

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

Г.М. СИМАКОВ,
А.Ю. КУЗНЕЦОВ, П.В. ЗОНОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебное пособие
по написанию раздела выпускной квалификационной
бакалаврской работы

Новосибирск 2015

УДК 621.3–83 (075)

ББК 31.291.5 Я 73

С 37

Кафедра электрификации и автоматизации сельского хозяйства

Рецензент канд. техн. наук, доц. *К. В. Власов* (СГУПС)

Симаков Г. М.

Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т; Г.М. Симаков, А. Ю. Кузнецов, П. В. Зонов. – Новосибирск: ИЦ «Золотой колос», 2015. – 81 с.

В учебном пособии изложены вопросы выбора и расчета электрооборудования, аппаратуры управления и защиты асинхронного электропривода при написании профилирующего раздела выпускной квалификационной бакалаврской работы в соответствии с требованиями рекомендаций по организации и методике подготовки выпускных квалификационных работ в Инженерном институте.

Приведено описание функциональных схем электрических приводов типа ЭШИР, УНИВЕРСАЛ, ЭРАТОН, ИРБИ и FRS-520, часто применяемых в сельском хозяйстве и в промышленности.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, профилю – Электрооборудование и электротехнологии в АПК. Раздел 4 рекомендуется студентам при изучении дисциплины «Электрический привод и электрооборудование в АПК», а также дисциплине «Электропривод сельскохозяйственной техники» .

Утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол № 28 от 29 апреля 2014 г.).

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для подготовки студентами выпускной квалификационной бакалаврской работы по профилю 110800.02.62 – Электрооборудование и электротехнологии в АПК по теме дисциплины «Автоматизированный электропривод» и ставит в качестве своей задачи помощь в правильном оформлении и расчетах при написании разделов по выбору асинхронного электропривода для установок, используемых в сельском хозяйстве и в промышленности.

Основной целью при выполнении выпускной квалификационной бакалаврской работы является приобретение студентами навыков самостоятельного принятия инженерных решений при выборе в качестве темы проектирования и расчета на базе современной полупроводниковой техники систем автоматического управления электрическими приводами.

Для выполнения выпускной квалификационной бакалаврской работы студентам необходимо активно работать с технической литературой и четко понимать применяемые методики расчета, оформлять расчетно-пояснительную записку с библиографическим списком в соответствии с действующими требованиями и рекомендациями, принятыми в Инженерном институте НГАУ.

Выпускная квалификационная работа (ВКР) носит учебный характер, поэтому перечень вопросов, решаемых в работе, шире, чем просто выбор серийного комплектного электропривода для удовлетворения требований технического задания.

Раздел 4 рекомендуется студентам при изучении дисциплины «Электрический привод и электрооборудование в АПК» в части, касающейся асинхронного электропривода.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И СОДЕРЖАНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

Выпускная квалификационная работа бакалавра по теме «Автоматизированный электропривод» состоит из расчетно-пояснительной записки (твердая копия) и презентации с чертежами, оформленными в соответствии с требованиями ЕСКД.

Расчетно-пояснительная записка должна выполняться в соответствии с действующими рекомендациями по организации и методике подготовки выпускных квалификационных работ [50] в Инженерном институте НГАУ.

Все расчеты должны быть выполнены в системе СИ, а принципиальные схемы отдельных узлов системы управления преобразователем – в соответствии с ГОСТами и должны сохранять обозначения и маркировку, приведенные в каталогах. Чертежи оформляются на шести листах в любом графическом редакторе. На одном листе приводится принципиальная схема системы управления электроприводом, на других – его структурная схема, характеристики элементов системы управления преобразователем, статические и динамические характеристики автоматизированного электропривода.

К расчетно-пояснительной записке (с приложениями) выпускной квалификационной бакалаврской работы (твердая копия) прикладывается диск с полным ее содержанием и презентацией в электронном виде.

В соответствии с учебным планом предусматривается возможность выбора студентом в качестве темы для выпускной квалификационной бакалаврской работы разработки автоматизированных электроприводов, обеспечивающих стабилизацию скорости, или управления положением.

Как система стабилизации скорости вращения, так и система следящего электропривода могут реализовываться на

базе комплектных электроприводов, серийно выпускаемых отечественной промышленностью, либо на основе вновь проектируемого управляемого преобразователя (тиристорного или транзисторного).

Содержание выпускной квалификационной бакалаврской работы при проектировании системы стабилизации скорости электрического привода включает в себя следующие элементы: выбор системы электропривода и его функциональные схемы, расчет и выбор элементов его силовой части, описание элементов системы управления преобразователем, синтез регуляторов и расчет их параметров, оценка статических и динамических свойств системы управления электроприводом, составление принципиальной схемы управления электроприводом и выбор аппаратуры управления защиты и сигнализации; составление спецификации на элементы электрооборудования.

Исходными данными для разработки системы стабилизации скорости вращения электродвигателя являются:

- тип, мощность, напряжение и скорость вращения электродвигателя;
- привод реверсивный, редкий реверс, нереверсивный;
- диапазон и погрешность регулирования скорости;
- частота (полоса) пропускания контура регулирования скорости автоматизированного электропривода.

Ориентировочно затраты времени на выполнение выпускной квалификационной бакалаврской работы составляют 70 часов самостоятельной работы при условии, что студентом освоен материал курсов «Электрический привод», «Электроника», «Автоматика», «Автоматизированный электропривод».

Учебное пособие может использоваться студентами при изучении соответствующих разделов (асинхронный электропривод) дисциплины «Электрический привод и электрооборудование в АПК».

Ниже приводятся некоторые указания к выполнению профилирующих разделов расчетно-пояснительной записки, однако они не ограничивают свободу студента по самостоятельному выбору технических решений и методик расчета элементов автоматизированного электрического привода.

2. ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА

В соответствии с заданием на выпускную квалификационную бакалаврскую работу в этом разделе приводится полный перечень технических данных электродвигателя. Эти данные могут быть взяты из каталога на машины переменного тока [2, 23]. Следует помнить, что в каталогах сопротивление обмоток двигателя указано при определенной температуре.

