

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

**Методические указания
по выполнению курсовой работы для студентов
специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и
производств»**

ВИТЕБСК
2026

УДК 621.3.07

Составители:

Куксевич В. Ф., Леонов В. В.

Одобрено кафедрой «Автоматизация производственных процессов»
УО «ВГТУ» протокол № 8 от 26.03.2026.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 29.05.2026.

Автоматизированный электропривод : методические указания по выполнению курсовой работы / сост. В. Ф. Куксевич, В. В. Леонов, – Витебск : УО «ВГТУ», 2026. – 32 с.

Методические указания являются руководством по выполнению курсовой работы дисциплины «Автоматизированный электропривод» для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и содержат цели, структуру, правила оформления курсовой работы, описание последовательности проектирования автоматизированного электропривода, разработки его электрических схем и выбора составляющих их элементов.

УДК 621.3.07

© УО «ВГТУ», 2026

Содержание

Введение	4
1. Цели, структура и правила оформления курсовой работы	4
2. Последовательность проектирования автоматизированного электропривода	6
3. Выбор рода тока и типа электропривода	7
4. Определение мощности электродвигателя	8
5. Разработка электрической функциональной схемы электропривода	11
6. Выбор и проектирование элементов силового канала электропривода	12
7. Формирование статических характеристик электропривода	21
8. Разработка эквивалентной структурной схемы электропривода и определение передаточных функций элементов	24
9. Анализ динамики электропривода	26
10. Разработка принципиальной электрической схемы электропривода	29
Литература	31

Введение

Энергетическую основу современного производства составляет автоматизированный электрический привод, технический уровень которого определяет эффективность функционирования технологического оборудования. Развитие электропривода идет по пути повышения экономичности и надежности за счет совершенствования двигателей, аппаратов, преобразователей, аналоговых и цифровых средств управления, позволяющих существенно расширить его функциональные возможности и улучшить технико-экономические характеристики.

Расширение и усложнение выполняемых автоматизированным электроприводом функций, применение в нем новых средств управления требуют высокого уровня подготовки специалистов, занятых его проектированием, монтажом, наладкой и эксплуатацией. Они должны хорошо знать назначение и элементарную базу отдельных узлов электропривода, определять его экономические показатели и уметь выбирать его элементы.

1. Цели, структура и правила оформления курсовой работы

Учебной программой дисциплины «Автоматизированный электропривод» для специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» предусмотрено курсовое проектирование, целями которого являются:

- 1) закрепление и углубление теоретических знаний по дисциплине;
- 2) освоение этапов и принципов проектирования автоматизированных электроприводов;
- 3) приобретение навыков в разработке систем электропривода.

Для выполнения этих задач в курсовой работе в качестве объекта проектирования выбирается система регулируемого или следящего электропривода с различными требованиями к мощности, диапазону и точности регулирования, динамическим показателям.

В ходе выполнения курсовой работы студент должен:

- 1) провести анализ технического задания на проектируемый электропривод;
- 2) учитывая диапазон и точность регулирования, определиться с видом структуры системы регулируемого электропривода;
- 3) провести расчет и выбор элементов силовой цепи;
- 4) рассчитать параметры элементов системы управления, обеспечивающих необходимые показатели работы электропривода в статике;
- 5) обеспечить формирование переходных режимов с заданными показателями качества;

б) разработать принципиальную электрическую схему проектируемого электропривода.

Состав курсовой работы: расчетно-пояснительная записка (РПЗ) объемом 35–40 страниц и указанное в листе задания на курсовое проектирование количество листов формата А3 со схемами и графиками.

При выполнении и оформлении РПЗ следует:

- использовать листы бумаги стандартных форматов;
- при расчетах пользоваться международной системой единиц СИ;
- решения сопровождать краткими пояснениями;
- формулы приводить сначала в общем виде, затем подставлять числовые значения;
- при наличии значительных однотипных вычислений привести расчет одного из них в качестве примера, результаты однотипных вычислений внести в таблицу;
- схемы и графики выполнять, используя стандартные графические обозначения элементов схем и стандартные буквенные обозначения величин;
- графические объекты пронумеровать и снабдить подрисовочными подписями;
- графики и диаграммы выполнить в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат. При определении показателей качества регулирования по графику переходного процесса, выполнить на графике все необходимые для расчета графические построения;
- данные об элементах и устройствах, изображенных на схемах, занести в перечень элементов, выполнив его в виде таблицы на листе формата А4 и оформив как приложение к РПЗ;
- список использованных литературных источников должен содержать библиографическое описание всех источников, использованных при проектировании.

Если преподавателем будет предложено переделать какой-либо раздел работы, то в этом случае исправления вносятся в текст при помощи корректирующих материалов, с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое.

Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью. Все листы (и замененные, и подлежащие замене) обязательно ввести в состав исправленной РПЗ. Замечания преподавателя не разрешается ни стирать, ни заклеивать.

Готовая курсовая работа сдается руководителю не менее, чем за неделю до защиты. Решение об оценке принимается с учетом степени выполнения поставленных при проектировании задач, логичности построения и качества оформления РПЗ, самостоятельности и инициативности студента, уровня защиты.

2. Последовательность проектирования автоматизированного электропривода

Рациональное проектирование современного автоматизированного электропривода требует глубокого знакомства с условиями работы производственного механизма, для которого электропривод предназначен. Высокая производительность механизма и хорошее качество выпускаемой им продукции могут быть обеспечены лишь при надлежащем сочетании статических и динамических характеристик электропривода и рабочей машины. Кинематика и даже конструкция всей рабочей машины в целом в значительной мере определяется типом примененного электропривода. Одновременно имеет место и обратное влияние рабочей машины на электропривод. В связи с этим сложные задачи проектирования – создание новых типов комплексного электропривода для различного технологического оборудования, разработка серийных образцов установок с электроприводом и т. п. – решаются обычно специализированными организациями с участием специалистов из других областей. Отдельному инженеру, связанному с электроприводом, приходится решать более простые задачи проектирования. Обычно они имеют следующие формулировки: взамен устаревшего электропривода данной установки разработать современный, с лучшими техническими и экономическими показателями; взамен нерегулируемого электропривода агрегата применить регулируемый; разработать электропривод, которым можно заменить импортный, не обеспеченный запасными элементами; разработать электропривод какой-либо установки, изготавливаемой силами предприятия и т. п. Такие же задачи решаются обычно в курсовых и дипломных работах студентов.

Проектирование любого электропривода может вестись лишь на основе тщательно разработанного технического задания, в котором должны быть учтены все особенности производственного процесса и условия работы исполнительного механизма. В задании должны найти отражение вопросы, касающиеся характера и величины статического момента, необходимых процессов регулирования скорости, плавности регулирования, требуемого комплекса механических характеристик, условий пуска, торможения и другие.

Первоначально решается вопрос о выборе регулируемого или нерегулируемого типа электропривода. В последнем случае все последующие задачи проектирования электропривода значительно упрощаются. По сути дела, все сводится к выбору типа двигателя (обычно переменного тока), а также к выбору его мощности.

