что способствует автоматизации технологических процессов, повышению производительности машин.

В качестве примера рассмотрим одну из самых распространенных схем частотных преобразователей: двухзвенный преобразователь частоты.

Преобразователь частоты состоит из двух основных частей: силовой и управляющей. Управляемый выпрямитель строится на тиристорах, неуправляемый – на диодах. Недостатком последнего является невозможность возврата энергии в сеть, что снижает КПД привода в целом. Для устранения этого недостатка используют дополнительные схемные решения, выполняемые в виде отдельных модулей.

Двухзвенные преобразователи частоты в зависимости от регулируемой выходной величины подразделяют на ПЧ с автономными инверторами напряжения (АИН) и тока (АИТ). Достоинствами ПЧ с АИН является независимость выходного напряжения от величины нагрузки и возможность работать в разомкнутой системе, что позволяет производить наладку преобразователей до подключения двигателей.

Основными преимуществами ПЧ с АИТ являются простота схем силовых цепей и системы управления при хороших статических и динамических характеристиках, а также более низкая стоимость. Из-за сильной зависимости выходного напряжения АИТ от величины нагрузки их используют только для питания одиночных двигателей с замкнутой системой автоматического регулирования выходного тока. Эта система позволяет ограничить напряжение преобразователя при переходе в режим холостого хода. ПЧ с АИТ применяются для реверсивных электроприводов переменного тока, работающих в интенсивных пуско-тормозных режимах.

Достоинствами двухзвенных преобразователей являются возможность получения любых скоростей вращения двигателя, в т.ч. превышающих номинальную.

От указанных недостатков практически полностью свободны преобразователи частоты с импульсным регулированием выходного напряжения, в которых функции формирования основной частоты и амплитуды первой гармоники возлагаются на АИН. Наиболее распространенным методом импульсного регулирования в настоящее время является

широкоимпульсная модуляция (ШИМ). Преобразователи частоты с ШИМ обеспечивают широкий диапазон регулирования скорости двигателя.

### **Заключение**

В данной статье проведен аналитический обзор принципов построения и алгоритмы регулирования управляемых приводов автоматизированных систем. Одни системы являются наиболее простыми и экономичными, другие более сложными, но наиболее действенными. Одной из наиболее оптимальных систем для использования является система электропривода с преобразователем частоты. Одним из основных достоинств данной системы является её универсальность, поскольку возможно её применение, как с асинхронными, так и с синхронными электродвигателями.

### **Список литературы:**

1. Автоматизированный привод. [электронный ресурс.] URL: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/3686/Avtomatizirovannyj\\_ehlektroprivod.pdf;jsessionid=9E93A03D6FD2A401BBC775A6B58092F3?sequence=7](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/3686/Avtomatizirovannyj_ehlektroprivod.pdf;jsessionid=9E93A03D6FD2A401BBC775A6B58092F3?sequence=7) (дата обращения 28.10.22)
2. Принципы построения замкнутых систем регулирования электропривода. [электронный ресурс] URL: [https://studbooks.net/1978223/matematika\\_himiya\\_fizika/printsiipy\\_postroeniya\\_zamknutyh\\_sistem\\_regulirovaniya\\_elektroprivoda](https://studbooks.net/1978223/matematika_himiya_fizika/printsiipy_postroeniya_zamknutyh_sistem_regulirovaniya_elektroprivoda) (дата обращения 04.10.22)
3. Современный тенденции развития в системах управляемых автоматизированных электроприводов. [электронный ресурс.] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-v-sistemah-upravlyaemyh-avtomatizirovannyh-elektroprivodov/viewer> (дата обращения 02.10.22)
4. Основные показатели регулирования скорости. [электронный ресурс.] URL: <https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/elektrooborudovanie-i-avtomatizaciya-selskohozyaystvennyh-agregatov-15.html> (дата обращения 04.10.22)
5. Регулирование скорости электроприводов. [электронный ресурс.] URL: <https://studfile.net/preview/9986977/page:2/> (дата обращения 28.10.22)