В выпускной квалификационной бакалаврской работе необходимо выполнить приведение сопротивлений обмоток двигателя в соответствии с классом изоляции к его рабочей температуре. Отсутствующие в каталогах величины должны быть определены по известным соотношениям. Такими величинами, как правило, являются активное сопротивление якорной цепи двигателя, номинальный ток двигателя, номинальная ЭДС двигателя, коэффициент пропорциональности ЭДС к скорости двигателя, электромагнитного момента и тока. Сопротивление якорной цепи «горячего» двигателя может быть определено по коэффициенту полезного действия машины при допущении, что активные потери в якоре электрической машины составляют половину всех потерь.

При выборе электрического привода переменного тока необходимо учитывать доступность материалов, в первую очередь схмотехнических решений, на выбранный тип пре-

образователя. На базе этих типовых электрических приводов реализуются и следящие системы автоматизированного электропривода.

Приняв для реализации типовой комплектный электропривод, необходимо в расчетно-пояснительной записке привести его техническую характеристику: назначение, конструктивное исполнение, составные части, комплектность поставки заводом-изготовителем, условия эксплуатации и т.д. В том случае, если по исходным данным варианта нельзя принять типовой управляемый тиристорный преобразователь, допускается в бакалаврской работе самостоятельно спроектировать новый преобразователь или силовую часть выполнить составной из типовых преобразователей меньшей мощности, включая их на параллельную работу. В типовой системе управления в этом случае проектом должна быть дополнительно предусмотрена возможность управления параллельно включенными силовыми схемами преобразователей.

Заканчивается этот раздел функциональной схемой для принятой системы электрического привода. Функциональная схема определяет основной состав системы управления электрическим приводом: двигатель, преобразователь, система управления преобразователем, регуляторы, датчики обратных связей, источники питания, узлы защиты, сигнализации и блокировки – и их функциональную взаимосвязь.

Источник электрической энергии (ИЭЭ) – как правило, промышленная сеть. ЭПУ, получая от ИЭЭ электрическую энергию W_c с нерегулируемым напряжением U_c , током I_c и частотой f_c , преобразует ее в электрическую энергию иного вида или формы, потребляемую двигателем, W_d с другими U , I и f , часть из которых управляема.

Электрическое преобразовательное устройство (ЭПУ) служит для связи системы электропривода с ИЭЭ (напри-

мер, с промышленной сетью), для преобразования одной формы электрической энергии в другую (например, для выпрямления переменного тока). Основное назначение состоит в формировании управляемого потока энергии, потребляемого рабочим процессом. Этот поток энергии может быть различным образом использован для реализации основных функций рабочей машины. Другая же большая или меньшая часть этого потока, превращаясь в иные формы, не участвует в формировании заданного рабочего процесса, т.е. расходуется бесполезно. Поэтому в связи с быстрым расходом первичных (природных) источников энергии в большинстве сфер человеческой деятельности с каждым последующим десятилетием все важнее становятся вопросы использования энергосберегающих технологий, рабочих машин, исполнительных механизмов и рабочих процессов и создания восстанавливаемых источников энергии. В системах электрического привода все эти проблемы связаны со свойствами преобразователей, двигателей и передаточных устройств.

Передаточное устройство (ПУ) предназначено для преобразования форм движения и передачи механической энергии от двигательного устройства к рабочим органам машины.

Двигательное устройство (ДУ) преобразует электрическую энергию $W_{\text{д}}$ в механическую $W_{\text{м}}$ вращающегося или перемещающегося линейно ротора (якоря). Пройдя механическое передаточное устройство (ПУ), поток механической энергии $W_{\text{м}}$ преобразуется в поток такого же вида энергии $W_{\text{рм}}$, который воспринимается рабочей машиной (РМ) или исполнительным механизмом (ИМ).

Управляющее и информационное устройства предназначены для формирования заданных законов управления потоком энергии W и движения рабочих органов машин.

Таким образом, автоматизированный электрический привод следует рассматривать как одну из наиболее распространенных разновидностей электромеханических систем автоматического управления (САУ).

Механизмами РМ энергия W_p преобразуется в механическую работу *рабочих органов* (РО) с координатами: M_{po} – моментом сопротивления и ω_{po} – угловой скоростью при вращательном движении или с координатами: F_{po} – силой сопротивления и v_{po} – линейной скоростью при поступательном движении. Естественно, преобразование потока энергии W_c в W_p осуществляется с потерями, которые зависят не только от вида и качества всех элементов электропривода, но и от выбранных законов управления потоком энергии.

Управляющее устройство (УУ) управляет отдельными координатами ЭПУ, или ДУ, или ПУ. Формирует законы управления *УУ задающее устройство* (ЗУ), которое вырабатывает необходимые управляющие воздействия в результате сопоставления задаваемой информации с поступающей от *датчиков – преобразователей информации* (ДПИ), представляющих собой информационно-измерительные устройства, предназначенные для измерения различных физических координат электропривода (моментов, сил, угловых или линейных перемещений и скоростей, токов, напряжений и др.) и преобразования их в электрические *сигналы одинакового вида* (например, напряжения).

Функциональная схема электрического привода как разновидности САУ показана на рис. 2.1. Она позволяет более подробно рассмотреть назначение отдельных элементов привода и связей между ними. Здесь тонкими линиями изображены каналы передачи информации, двойными – каналы передачи электрической энергии, двойными пунктирными – каналы передачи механической энергии,

а пунктирными линиями – каналы передачи информации об измеряемых координатах электропривода или исполнительного механизма.

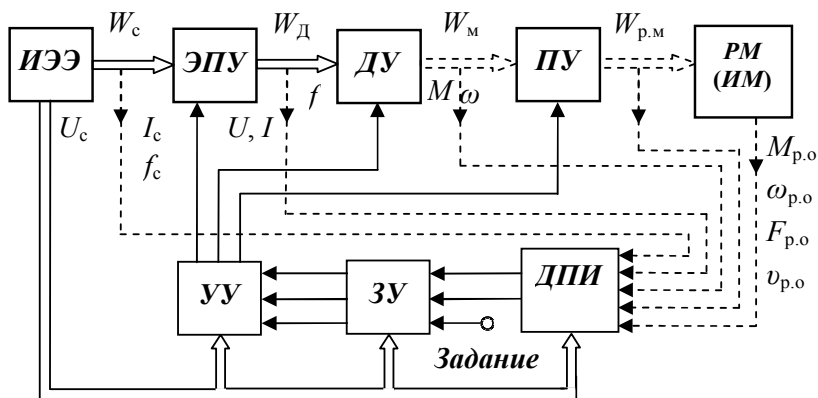


Рис. 2.1. Функциональная схема электрического привода

Функциональная схема электрического привода отражает не только принцип действия проектируемой системы автоматического управления, но и дает представление об объеме расчетов по выбору ее элементов.