При необходимости иметь электропривод с регулируемой скоростью далее должен быть решен вопрос о выборе системы электропривода и тесно связанный с ним вопрос о роде тока. Выбор рода тока должен производиться на основе тщательного технико-экономического сопоставления вариантов

электропривода. При этом выбирается способ управления двигателем и вид силового преобразователя для питания двигателя.

К вопросу выбора тока примыкает вопрос о величине напряжения. Однако его разрешение в основном зависит от условий электроснабжения предприятия в целом.

Параллельно с выбором рода тока выявляется и наиболее рациональный тип двигателя. При этом особое внимание должно быть уделено возможности получения всего комплекса механических характеристик, необходимых для осуществления заданных режимов работы исполнительного механизма.

Следующим этапом проектирования является выбор мощности двигателя. При этом одновременно приходится решать вопрос о его конструктивных формах. При отсутствии специальных требований целесообразно использовать двигатели единых серий, так как при этом первоначальные затраты будут наименьшими. При необходимости встраивания двигателя в рабочую машину иногда приходится использовать двигатели специальных конструкций.

При выборе двигателя необходимо учитывать требования, которые предъявляют к защите от внешних воздействий, и условия размещения.

После выбора двигателя производится расчет и выбор элементов силовой цепи электропривода.

Далее решается вопрос о структуре системы автоматического управления электропривода и производится определение ее параметров: выбираются обратные связи и датчики, определяются параметры элементов, при которых обеспечиваются необходимые показатели электропривода в установившемся режиме.

Производится формирование динамических характеристик электропривода с использованием корректирующих устройств.

На заключительном этапе производится разработка принципиальной электрической схемы электропривода.

3. Выбор рода тока и типа электропривода

Электроснабжение промышленных предприятий осуществляется трехфазным током частотой 50 Гц. При необходимости получения энергии постоянного тока неизбежно приходится прибегать к преобразователям. Преобразование энергии совершенно естественно связано с дополнительными капиталовложениями и эксплуатационными расходами (потери энергии при преобразовании, обслуживание преобразователей). Таким образом, стоимость единицы энергии постоянного тока на промышленном предприятии всегда выше стоимости единицы энергии переменного тока.

Двигатели переменного тока – синхронные и, особенно, асинхронные – значительно дешевле двигателей постоянного тока и имеют меньший вес. В связи с большей простотой конструкции их обслуживание намного проще. Они

имеют меньший момент инерции и принципиально более надежны. Поэтому для работы машин, не требующих регулирования скорости, следует применять исключительно приводы переменного тока. Некоторым исключением могут быть лишь механизмы, работающие в повторно-кратковременном режиме. Работа этих механизмов связана с большим числом включений в час, с частыми пусками, реверсами и остановами. Для подобных механизмов может оказаться целесообразным применение электропривода постоянного тока.

Наиболее сложен вопрос выбора рода тока для электроприводов механизмов, требующих регулирования скорости. В ряде случаев он может быть решен лишь на основе подробного технико-экономического сопоставления нескольких вариантов электроприводов.

До последнего времени большинство регулируемых электроприводов выполнялось на постоянном токе. Регулируемые электроприводы переменного тока применялись в весьма ограниченных масштабах. Обусловлено это вполне понятными причинами – ограниченными возможностями асинхронного двигателя в отношении регулирования скорости.

Наиболее распространенным сейчас является частотный метод регулирования скорости асинхронного двигателя. Но для питания машины в этом случае требуется относительно сложный преобразователь, который должен обеспечивать регулирование не только частоты, но и напряжения, подводимого к статору электродвигателя. Последнее объясняется необходимостью регулирования магнитного потока во избежание насыщения, увеличения потерь в стали или уменьшения электромагнитного момента. Наличие двух каналов воздействия: по напряжению и частоте усложняют систему управления электродвигателем. Если принять во внимание, что сигналы переменного тока требуют еще управления фазой, а система управления трехфазная, то сложность управления увеличится еще больше. Таким образом, простота и другие достоинства асинхронного электродвигателя в известной мере уравниваются сложностью системы управления.

Однако, несмотря на значительный прирост доли электроприводов переменного тока в их общем числе, электропривод с двигателями постоянного тока, по мнению специалистов, еще долго сохранит доминирующее значение.

4. Определение мощности электродвигателя

Надежная и экономичная работа электропривода возможна только при правильном выборе мощности электродвигателя. Электродвигатель заниженной мощности может не обеспечить заданной производительности, чрезмерно нагревается, быстро изнашивается и является причиной возникновения аварий и простоев. Электродвигатель завышенной мощности работает с низким КПД, стоимость электрооборудования и эксплуатационных расходов при этом возрастает.

Одним из основных критериев правильного выбора электродвигателя является его нагрев. При этом наиболее уязвимой с точки зрения нагрева является изоляция обмоток двигателя. Для того, чтобы срок службы изоляции был порядка 15...20 лет, необходимо, чтобы максимальная температура не превышала максимально допустимых температур: для изоляции класса А – до 105 °С, класса Е – до 120 °С, класса В – 130 °С, класса F – 155 °С, класса Н – 180 °С, класса С – свыше 180 °С. Основными классами изоляции, применяемыми при изготовлении электрических двигателей, являются классы В, F и Н. Чем выше класс изоляции, тем интенсивнее использование электродвигателя по нагреву и тем меньше его размеры при той же мощности. В приближенных тепловых режимах двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводимость и одинаковую температуру во всех своих точках.

Изменение температуры электродвигателя зависит не только от его тепловых параметров, но и от его режима работы. В зависимости от влияния режима на нагрев электродвигателя различают 8 номинальных режимов работы, которые обозначаются $S1 \dots S8$.

Продолжительный номинальный режим $S1$ характеризуется неизменной нагрузкой такой продолжительности, что превышения температуры всех частей электродвигателя достигают установившихся значений. Продолжительность работы при этом: $t \geq (3 \dots 4)T_{\theta}$, где $T_{\theta} = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева электродвигателя (тепловая постоянная времени), C – теплоемкость электродвигателя – количество тепла, необходимое для повышения температуры электродвигателя на 1 °С, A – теплоотдача электродвигателя – количество тепла отдаваемого электродвигателем в окружающую среду за одну секунду при разности температур электродвигателя и окружающей среды 1 °С.

Кратковременный номинальный режим $S2$ – режим, при котором период неизменной нагрузки чередуется с периодом отключения электродвигателя. При этом период нагрузки не настолько длителен, чтобы превышение температуры могло достигнуть установившегося значения, а периоды отключения настолько длительны, что все части машины охлаждаются до температуры окружающей среды. Для режима установлены следующие стандартные длительности работы: 15, 30, 60 и 90 минут.

Повторно-кратковременный номинальный режим $S3$ – режим, при котором рабочие периоды с неизменной номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения электродвигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} = \frac{t_p}{t_n} \cdot 100 \%,$$

В качестве стандартных значений ПВ принимаются 15, 25, 40, 60 %.

Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 мин, в противном случае режим считается продолжительным.

Рассмотренные три режима являются основными и наиболее характерными для электродвигателя. При этом номинальные данные ($P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$) относятся к рабочему периоду при стандартных значениях длительности работы и ПВ. Остальные пять номинальных режимов S4...S8 являются разновидностями первых трех и встречаются гораздо реже. Проверка электродвигателя по нагреву при работе в этих режимах производится путем соответствующего перехода (с использованием метода средних потерь или эквивалентных величин) к рассмотренным трем основным номинальным режимам, так как в реальных режимах нагрузка двигателя может меняться по сложным зависимостям, а построение графика превышения температуры трудоемко и требует, кроме того, знания тепловых параметров (A , C), которые обычно в каталогах не приводятся.

При проектировании системы электропривода с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, работающем в продолжительном режиме, выбор типа электродвигателя можно произвести следующим образом.

На основании исходных данных (эквивалентный момент, создаваемый нагрузкой $M_{эkv}$; наибольшее значение частоты вращения $n_{макс}$; номинальное значение напряжения якорной цепи $U_{ян}$; номинальное значение напряжения обмотки возбуждения $U_{вн}$) определяют максимальную эквивалентную мощность двигателя:

$$P_{эkv} = \frac{2\pi n_{макс} M_{эkv}}{60}.$$

По справочным данным, исходя из условий: $P_n \geq P_{эkv}$ и $n_n \approx n$, выбирают тип электродвигателя и рассчитывают его параметры:

- номинальная скорость вращения якоря:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60},$$

- номинальный момент нагрузки:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

- номинальный ток возбуждения:

$$I_{вн} = \frac{U_{вн}}{k_t R_{\phi}},$$

где k_t – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки возбуждения при нагреве.

Номинальный ток якоря рассчитывают, используя формулу КПД:

$$\eta_H = \frac{P_H}{P_{номр}} = \frac{P_H}{U_{яH} I_{яH} + I_{вH} U_{вH}},$$

откуда

$$I_{яH} = \frac{P_H - \eta_H \cdot I_{вH} \cdot U_{вH}}{\eta_H U_{яH}}.$$

Сопротивление якорной цепи определяют по формуле:

$$R_{яц} = k_t (R_{я} + R_{дн}) + R_{щ},$$

где $R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{яH}}$ – сопротивление щеток, $R_{дн}$ – сопротивление дополнительных полюсов.

Произведение $K\Phi_H$, используемое в формулах статических характеристик электродвигателя, определяют из выражения электрохимической характеристики для номинального режима работы:

$$\omega_H = \frac{U_{яH}}{K\Phi_H} - \frac{R_{яц}}{K\Phi_H} I_{яH}.$$

Тогда

$$K\Phi_H = \frac{U_{яH} - R_{яц} I_{яH}}{\omega_H}.$$

5. Разработка электрической функциональной схемы электропривода

Электрическую функциональную схему электропривода разрабатывают на основе выбора структуры замкнутой системы электропривода. Наиболее распространены два типа схем замкнутых систем регулирования: с общим суммирующим усилителем и с подчиненным регулированием координат.

Система с общим суммирующим усилителем является системой с одним усилителем, на входы которого подается алгебраическая сумма задающего сигнала и сигналов всех обратных связей. Выходной сигнал усилителя, таким образом, зависит сразу от нескольких переменных, что делает практически невозможным регулирование одной переменной, независимо от других. Придание системе требуемых динамических свойств при таком построении обычно достигается применением корректирующих устройств, включаемых в цепь сигнала управления (последовательная коррекция) или параллельно некоторым блокам системы (параллельная коррекция). Такие системы находят применение либо из-за простоты реализации, либо в случаях, когда не предъявляются жесткие требования к качеству переходных процессов и не требуется раздельное регулирование переменных.

Система с подчиненным регулированием координат состоит из нескольких контуров, число которых равно числу регулируемых переменных, причем каждый внутренний контур регулирования подчинен следующему по порядку внешнему контуру. Эта подчиненность выражается в том, что заданное значение регулируемой величины любого внутреннего контура определяется выходным сигналом регулятора внешнего контура. Каждый контур строится по принципу регулирования по отклонению и имеет свою обратную связь и свой регулятор. Данная система характеризуется высоким качеством регулирования, так как в ней допускается раздельное регулирование переменных и коррекция переходных процессов в каждом контуре. Однако некоторое снижение качества процессов регулирования в данной системе возможно, например, при приложении возмущений и наличии в ней последовательно включенных двух и более нелинейных звеньев, каковыми являются регуляторы. При этом в системе возникают практически неустраняемые автоколебания низкой частоты и большой амплитуды, и снижается быстродействие. Поэтому в таких системах используется число последовательных контуров не более двух, реже – трех. В случаях, когда требуется большее число контуров регулирования, применяют другие структуры, например, с модальным управлением.

6. Выбор и проектирование элементов силового канала электропривода

Современные автоматизированные электроприводы выполняются в виде замкнутых систем автоматизированного управления и имеют два канала – силовой и информационный. По первому транспортируется преобразуемая в электроприводе энергия, по второму осуществляется управление, сбор и обработка сведений об электроприводе, диагностика его неисправностей.

Силовой канал состоит из двух частей – электрической и механической. Основой электрической части является электрический преобразователь, осуществляющий преобразование электрической энергии сети с параметрами

U_c и I_c в электрическую энергию с параметрами U , I , требуемую электродвигателю. Электрические преобразователи бывают неуправляемыми и управляемыми.

Управляемые преобразователи электроприводов с двигателями постоянного тока могут быть трех типов:

- электромашинными, выполненными по системе «генератор – двигатель» (система Г – Д);
- полупроводниковыми, выполненными по системе «тиристорный преобразователь – двигатель» (система ТП – Д);
- полупроводниковыми, выполненными по системе «широтно-импульсный преобразователь – двигатель» (система ШИП – Д).

Система Г – Д, несмотря на такие достоинства, как большой диапазон и плавность регулирования скорости, высокую жесткость и линейность характеристик, возможность получения всех энергетических режимов работы, в том числе и рекуперативного торможения, в настоящее время из-за недостатков: утроенная мощность установки, низкий КПД, инерционность процесса регулирования, шум при работе, в стационарных установках не применяется. Она может быть использована в мобильных установках, например в экскаваторах.

Преобразователи системы ТП – Д строятся на тиристорах и преобразуют синусоидальное переменное напряжение в регулируемое постоянное напряжение. Регулирование выпрямленного напряжения в таких преобразователях осуществляется фазовым способом. Он основан на управлении моментом отпирания тириستоров, включенных между источником переменного напряжения и нагрузкой, относительно момента их естественного отпирания. Подавая управляющие импульсы на тиристоры с запаздыванием, уменьшают среднее значение выпрямленного напряжения.

К достоинствам системы ТП – Д относят плавность, быстродействие, значительный диапазон регулирования, большую жесткость характеристик, высокий КПД, бесшумность в работе, простоту в эксплуатации. Несмотря на недостатки: пульсации выпрямленного напряжения, наличие режима прерывистых токов, снижение коэффициента мощности с ростом диапазона регулирования, данная система достаточно распространена в современных автоматизированных электроприводах.

Также в современных автоматизированных электроприводах нашли применение силовые преобразователи на основе полупроводниковых систем ШИП – Д, выполненных на базе IGBT-транзисторов.