В тексте выпускной квалификационной бакалаврской работы должна быть приведена расшифровка всех обозначений, краткая характеристика и назначение всех элементов и блоков функциональной схемы электрического привода.

3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Расчет параметров асинхронного двигателя

В справочной литературе по асинхронным двигателям (АД) приведены обычно параметры для Г-образной схемы замещения (рис. 3.1).

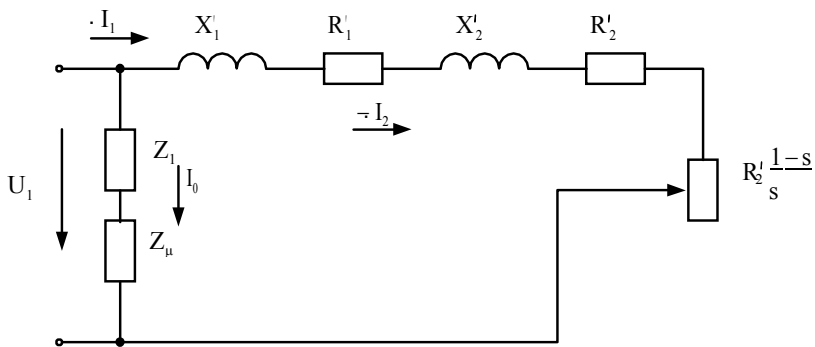


Рис. 3.1. Г-образная схема замещения АД

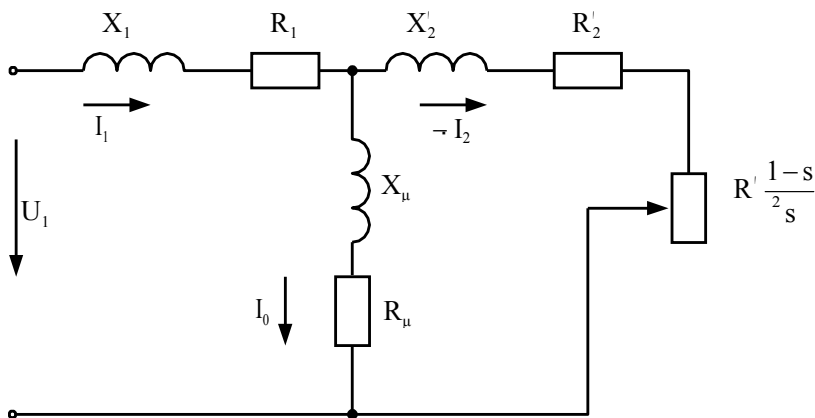


Рис. 3.2. Т-образная схема замещения АД

При переходе к Т-образной схеме замещения (рис. 3.2) следует воспользоваться формулами из [2]:

– индуктивное сопротивление Т-образной схемы замещения:

$$\tilde{O}_1 = \frac{2\tilde{O}_\mu \cdot \tilde{O}'_1}{\tilde{O}_\mu + \tilde{O}'_1 \sqrt{1 + 4\tilde{O}'_1 \cdot \tilde{O}'_\mu}}; \quad (3.1)$$

– активное сопротивление Т-образной схемы замещения:

$$R_{1c} = \frac{R'_1}{c}; \quad (3.2)$$

$$\tilde{n} = \frac{\tilde{O}'_1}{\tilde{O}_1}; \quad (3.3)$$

– индуктивное сопротивление ротора T-образной схемы замещения:

$$\tilde{O}' = \frac{\tilde{O}'_2}{\tilde{n}^2}; \quad (3.4)$$

– активное сопротивление ротора T-образной схемы замещения:

$$R' = \frac{R'_2}{c^2}; \quad (3.5)$$

$$\tilde{O}_k = \tilde{O}'_1 + \tilde{O}'_2; \quad (3.6)$$

Для упрощения расчёта характеристик параметры асинхронной машины выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Далее переходят от относительных единиц к действительным параметрам:

– эквивалентное, активное сопротивление обмотки статора:

$$R_s = R_1 \cdot k, \quad (3.7)$$

где $k = \frac{U}{I}$

– эквивалентное сопротивление обмотки ротора:

$$R_r = R'_2 \cdot k; \quad (3.8)$$

– эквивалентная индуктивность намагничивания:

$$L_m = \frac{X_\mu \cdot k}{\omega_0}; \quad (3.9)$$

– индуктивности рассеяния статора и ротора:

$$L_{\delta s} = \frac{X_1 \cdot k}{\omega_0}; \quad (3.10)$$

$$L_{\delta r} = \frac{X_2 \cdot k}{\omega_0}; \quad (3.11)$$

– полные индуктивности статора и ротора:

$$L_s = L_m + L_{\delta s}; \quad (3.12)$$

$$L_r = L_m + L_{\delta r}; \quad (3.13)$$

– эквивалентная индуктивность рассеяния двигателя:

$$L_{\delta e} = \frac{s}{L_r} \frac{r}{L_r} \frac{m}{L_r}; \quad (3.14)$$

– постоянная времени роторной цепи:

$$T = \frac{L_r}{R_r}; \quad (3.15)$$

$$T_e = \frac{X_k}{100 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2)}. \quad (3.16)$$

Абсолютные значения остальных параметров рассчитываются следующим образом:

$$X_1 = x_1 \cdot k; \quad (3.17)$$

$$X_\mu = x_\mu \cdot k; \quad (3.18)$$

$$X_2^1 = x_2^1 \cdot k; \quad (3.19)$$

$$R_2^1 = r_2^1 \cdot k. \quad (3.20)$$

Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным данным

Номинальное скольжение:

$$s_i = \frac{n_s - n_i}{n_s}, \quad (3.21)$$

где n_s – синхронная скорость (скорость вращения магнитного поля);

n_n – номинальная скорость вращения двигателя.

Критическое скольжение:

$$s_k = \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) \cdot s_i, \quad (3.22)$$

где $m_k = \frac{M_k}{M_{\dot{i}}}$ – отношение момента короткого замыкания (пускового) к номинальному моменту.

Конструктивный коэффициент:

$$\tilde{n}_1 = 1 + \frac{L_{\sigma s}}{L_m} \quad (3.23)$$

Первоначально конструктивный коэффициент задается в диапазоне $c_1 = 1,02 \div 1,05$ [13] для предварительного расчета параметров схемы замещения. После расчета индуктивностей, входящих в уравнение (3.23), необходимо сравнить полученное значение с первоначально выбранным и уточнить расчет. Обычно за 2–3 итерации удается достичь совпадения принятого и рассчитанного конструктивного коэффициента.

Коэффициент вязкого трения:

$$B_m = \frac{\Delta P_m}{(2\pi \cdot \tilde{n}_1 / 60)_2} \quad (3.24)$$

В уравнении (3.24) механические потери ΔP_m определяются из уравнения

$$\Delta P_m = \sqrt{3} \cdot I_{\dot{i}} \cdot U_{\dot{i}} \cdot \cos \phi \cdot \eta - P_{\dot{i}} \quad (3.25)$$

Сопротивление статора:

$$R_s = \frac{3}{2} \cdot \frac{(U_{\dot{i}} / \sqrt{3})^2 \cdot (1 - s_{\dot{i}})}{2 \cdot \tilde{n}_1 \cdot (1 + \tilde{n}_1 / s_k) \cdot M_k \cdot (P_{\dot{i}} + \Delta P_m)} \quad (3.26)$$

Сопротивление ротора:

$$R = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_{\dot{i}} + \Delta P_m)}{(1 - s) \cdot \dot{i}_k^2 \cdot I_{\dot{i}}^2} \quad (3.27)$$

где $\dot{i}_k = I_k / I_{\dot{i}}$ – отношение тока короткого замыкания к номинальному току.

Индуктивность статора и ротора:

$$L \cong L_s = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i_k} \cdot \frac{U / \sqrt{3}}{I_s \cdot \left[\sqrt{1 - (\cos \phi)^2} - \cos \phi \cdot s_k / s_i \right]} \quad (3.28)$$

Индуктивность рассеяния статора и ротора:

$$L_{\sigma s} \cong L_{\sigma r} = \frac{1}{4\pi \cdot f \cdot i_k} \cdot \sqrt{\left[\frac{(U / \sqrt{3})}{(i_k \cdot I_s)} \right]^2 - (R_s + R_r)^2} \quad (3.29)$$

Взаимоиндукция:

$$L_m = L_s - L_{\sigma s} \quad (3.30)$$

Механические и скоростные характеристики

Механические характеристики

Номинальный момент асинхронного электродвигателя:

$$M_i = \frac{P_i}{\omega_i} \quad (3.31)$$

где ω_i – номинальная угловая скорость АД.

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (3.32)$$

Критическое скольжение:

$$s_k = s_i \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right); \quad (3.33)$$

где $\lambda = \frac{\tilde{I}_{\max}}{\tilde{I}_{i\tilde{i}\tilde{i}}}$

Критический момент $\tilde{I}_k = M_{\max}$ определяется формулой

$$M_k = M_{i\tilde{i}\tilde{i}} \cdot \lambda \quad (3.34)$$

Механическая характеристика строится согласно выражению

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (3.35)$$

Основной закон изменения напряжения при частотном регулировании следующим образом.

При постоянном моменте на валу

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (3.36)$$

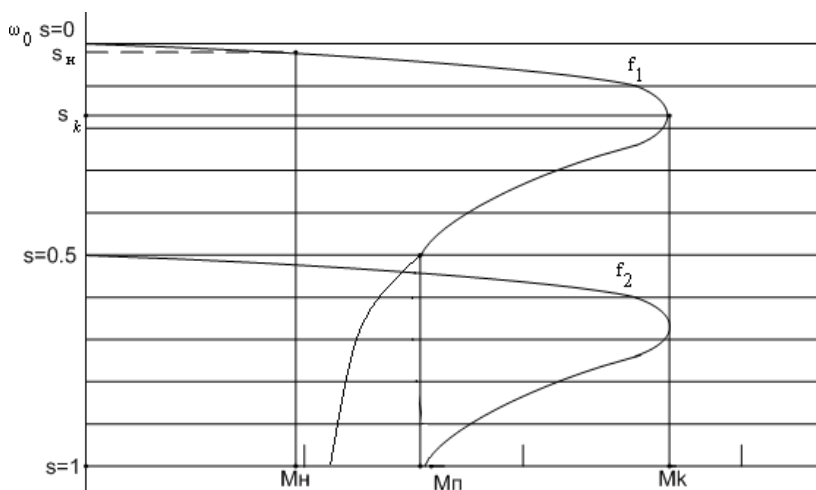


Рис. 3.3. Механические характеристики асинхронного двигателя

Скоростные характеристики

Скоростная характеристика строится по формуле

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}} \quad (3.37)$$

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + \left(\frac{I_2}{2}\right)^2} + 2 \cdot I_\mu \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2, \quad (3.38)$$

где I_{μ} – ток намагничивания;

$$\sin \varphi_2 = \frac{\tilde{O}_k}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + \tilde{O}_k^2}}$$

Ток намагничивания составляет небольшую часть от номинального тока статора, а именно:

$$I_{\mu} = (0,2-0,4) \cdot I_{\text{нн}}. \quad (3.39)$$

Скоростные характеристики АД изображены на рис. 3.4.

С помощью виртуальной модели асинхронного электродвигателя [12] можно построить и динамическую механическую характеристику.

Анализ асинхронного электродвигателя производится с помощью программы Matlab 6.5. Из библиотеки Toolbox Power System Blocks нужно воспользоваться виртуальной моделью асинхронной машины.

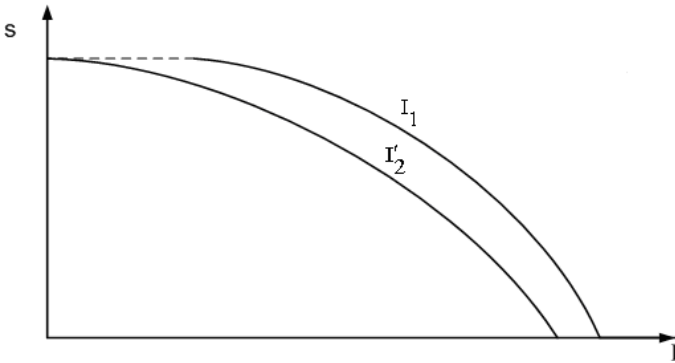


Рис. 3.4. Скоростные характеристики АД

На рис. 3.5 представлена структурная схема для моделирования переходных процессов в АД с короткозамкнутым ротором.