Существует большое число различных схем управляемых преобразователей: однополупериодные и двухполупериодные, с различным числом фаз, полностью управляемые и полууправляемые.

При выборе в качестве электрического преобразователя системы ТП – Д предпочтительнее использовать трехфазную мостовую, полностью управляемую схему выпрямления. В отличие от других схем эта схема имеет наименьшую амплитуду и наибольшую частоту пульсаций, в ней отсутствует

подмагничивание сердечника трансформатора постоянной составляющей тока. Однако для управления тиристорами необходима дополнительная схема управления.

Расчет параметров тиристорного преобразователя, работающего в промышленной сети с линейным напряжением U_1 и фазным напряжением $U_{1\phi}$, проводят следующим образом.

1. Рассчитывают параметры трансформатора. Из формулы ЭДС тиристорного преобразователя при полностью открытых тиристорах

$$E_{d0} = U_{ян} = U_{1\phi} = E_m \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) = \sqrt{2}E_2 \frac{m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)$$

находят действующее значение линейной ЭДС вторичной обмотки трансформатора:

$$E_2 = \frac{E_{d0}\pi}{\sqrt{2}m \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}.$$

Рассчитывают уточненное действующее значение линейной ЭДС вторичной обмотки трансформатора:

$$E_{2y} = K_{uc}K_{u\alpha}K_{um}E_2,$$

где $K_{uc} = 1,05...1,1$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможность понижения напряжения в сети; $K_{u\alpha} = 1,05...1,2$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий неполное открытие вентилей при максимальном сигнале управления; $K_{um} = 1...1,05$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий падение напряжения в тиристорах и обмотках трансформатора.

Определяют коэффициент трансформации:

$$K_{mp} = \frac{U_1}{E_{2y}}.$$

Находят фазное напряжение на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_{2\phi} = \frac{E_{2y}}{\sqrt{3}}.$$

Находят действующее значение фазного тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{\text{ян}}.$$

Действующее значение фазного тока первичной обмотки трансформатора равно:

$$I_1 = \frac{I_2}{K_{\text{тр}}}.$$

Определяют типовую мощность трансформатора:

$$S_T = 3U_{2\phi} I_2.$$

В зависимости от рассчитанных значений S_T , U_1 , E_{2y} по справочным данным выбирают соответствующий трехфазный двухобмоточный трансформатор.

Проводят расчет основных параметров обмоток выбранного трансформатора.

Рассчитывают активное сопротивление фазы трансформатора. При наличии в справочных данных значения мощности короткого замыкания ΔP_K , значение R_T рассчитывается:

$$R_T = \frac{\Delta P_K}{3I_2^2}.$$

В случае отсутствия в справочной литературе значения ΔP_K задаются значением активной составляющей падения напряжения на трансформаторе $U_a = (0,015 \dots 0,025) U_{2\phi}$.

Тогда

$$R_T = \frac{U_a}{I_{2н}}.$$

Рассчитывают индуктивность фазы трансформатора.

При наличии в справочных данных значения напряжения короткого замыкания U_K , рассчитывают значение реактивной составляющей падения напряжения на трансформаторе $U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2}$.

В случае отсутствия в справочной литературе значения U_K задаются значением $U_K = 5 \dots 7\%$.

Рассчитывают индуктивное сопротивление фазы трансформатора X_T :

$$X_T = \frac{U_p}{I_{2н}},$$

и индуктивность обмоток трансформатора:

$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f_c}.$$

2. Рассчитывают параметры сглаживающего реактора.

Для снижения амплитуды пульсаций выпрямленного тока, уменьшения зоны прерывистых токов, ограничения скорости нарастания тока и величины тока при аварийных режимах работы в схемах автоматизированного электропривода используют сглаживающие реакторы.

Сглаживающий реактор включается последовательно с якорем двигателя, и его индуктивность выбирается исходя из двух условий:

- 1) сглаживание пульсаций выпрямленного тока до требуемой величины, обеспечивающей удовлетворительную коммутацию двигателя;
- 2) обеспечение непрерывного выпрямленного тока при минимальной нагрузке на валу двигателя.

Критическая индуктивность, обеспечивающая выполнение первого условия:

$$L_{кр1} = \frac{100 E_{d(1)m}}{\sqrt{2} a_\phi k \omega_0 I_{ян} P_{(1)}},$$

где $E_{d(1)m} = \left(\frac{E_{d(1)m}}{E_{d0}} \right) E_{d0}$, – амплитуда основной гармоники выпрямленной ЭДС; $\frac{E_{d(1)m}}{E_{d0}}$ – относительное значение амплитуды основной гармоники выпрямленной ЭДС в функции угла регулирования (для трехфазного мостового реверсивного электропривода $\frac{E_{d(1)m}}{E_{d0}} = 0,27$); k – число фаз питающего напряжения; ω_0 – угловая частота напряжения сети; $P_{(1)}$, – допустимое значение мощности основной гармоники переменной составляющей выпрямленного тока (обычно $P_{(1)} = 2...15\%$, меньшее значение берется для двигателей большей мощности, для которых условия коммутации более сложные); a_ϕ – коэффициент, зависящий от схемы выпрямления.

Для ликвидации режима прерывистого тока на холостом ходу двигателя необходимо обеспечить превышение тока холостого хода двигателя над гранично-непрерывным значением тока преобразователя. Критическая

индуктивность, обеспечивающая выполнение второго условия, находится по уравнению:

$$L_{кр2} = \frac{E_{d0} \sin \alpha_{xx}}{314 I_{xx}} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right),$$

где $\alpha_{xx} = \arccos \left(\frac{(K\Phi_n) \omega_{min} + I_{xx} R_k + a_6 \Delta U_{m.c.p.}}{E_{d0}} \right)$ – угол

регулирования, при котором двигатель работает с током I_{xx} и угловой скоростью ω_{min} :

$$I_{xx} = I_{ян}(1 - \eta_n) - \text{ток холостого хода двигателя,}$$

$$\omega_{min} = \frac{\pi(0,05...0,15)n_n}{30} - \text{минимальная требуемая угловая скорость}$$

двигателя,

$$R_k = \frac{X_{Tm}}{2\pi} - \text{коммутационное сопротивление преобразователя,}$$

$$\Delta U_{m.c.p.} = \frac{U_0 + R_{дин} I_{ян}}{3} - \text{среднее значение падения напряжения на}$$

тиристорах,

$U_0 = 1,35...1,55 B$ – напряжение спрямления, снятое на постоянном токе вольт-амперной характеристики,

$$R_{дин} = \frac{0,2 \div 0,3}{I_{m.n.}} - \text{динамическое сопротивление тиристора,}$$

$$I_{m.n.} = \frac{I_{ян}}{3} - \text{номинальный ток тиристора.}$$

Из двух полученных значений критической индуктивности $L_{кр}$ выбирают большее значение и рассчитывают индуктивность сглаживающего реактора:

$$L_{с.р.} = L_{кр} - L_{я} - a_6 L_{тр},$$

В зависимости от расчетных значений $I_{ян}$ и $L_{с.р.}$ по справочным данным выбирают сглаживающий реактор.