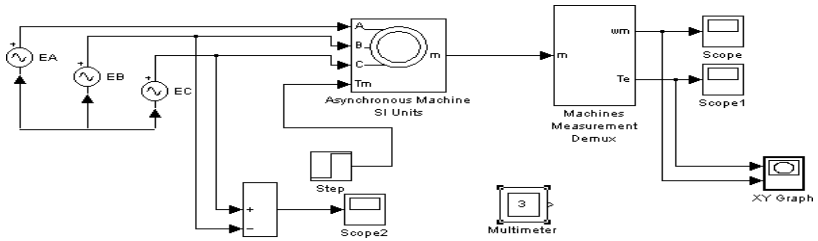


Рис. 3.5. Структурная схема моделирования АД

На рис. 3.6 приведена динамическая механическая характеристика АД с короткозамкнутым ротором.

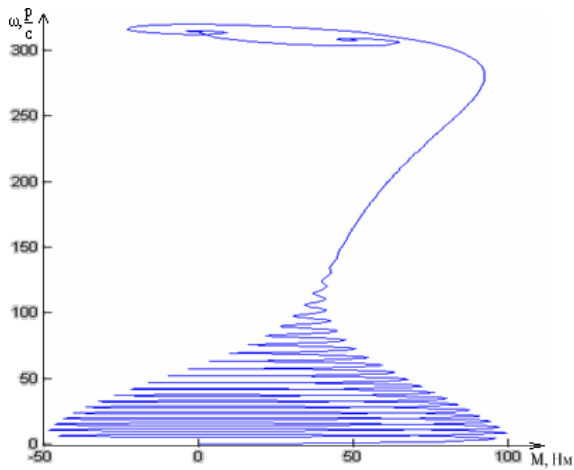


Рис. 3.6. Динамическая механическая характеристика АД по результатам моделирования

Выбор типа электропривода

В настоящее время существует большое количество типов преобразователей для асинхронного электропривода, особенно зарубежного производства. Однако информация, кроме рекламной, по многим типам электроприводов отсутствует.

Наиболее доступной является информация по таким устройствам, выпускаемым в г. Новосибирске. Это преобразователи типа ЭРАТОН, ИРБИ и РАЗМЕР. Ниже приводятся функциональные схемы транзисторных преобразователей типа ЭРАТОН, ИРБИ и преобразователя фирмы MITSUBISHI FRS-520. С асинхронным регулируемым электроприводом типа РАЗМЕР можно познакомиться в справочниках [41, 46].

На рис. 4.7 приведена функциональная схема асинхронного электропривода типа ЭРАТОН-4М, система управления которого реализована по принципу «ориентирования по полю» ротора [7].

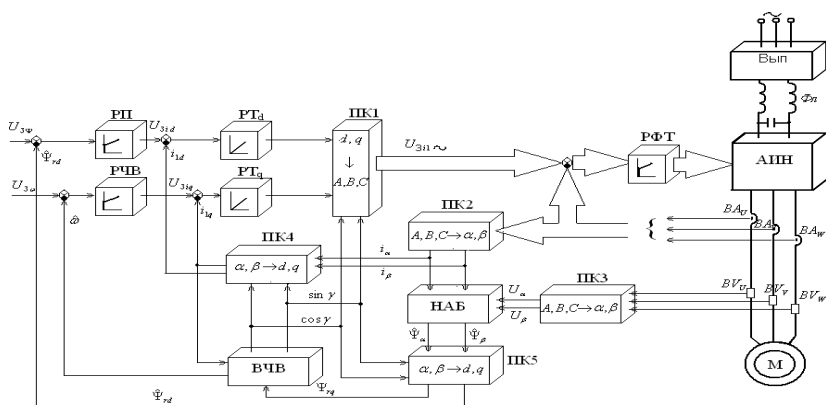


Рис. 3.7. Функциональная схема системы управления асинхронным электроприводом типа ЭРАТОН-4М

Система управления представляет собой вычислительное устройство, программное обеспечение которого позволяет по аналоговым сигналам с первичных датчиков фазных токов и напряжений вычислить регулируемые координаты и реализовать замкнутые контуры регулирования различных компонент **вектора состояния** электропривода. А именно, выполняются вычисления, связанные с фазовыми и координатными преобразованиями тока и напряжения статора реального АД к координатам изображающих векто-

ров токов, напряжений и потокосцеплений двухфазной машины. Эти вычисления реализуются блоками координатных преобразований **ПК2-ПК5** и наблюдателем магнитного потока – **НАБ**. Обратные преобразования (пересчет) координат изображающих векторов двухфазной машины в величины $U_{\varphi i}$, пропорциональные требуемым значениям фазных токов АД, осуществляются блоком **ПК1**. Скорость ротора ω и положение вектора Ψ_{2d} потокосцепления ротора определяются блоком вычислителя частоты вращения – **ВЧВ**. В установившихся режимах скорости векторов потокосцепления статора и ротора одинаковые. В переходных процессах, связанных с изменением нагрузки или управляющих сигналов, эти скорости разные из-за наличия индуктивных рассеяния (индуктивных сопротивлений) статора и ротора. Поэтому при реализации координатных преобразований используется угол γ .

В схеме реализуются также следующие замкнутые контуры:

- контур регулирования частоты вращения ротора с корректирующим звеном **РЧВ** – регулятором частоты вращения;
- контур регулирования вектора потокосцепления ротора с регулятором **РП**;
- контуры регулирования реактивной и активной составляющей тока статора с регуляторами **РТ 1**, **РТ 2**;
- трехканальный контур регулирования фазных токов статора с регулятором **РФТ**.

Все контуры регулирования построены по принципу регулирования по отклонению с отрицательными связями по регулируемым координатам, а система управления в целом – по принципу подчиненного регулирования.

Силовая часть электропривода включает неуправляемый выпрямитель – **В**, индуктивно-емкостной фильтр – **Ф**, транзисторный автономный инвертор напряжения – **АИН**, датчики фазных токов и напряжений – **ВА**, **ВВ**, АД с короткозамкнутым ротором – **М**.

Все устройства электропривода, кроме АД, располагаются в одной конструктивной единице, которая называется преобразователем частоты.