Если расчетное значение индуктивности сглаживающего реактора $L_{с.р.}$ получилось отрицательным, сглаживающий реактор не требуется и собственной индуктивности якорной цепи достаточно для ограничения пульсаций тока.

3. Рассчитывают параметры тиристоров. Максимальное обратное напряжение на тиристоре

$$U_{обр.max} = K_{исmax} \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\phi},$$

где $K_{ис\max} = 1,2 \div 1,25$ – коэффициент запаса, учитывающий повышение напряжения сети.

Находят среднее значение тока, протекающего через тиристор:

$$I_{cp} = \frac{I_{ян}}{3}.$$

Определяют максимально допустимый средний ток тиристора:

$$I_{cp\ m} = \frac{I_{cp}}{K_{\lambda} K_f K_t K_v},$$

где K_{λ} – коэффициент, учитывающий отличие угла проводимости от 180^0 и отличие формы тока от синусоидальной. Принимают $K_{\lambda} = 0,8$; K_f – коэффициент, учитывающий влияние частоты сети (при частоте $f = 50 \text{ Гц}$ принимают $K_f = 1$); K_t – коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды (при температуре $t < 40^0\text{C}$ принимают $K_t = 1$); K_v – коэффициент, учитывающий скорость охлаждающего воздуха (при номинальной скорости принимают $K_v = 1$, при отсутствии обдува K_v снижается до $0,25 \dots 0,4$).

В зависимости от рассчитанных значений по справочным данным выбирают требуемый тип тиристоров.

4. Рассчитывают параметры элементов защиты тиристорного преобразователя.

В тиристорных преобразователях могут возникнуть аварийные режимы, сопровождающиеся недопустимыми по значению и длительности токами через тиристоры, например, короткие замыкания, опрокидывание инвертора, появление чрезмерных уравнивающих токов, отпирание тиристоров в неработающей группе.

Расчёт токов короткого замыкания ведётся в предположении, что угол регулирования тиристорного преобразователя $\alpha = 0^0$, когда токи короткого замыкания максимальны.

Вначале находится амплитуда базового тока короткого замыкания:

$$I_{кз\ m} = \frac{\sqrt{2}U_{2\phi}}{\sqrt{X_T^2 + R_T^2}}.$$

Далее определяют:

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = \frac{R_T}{X_T}.$$

Мгновенное значение тока внутреннего короткого замыкания $i_{кз}$ находится из данных таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Данные для расчета тока внутреннего короткого замыкания

$\operatorname{ctg} \varphi_k$	0	0,04	0,07	0,12	0,2	0,33	1
$\frac{i_{кз}}{I_{кз\text{ м}}}$	1,72	1,62	1,53	1,44	1,3	1,2	0,92

Рассчитывают интеграл плавления плавкой вставки, определяющий количество энергии, необходимое для расплавления плавкой вставки.

$$W_{np} = \frac{W_g}{k_3},$$

где $k_3 = 1,2 \div 1,5$ – коэффициент запаса; $W_g = I_{ав}^2 t_{имп}$ – максимально допустимое значение интеграла квадрата аварийного тока вентиля при длительности импульса тока 10 мс.

$I_{ав} = i_{кз}$ – аварийный ток;

$t_{имп} = 10 \text{ мс}$ – длительность аварийного тока.

Номинальный ток плавления плавкой вставки предохранителя определяют из условия:

$$I_{пл\text{ ном}} \geq k_3 I_{ср\text{ м}}.$$

По значению W_{np} из справочных данных выбирают предохранитель, номинальный ток плавления которого должен быть не менее $I_{пл\text{ ном}}$. В случае отсутствия в справочной литературе значений W_{np} выбор предохранителя ограничивают значением $I_{пл\text{ ном}}$.

Плавкие предохранители используются только для защиты от токов короткого замыкания и не могут быть использованы для защиты от перегрузок, поэтому необходима установка дополнительного защитного аппарата.

Таким оборудованием могут быть автоматические выключатели, уступающие по быстродействию плавким предохранителям, а поэтому используемые как резервные средства защиты, обеспечивающие отключение преобразователя при отказе основных средств защиты и перегрузках.

Автоматический выключатель выбирается по номинальным параметрам силовой части преобразователя (току и напряжению) с учетом его коммутационной способности.

Вначале определяют действующее значение установившегося тока короткого замыкания:

$$I_{1кз} = \frac{100I_1}{u_k(\%)}$$

Ток уставки расцепителя в зоне короткого замыкания автоматического выключателя определяется из условия:

$$I_{укз} < I_{1кз}.$$

Ток уставки расцепителя в зоне перегрузки:

$$I_{упер} = (1,2 \div 1,3)I_{1ф},$$

где $I_{1ф} = \frac{K_{i\phi} K_{i3} K_i}{K_{тр}} I_{ян}$ – фазный ток первичной обмотки трансформатора;

$K_{i\phi}$ – коэффициент тока, зависящий от схемы выпрямителя, значение которого приведено (для трехфазной мостовой схемы $K_{i\phi} = 0,82$); K_{i3} – коэффициент запаса по току, учитывающий возможную перегрузку преобразователя. В зависимости от характера нагрузки $K_{i3} = 1,05 \div 2,5$; K_i – коэффициент, учитывающий отклонение формы анодного тока тиристора от прямоугольной (принимают $K_i = 1,05 \div 1,1$).

В зависимости от рассчитанных значений по справочным данным выбирают требуемый тип автоматического выключателя.

Для защиты тириستоров от перенапряжений, которые могут появляться как при периодической коммутации вентилей, возникающей при каждом переходе тока с одного вентиля на другой, так и от коммутаций во внешних цепях, в преобразователях используют RC-цепи.

С целью ограничения сетевых перенапряжений, возникающих при включении и отключении трансформатора, используют конденсаторы, подключаемые для снижения тока через соответствующие резисторы. Как правило, емкости, равной 1 мкФ , достаточно для демпфирования всех высокочастотных переходных процессов, возникающих в сети, и схемных перенапряжений до уровня, меньшего одной десятой их первоначального значения. Сопротивление и мощность резисторов выбирают из соотношений:

$$\sqrt{\frac{L_T}{C}} < R < 2\sqrt{\frac{L_T}{C}},$$

$$P_R = 450CU_{2\phi}^2.$$

После определения значений емкостей конденсаторов, сопротивлений и мощностей резисторов, расчетные параметры приводят к рядам номинальных значений элементов и производят их выбор по справочным данным.

7. Формирование статических характеристик электропривода

В зависимости от выбранной структуры системы автоматизированного электропривода выбираются обратные связи и определяются их коэффициенты. В электроприводе с общим суммирующим усилителем определяется необходимый коэффициент усиления, исходя из требуемых значений статизма электромеханических характеристик. В электроприводе с подчиненным регулированием координат выбираются регуляторы, исходя из требований динамических режимов, и определяются их настройки.

При формировании статических электромеханических характеристик электропривода решается вопрос о формировании участков характеристик при стабилизации скорости и стабилизации момента (тока). Для участков стабилизации скорости определяются значения задающих напряжений, обеспечивающих электромеханические характеристики в заданном диапазоне регулирования скорости. На участках стабилизации момента (тока) определяются значения напряжений узлов ограничения.