В настоящее время применяется также электропривод отечественного производства с преобразователем частоты УНИВЕРСАЛ-2,2. Преобразователь построен по классической схеме со звеном постоянного тока и состоит из входного выпрямителя, звена постоянного тока, инвертора и системы управления (рис. 3.8). Входной выпрямитель выполнен по трехфазной мостовой схеме Ларионова. На входе он содержит три соединенных в звезду варистора (элементы, теряющие сопротивление при напряжениях, в данном случае больше 391 В). Варисторы служат для ограничения перенапряжений на входе преобразователя, связанных с работой коммутирующей аппаратуры.

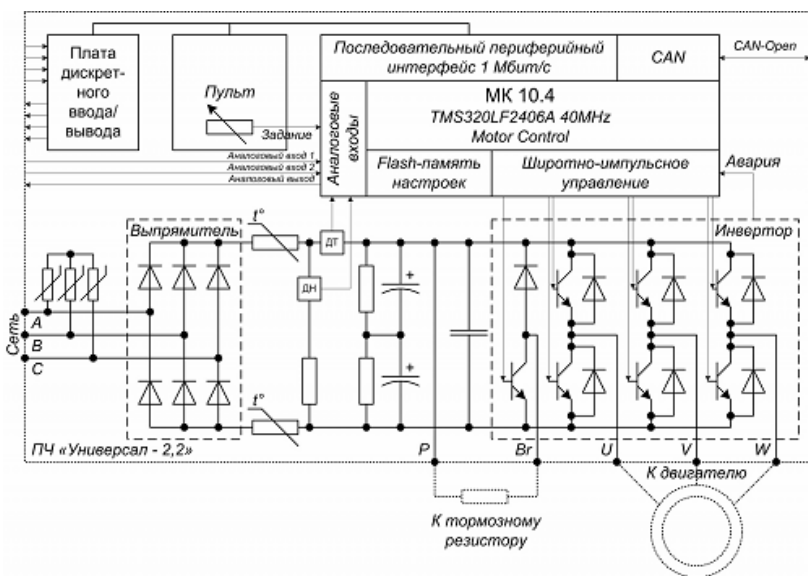


Рис. 3.8. Функциональная схема преобразователя частоты типа УНИВЕРСАЛ-2,2

Выпрямитель подсоединен к звену постоянного тока, которое содержит электролитические конденсаторы большой емкости, через термисторы. Термисторы с отрицательным температурным коэффициентом служат для ограничения зарядного тока, который возникает при включении на разряженные конденсаторы. Когда преобразователь отключен от сети, то термисторы холодные и имеют большое сопротивление. После включения преобразователя протекающий через термисторы ток разогревает их, и они резко уменьшают свое сопротивление. Таким образом, они не мешают преобразователю в процессе работы и ограничивают зарядный ток на уровне 5–7 номиналов, что допустимо, т.к. сопоставимо с уровнем тока при прямом пуске АД.

Электролитические конденсаторы звена постоянного тока многофункциональны. Они сглаживают напряжение звена постоянного тока, фильтруют потребляемый из сети ток, обеспечивают возврат реактивной энергии двигателя при отключении инвертора и в переходных процессах, обеспечивают кратковременный возврат энергии при частотном торможении АД. Резисторы, включенные параллельно каждому конденсатору, уравнивают заряд.

На выходе звена постоянного тока подключен трехфазный инвертор напряжения, выполненный в едином интеллектуальном силовом модуле (IPM) фирмы MITSUBISHI. Инвертор состоит из трех полумостов и тормозного ключа с обратным диодом. К тормозному ключу может быть подключено сопротивление, на которое будет происходить «слив» энергии, получаемой в режиме частотного торможения АД.

Из-за высокой скорости коммутации ключей инвертора даже при малых значениях подводющих паразитных индуктивностей между положительной и отрицательной шинами звена постоянного тока возникают большие перенапряжения с частотой свободных колебаний в несколько мегагерц. Если не принять специальные меры, то силовой модуль

может получить пробой и выйти из строя, поэтому в схеме преобразователя прямо на зажимах модуля предусмотрен снабберный конденсатор малой емкости. Конструкция этого конденсатора позволяет иметь в десятки раз меньшую индуктивность, чем у электролитических конденсаторов.

При этом конденсаторе можно эффективно бороться с перенапряжениями.

Вышеприведенная схема электропривода с преобразователем частоты УНИВЕРСАЛ-2,2 предназначена для использования как в промышленности, так и в сельском хозяйстве для любых типов механизмов с приводным асинхронным двигателем мощностью до 2,2 кВт. Схема обеспечивает пуск, останов, реверс и торможение АД при различных режимах работы. Диапазон регулирования скорости АД, обеспечиваемый данной схемой, 1:1000.

На рис. 3.9 приведена функциональная схема системы управления электроприводом FRS-520.

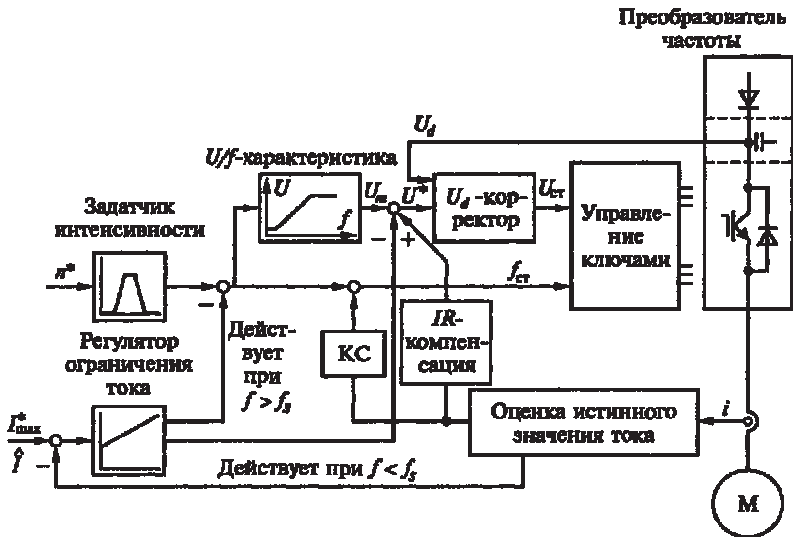


Рис. 3.9. Функциональная схема системы скалярного управления электроприводом FRS-520 без датчика скорости

Управление U/f -характеристики реализовано в системе управления асинхронным двигателем FRS-520. В данной системе отсутствуют датчики скорости. Все параметры со знаком (*) означают заданное значение переменных. Расчетным значением является I . Все остальные параметры – реально снятые данные.