Так при использовании в системе электропривода обратной связи по скорости уравнение электромеханической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{E_n}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц} + R_n}{K\Phi_n} \cdot I_{я} = K_n \cdot K_{\partial} \cdot U_{yn} - K_{\partial} \cdot R \cdot I_{я},$$

где $R = R_{яц} + 2R_T + R_K$ – сопротивление силового преобразователя, K_{∂} – коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию:

$K_{\partial} = \frac{1}{K\Phi_n}$, K_n – коэффициент передачи силового преобразователя: $K_n = \frac{U_{ян}}{U_{yn}}$,

U_{yn} – напряжение управляющего электрода выбранного типа тиристора.

Минимальное и максимальное значения регулируемой скорости электропривода могут быть определены из соотношений:

$$\omega_{0\min} = \frac{\omega_H}{(1 - \delta)D},$$

$$\omega_{0\max} = \Delta\omega + \omega_H = \delta\omega_{0\min} + \omega_H.$$

где δ – статическая ошибка при стабилизации скорости на заданном уровне, D – диапазон регулирования скорости.

Коэффициент передачи разомкнутого контура системы электропривода:

$$K_{p\kappa} = \frac{K_{\partial} R I_{яH}}{\delta\omega_{0\min}}.$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_c = \frac{K_{p\kappa} U_{зс}}{(1 + K_{p\kappa})\omega_{0\max}}.$$

где $U_{зс}$ – напряжение задатчика скорости (аналоговый сигнал управления, обычно постоянного тока, например, 10 В).

Коэффициент усиления суммирующего усилителя:

$$K_y = \frac{K_{p\kappa}}{K_{\partial} K_n K_c}.$$

Коэффициент передачи прямой цепи (всех последовательно соединенных звеньев цепи от входа до выхода: регулятора, преобразователя, двигателя):

$$K = \frac{K_{p\kappa}}{K_c}.$$

Наряду с непрерывными обратными связями системы автоматизированного электропривода используют задержанные обратные связи, которые вступают в действие или отключаются только в моменты, когда регулируемая величина достигает определенного значения. В данной системе такой величиной может быть ток якоря $I_{я}$. В моменты работы электропривода, когда $I_{я}$ достигнет значения тока отсечки $I_{яотс}$, вступает в действие задержанная обратная связь по току.

Пока $I_{я} < I_{яотс}$ в системе действует обратная связь по скорости, и с учетом проведенных выше преобразований уравнение электромеханической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{KU_{zc}}{1 + K_{pk}} - \frac{K_{\partial}R}{1 + K_{pk}} \cdot I_{я}.$$

При достижении $I_{я} = I_{яотс}$ в системе вступает в действие обратная связь по току, которая резко увеличивает наклон электромеханической характеристики. На этом участке характеристика описывается уравнением:

$$\omega = \frac{KU_{zc}}{1 + K_{pk}} - \frac{K_{\partial}R}{1 + K_{pk}} \cdot I_{я} - \frac{KK_T}{1 + K_{pk}} \cdot (I_{я} - I_{яотс}),$$

где K_T – коэффициент обратной связи по току. Его значение может быть определено из соотношения для $I_{ямакс}$ при $\omega = 0$:

$$K_T = \left(\frac{KU_{zc}}{1 + K_{pk}} - \frac{K_{\partial}R}{1 + K_{pk}} \cdot I_{яотс} \right) - \frac{1 + K_{pk}}{K(I_{ямакс} - I_{яотс})} = \frac{KU_{zc} - K_{\partial}RI_{ямакс}}{K(I_{ямакс} - I_{яотс})}$$

Электромеханическая характеристика электропривода при действии обратных связей по скорости и по току изображена на рисунке 7.1.

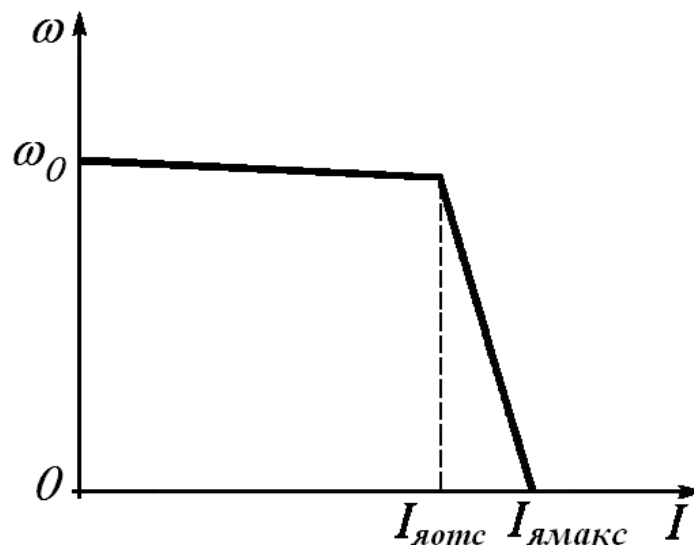


Рисунок 7.1 – Электромеханическая характеристика электропривода

8. Разработка эквивалентной структурной схемы электропривода и определение передаточных функций элементов

Эквивалентная структурная схема электропривода – это графическое отображение его передаточной функции по управляющему воздействию. В развернутых структурных схемах есть основная цепь воздействия, идущая от входа к выходу, и дополнительные связи, образующие путь передачи воздействия к отдельным участкам основной цепи. Эквивалентная структурная схема разрабатываемого электропривода может иметь вид, представленный на рисунке 8.1:

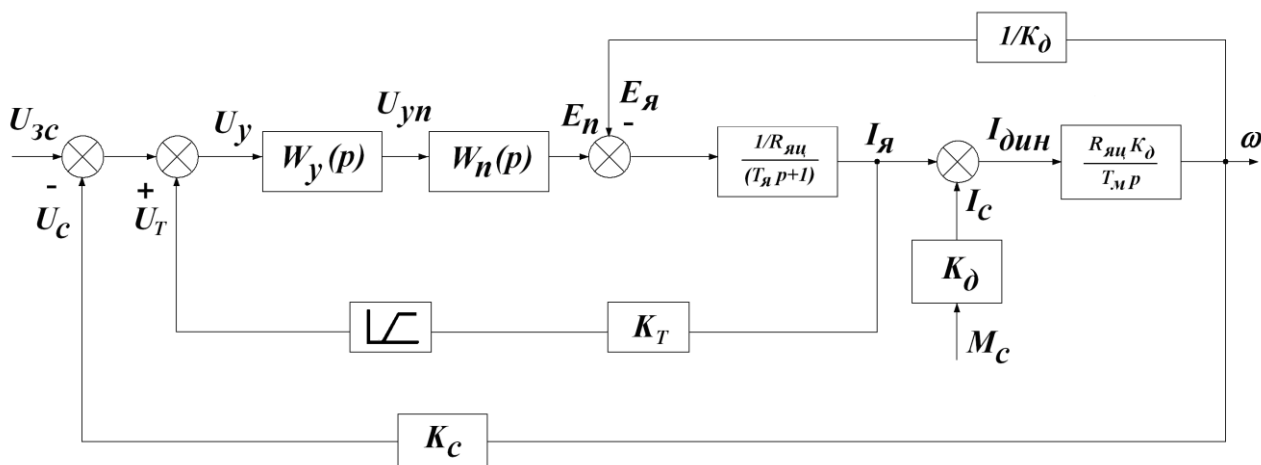


Рисунок 8.1 – Эквивалентная структурная схема электропривода

Так как данная схема электропривода имеет в своем составе задержанную обратную связь по току, то в структурной схеме в контуре тока присутствует нелинейный элемент, имеющий зону нечувствительности.