Для поддержания постоянства потокосцепления статора в соответствии с U/f -характеристикой применяются модули IR -компенсации и U_d -коррекции. Повышение «жесткости» механической характеристики электропривода при изменении нагрузки достигается с помощью модуля компенсации скольжения (KC).

В системе предусматриваются регулирование тока ограничения в соответствии с заданным значением I_{\max}^* воздействием на напряжение или частоту статора и выбор U/f -характеристики, соответствующей управлению механизмами, имеющими постоянную или переменную (вентиляторную) нагрузку.

Имеется защита от «опрокидывания» привода в случае превышения критического значения момента нагрузки.

Данный преобразователь без ОСС (обратной связи по скорости) способен обеспечить диапазон регулирования 10:1 с введением ОСС – 200:1.

Получил распространение использование электропривод FRS-520 с датчиком скорости. Применяемая функциональная схема приведена на рис. 3.10. В качестве датчиков скорости могут использоваться аналоговые или импульсные датчики. Во втором случае применяются датчики с двумя каналами импульсов, имеющих фазовый сдвиг 90° . Кроме того, система регулируемого электропривода FRS-520 с обратной связью по скорости часто используют для электропривода механизмов, в которых диапазон регулирования скорости больше 1:10.

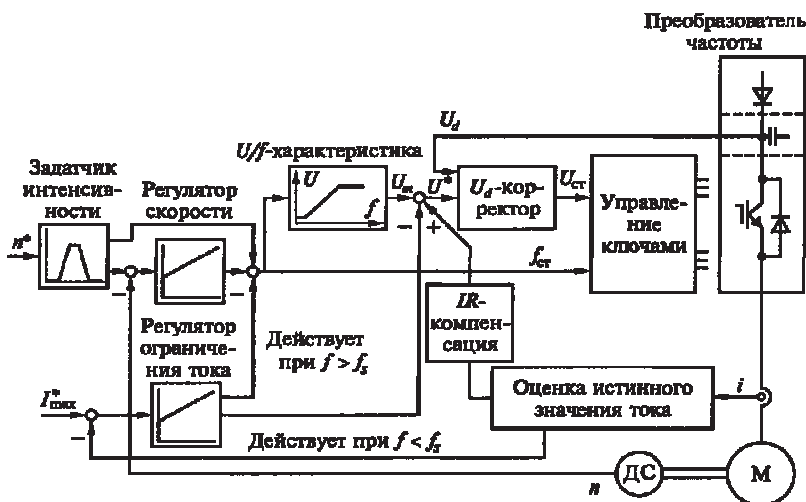


Рис. 3.10. Функциональная схема системы скалярного управления электроприводом FRS-520 с датчиком скорости

Электроприводы серии ИРБИ-8 [39] предназначены для общепромышленного применения и обеспечивают регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей серии 4А, АИР или других мощностью до 315 кВт в диапазоне частот от 1 до 100 Гц.

Электроприводы могут работать в режиме стабилизации частоты вращения при изменении нагрузки или стабилизации нагрузки путём изменения частоты вращения.

Преобразователи обеспечивают четырёхквadrантную двухзонную область работы электропривода (рис. 3.11).

Работа в первом и третьем квадранте – длительная (S1), во втором и четвёртом – повторно-кратковременная (S2). Первая зона характеристик (от 1 до 50 Гц) формируется с постоянством момента, вторая зона – (от 50 до 100 Гц) с постоянством мощности.

Также получил широкое распространение в системах водоснабжения электропривод типа ТРИОЛ АТ 06.

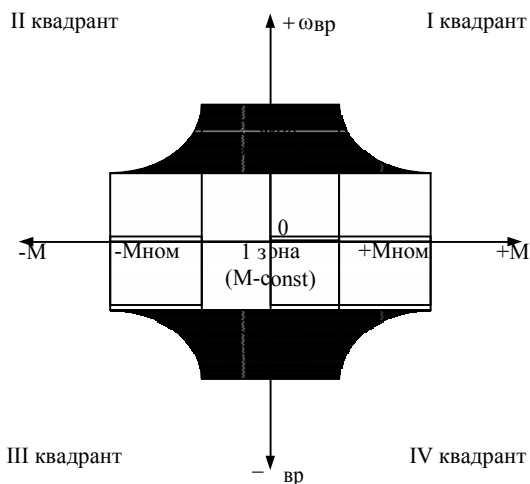


Рис. 3.11. Области работы электропривода

Функциональная схема электропривода АТ 06 выполнена на основе двухзвенного преобразователя частоты с транзисторным (IGBT) автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и многофункциональной микропроцессорной системой управления с развитым интерфейсом.

Электропривод АТ 06 применяется для автоматического управления производительностью насосных агрегатов тепловых распределительных станций (пунктов) с приводными трёхфазными асинхронными электродвигателями мощностью от 5,5 кВт до 315 кВт при классе напряжения 0,4 кВ.

В электроприводе реализовано частотное управление асинхронным электродвигателем, заключающееся во взаимосвязанном регулировании частоты F и значения U основной гармоники питающего напряжения. Диапазон регулирования скорости 1:1000.

Принцип действия и устройство электрических приводов АТ 06 поясняет функциональная схема, представленная на рис. 3.12.