Рассмотрим передаточные функции отдельных звеньев и всей системы электропривода.

Передаточная функция усилителя: $W_y(p) = K_y$.

Передаточная функция тиристорного преобразователя вместе с системой импульсно-фазового управления $W_n(p)$ аппроксимируется, как правило, апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени:

$$T_n = T_{СИФУ} + \tau = \frac{1}{2\pi m f} + \frac{1}{2\pi f},$$

где f – частота напряжения сети, m – число фаз сети.
Тогда

$$W_n(p) = \frac{K_n}{1 + T_n p}.$$

Передаточную функцию электродвигателя постоянного тока W_δ при управлении изменением напряжения на обмотке якоря в зависимости от соотношения электромагнитной T_γ и электромеханической T_m постоянных времени можно представить в виде передаточной функции колебательного звена, апериодического звена второго порядка или в виде звена первого порядка.

Электромагнитная постоянная времени электропривода:

$$T_\gamma = \frac{L}{R} = \frac{L_{яц} + L_n + L_{с.р.}}{R} = \frac{L_{яц} + 2L_T + L_{с.р.}}{R}.$$

Электромеханическая постоянная времени электропривода:

$$T_m = jRK_\delta^2 = (j_{\delta\phi} + j_{pm})RK_\delta^2.$$

Если $4T_\gamma > T_m$, то $W_\delta(p) = \frac{K_\delta}{T^2 p^2 + 2\gamma T p + 1}$, при этом $T = \sqrt{T_\gamma T_m}$,

$$\gamma = \sqrt{\frac{T_\gamma}{4T_m}}.$$

Если $4T_\gamma < T_m$, то $W_\delta(p) = \frac{K_\delta}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$, при этом $T_1 T_2 = T_\gamma T_m$,

$$T_1 + T_2 = T_\gamma + T_m.$$

Если $4T_\gamma \ll T_m$, то $W_\delta(p) \approx \frac{K_\delta}{T_m p + 1}$.

При рассмотрении переходного процесса по управляющему воздействию считают, что переходный процесс происходит в интервале значений тока якорной цепи до тока отсечки, т.е. контур тока не влияет на переходной процесс, а значит им пренебрегают. В этом случае эквивалентная структурная схема будет иметь вид, представленный на рисунке 8.2.

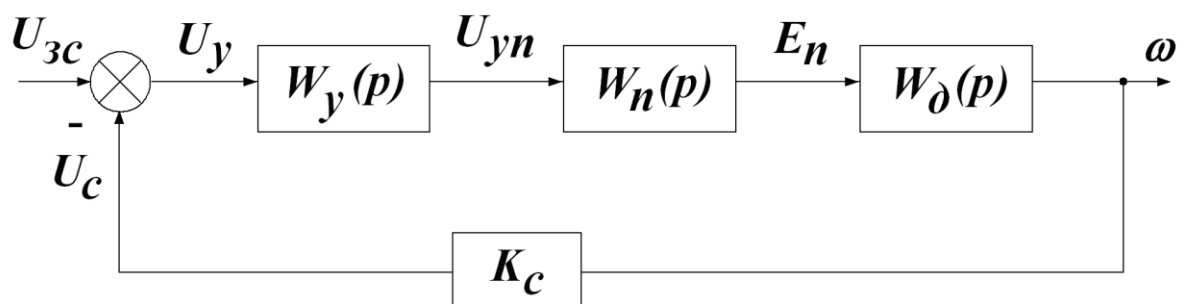


Рисунок 8.2 – Упрощенная эквивалентная структурная схема электропривода

9. Анализ динамики электропривода

Формирование динамических характеристик электропривода производится с помощью пассивных и активных корректирующих устройств. Реальные системы электропривода содержат устройства с нелинейными характеристиками. Для упрощения синтеза, а в последствии и анализа, нелинейные системы прежде всего стремятся линеаризовать, превратив их в линеаризованные, подчиняющиеся принципу суперпозиции и описываемые дифференциальными уравнениями, записанными в классической или операторной форме.

Линеаризация характеристик системы производится с учетом возможных режимов работы преобразователя и двигателя на определенных участках их характеристик. Иногда, например, в течение всего динамического режима параметры системы изменяются незначительно и их изменениями вполне можно пренебречь, не уменьшая точность расчетов. Часто линеаризация характеристик звеньев системы производится по участкам (кусочно-линейная аппроксимация), на каждом из которых система считается линейной.

Синтез корректирующих устройств может осуществляться различными методами. В системах электропривода с общим суммирующим усилителем наибольшее распространение получил метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ). В системах электропривода с подчиненным регулированием координат синтез регуляторов обычно осуществляется классическим методом с настройкой на технический и симметричный оптимум.

Анализ динамических режимов линейных и линеаризованных систем электропривода производится с помощью дифференциальных уравнений, составленных по звеньям системы или по передаточной функции, полученной из эквивалентной структурной схемы. Решение дифференциальных уравнений невысокого порядка может производиться классическим или операторным методом.

При высоких порядках уравнений, описывающих линейную систему автоматизированного управления электропривода, целесообразнее

пользоваться частотным методом расчета переходных процессов, не требующим нахождения корней характеристического уравнения.

При применении кусочно-линейной аппроксимации нелинейной характеристики для каждого прямолинейного участка составляется свое линейное дифференциальное уравнение, постоянные интегрирования которого находятся из начальных условий на каждом участке, и результаты расчетов для каждого участка соединяются. Этот метод повышает точность, но требует больших затрат времени.

Построив кривые изменения регулируемых величин при типовых воздействиях, можно уточнить динамические показатели качества в спроектированной системе электропривода и выявить их соответствие заданным значениям. Для этого используют эквивалентную структурную схему всей системы электропривода с учетом выбранных корректирующих устройств и производят моделирование основного переходного процесса – пуска электродвигателя – в какой-либо из программ моделирования, например, в программе VisSim.

Используя график полученного в результате моделирования переходного процесса, определяют показатели его качества, производя соответствующие построения (рисунок 4).

Основными показателями качества являются перерегулирование, время регулирования и статическая ошибка при стабилизации скорости на заданном уровне.

Перерегулирование σ характеризует величину максимального динамического отклонения скорости вращения якоря от ее действительного значения в установившемся режиме после завершения переходного процесса, выраженное в процентах от значения в установившемся режиме:

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_{max}}{\omega_{уст}} = \frac{\omega_{max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\%.$$

Рассчитав значение σ , сравнивают его со значением допустимого перерегулирования, указанным в листе задания на курсовое проектирование.

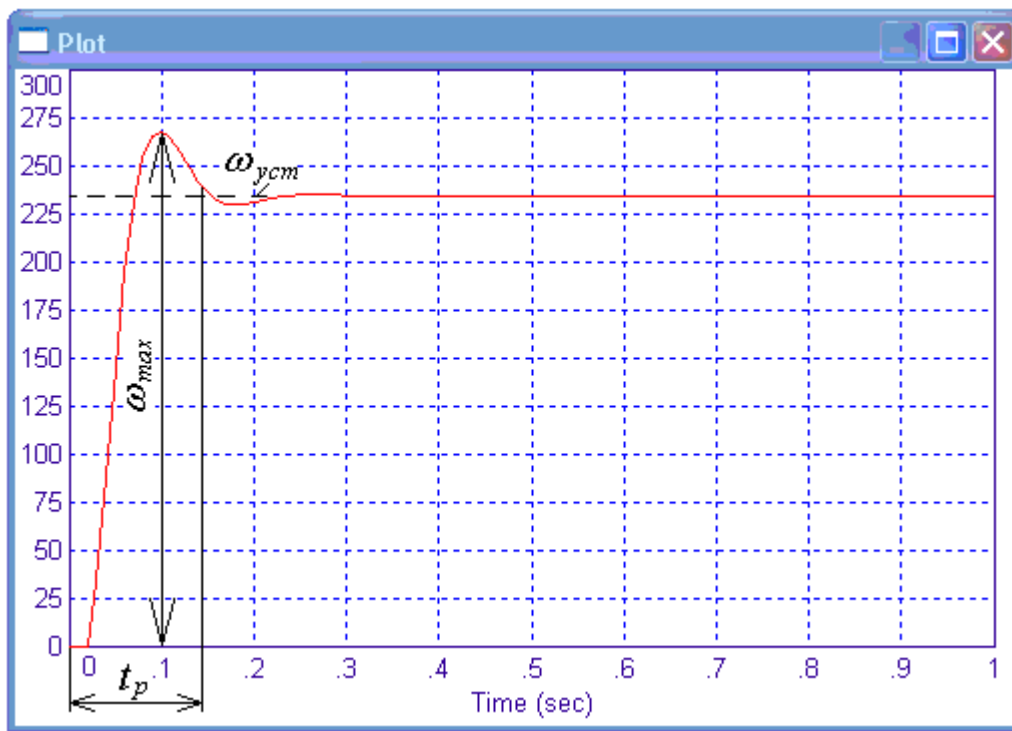


Рисунок 9.1 – График переходного процесса

Время регулирования t_p представляет собой время, отсчитываемое от начала переходного процесса, по истечении которого отклонение скорости вращения якоря от установившегося значения не будет превышать $1 \div 5 \%$. Определив значение t_p , сравнивают его со значением времени переходного процесса $T_{н.н.}$, указанным в листе задания на курсовое проектирование.

Статическая ошибка при стабилизации скорости на заданном уровне – это разность между заданным номинальным значением скорости вращения якоря и ее действительным значением в установившемся режиме после завершения переходного процесса, выраженное в процентах от заданного номинального значения:

$$\delta = \frac{\omega_n - \omega_{уст}}{\omega_n} \cdot 100\%$$

Рассчитав значение δ , сравнивают его со значением допустимой статической ошибки при стабилизации скорости на заданном уровне, указанным в листе задания на курсовое проектирование.

В случае если переходной процесс удовлетворяет показателям качества, разработанная система регулируемого электропривода считается устойчивой и эффективно работающей. В противном случае, требуется изменение параметров элементов или структуры системы в целом для достижения требуемых показателей качества.

10. Разработка принципиальной электрической схемы электропривода

Принципиальная электрическая схема определяет полный состав элементов и связей между ними и дает детальное представление о принципе работы электропривода. Принципиальные схемы являются основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений и рабочих чертежей. Ими пользуются для изучения принципа работы, а также при монтаже, наладке и ремонте.

Основой для разработки принципиальной электрической схемы является техническое задание, выбранная структурная схема электропривода и результаты расчетов и исследований предыдущих разделов проекта.

Вначале прорабатываются принципиальные схемы функциональных частей электропривода. При этом анализируются известные по литературным данным решения этих узлов и с учетом достижений современной техники разрабатываются схемы, наиболее полно удовлетворяющие технико-экономическим требованиям. Производится подбор элементов и устройств из общей массы выпускаемых промышленностью и применяемых в системах автоматизированного электропривода.

При разработке электропривода прорабатывается узел задания скорости, выбираются схемные решения и параметры усилителей, регуляторов. Подбираются датчики обратных связей по скорости, току и другим параметрам. Решается вопрос об узле стабилизации момента (тока), рассчитываются параметры этого узла и прорабатывается его структура. Производится выбор схемы и определение параметров корректирующего устройства. При необходимости выбирается схемное решение системы импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем.

После проработки схемных решений отдельных функциональных узлов составляется полная принципиальная схема электропривода.

Для удобства понимания и чтения принципиальных схем используют совокупность стандартизованных графических изображений элементов, электрических устройств и линий связи, их буквенных и цифровых обозначений. Чтобы избежать разночтения, для изображения элементов и устройств на схеме необходимо использовать только условные графические обозначения, установленные ЕСКД.

При построении схем необходимо располагать графические обозначения элементов и соединяющие их линии связи на схеме таким образом, чтобы обеспечить наилучшее представление о структуре узла электрооборудования. Линии связи должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков, иметь наименьшее число изломов и взаимных пересечений. Допускается применять наклонные отрезки линий связи, но их длину следует ограничивать: расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не

менее 3 мм. Условные графические обозначения элементов изображают тех же размеров, что и в соответствующих стандартах на условные графические обозначения.

Для удобства чтения и пользования принципиальной схемой каждому элементу и устройству, изображенному на схеме, присваивается буквенно-цифровое обозначение. Порядковые номера элементам следует присваивать в соответствии с последовательностью расположения элементов на схеме слева направо и сверху вниз.

Литература

1. Негадаев, В. А. Силовая электроника : методические указания к самостоятельной работе для студентов направления подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника», образовательные программы «Электропривод и автоматика» и «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», очной формы обучения / сост. В. А. Негадаев. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – 47 с.
2. Лебедев, Г. М. Электромеханические системы : учебное пособие / Г. М. Лебедев, Д. М. Мешков. – Кемерово : КемТИПП, 2003. – 124 с.
3. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Академия, 2007. – 368 с.
4. Гульков, Г. И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г. И. Гульков. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
5. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. – Москва : Академия, 2006. – 304 с.
6. Учебно-методический комплекс дисциплины «Системы управления электроприводом» основной образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» : методические указания по выполнению курсового проекта для студентов всех форм обучения. – Лысьва, 2014. – 24 с.

Учебное издание

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Методические указания по выполнению
курсовой работы

Составители:

Куксевич Виталий Федорович
Леонов Владимир Викторович

Редактор Р.А. Никифорова

Корректор А.С. Прокопюк

Компьютерная верстка В.Ф. Куксевич

Подписано к печати 22.06.2026. Усл. печ. листов 2,0.
Уч.-изд. листов 2,5. Заказ № 171.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.