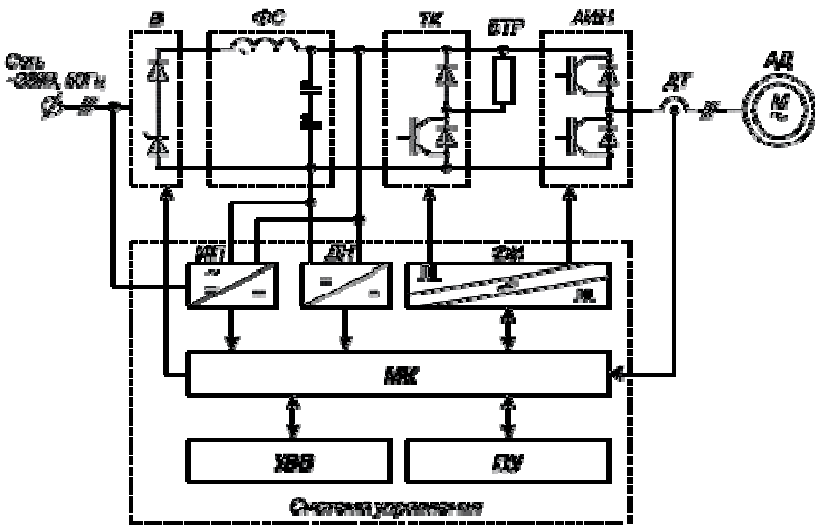


Рис. 3.12. Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода ТРИОЛ АТ 06

Силовой канал В ФС АИН осуществляет двухступенчатое преобразование электрической энергии – выпрямление сетевого напряжения с помощью нерегулируемого выпрямителя В и последующее инвертирование выпрямленного постоянного по величине напряжения посредством автономного инвертора напряжения АИН. Алгоритм ШИМ обеспечивает взаимосвязанное регулирование частоты F и величины U выходного напряжения по заданному закону, формирующего синусоидальную форму кривой тока приводного АД.

Для реализации режима динамического (реостатного) торможения в звено постоянного тока электропривода включён тормозной транзисторный модуль (IGBT), ключ ТК и внешний блок тормозного резистора БТР.

Датчики тока ДТ и напряжения ДН в силовом канале электропривода служат для контроля, регулирования и измерения электрических параметров электропривода, в т.ч.

для защиты от токов перегрузки и короткого замыкания, недопустимых отклонений напряжения.

Многоканальный источник питания ИП преобразует сетевое переменное напряжение или выпрямленное напряжение звена постоянного тока в систему напряжений постоянного тока требуемых уровней и степени стабильности, гальванически связанных и не связанных между собой, для питания устройств управления.

На схеме рис. 3.12. обозначено: В – силовой полууправляемый (диодно-тиристорный) выпрямитель; ФС – силовой LC-фильтр звена постоянного напряжения; ТК – транзисторный (IGBT) ключ реостатного торможения (тормозной ключ); БТР – внешний блок тормозного резистора; АИН – транзисторный (IGBT) автономный инвертор напряжения; ИП – источник питания (конвертор); ПУ – пульт управления; АД – приводной асинхронный двигатель; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; ФИ – формирователь управляющих сигналов транзисторов (драйвер); МК – микропроцессорный контроллер; УВВ – устройство ввода/вывода (внешний интерфейс).

На рис. 3.13 представлена функциональная схема системы управления. Блок охлаждения (БО) предназначен для предотвращения перегрева охладителя силовых элементов выпрямителя и транзисторного инвертора. Питание блока охлаждения – от сетевого напряжения.

Блок выпрямителя с устройством предзаряда силового фильтра (ВУП) предназначен для выпрямления трёх фаз сетевого напряжения и первоначального ограничения тока заряда силового LC-фильтра при включении электропривода. Цепь предзаряда шунтируется по сигналу $U_{\text{упр1}}$ блокировки режима предзаряда, который формируется в блоке источника питания (ИП). Элементы управления выпрямителем расположены на плате УВЗ-1, схема которой здесь не приведена.

- понижение напряжения сети более чем на 15%;
- обрыв фазы.

Сигнал блокировки $U_{\text{аэ1}}$ передаётся в блок управления инвертора (БУИ) через оптопару, выключенное состояние которой определяет аварийную ситуацию. Блок силового фильтра предназначен для компенсации индуктивности подводящей сети и фильтрации напряжения звена постоянного тока шин $+L, -L$, что необходимо для нормальной работы блока ИП и блока И.

Трёхфазный транзисторный инвертор напряжения (И) предназначен для преобразования напряжения звена постоянного тока (шин $+L, -L$) в трёхфазную систему синусоидальных напряжений, сдвинутых на 120 эл. град. между собой, регулируемых по амплитуде и частоте огибающей.

Преобразование производится методом широтно-импульсной модуляции на несущей частоте 2–5 кГц. Блок состоит из шести транзисторных ключей, которые управляются по шине управления от блока управления инвертором (БУИ) сигналами $U_{\text{сиг3}}$.

Вторичный источник питания (ИП) предназначен для создания стабилизированного по амплитуде высокочастотного напряжения (30 В / 50кГц) и формирования сигнала блокировки $U_{\text{аэ1}}$ (для блока ВУП).

Источник питается от нестабильного напряжения звена постоянного тока (шины $+L, -L$). Работоспособность источника сохраняется при изменении питающего напряжения от 450 В до 750 В. Высокочастотное напряжение необходимо для питания гальванически развязанных между собой источников постоянного напряжения, расположенных в блоках систем управления инвертором и электроприводом.

Устройство регенерации (УР) предназначено для гашения энергии рекуперации электродвигателя в балластных резисторах при превышении напряжением звена постоянно-

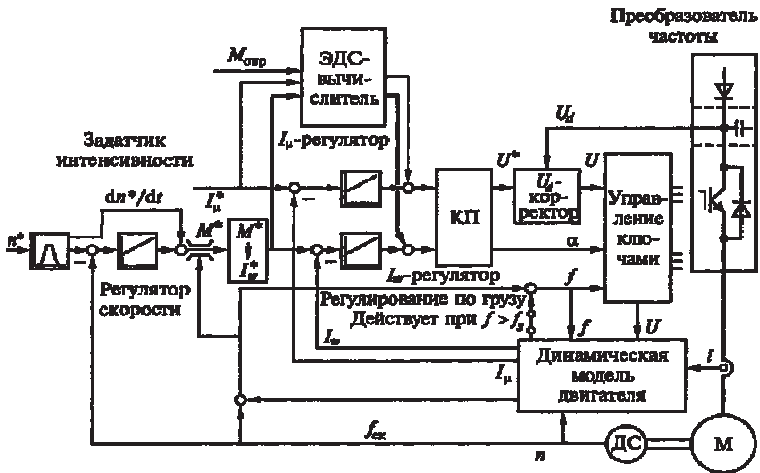


Рис. 3.15. Функциональная схема системы векторного управления с датчиком скорости

В них предусматривается возможность управления одно- и многодвигательными электроприводами, в том числе электроприводами, взаимосвязанными механически по нагрузке. Динамические характеристики таких электроприводов аналогичны динамическим характеристикам электроприводов постоянного тока.

Достигается это управлением составляющими I_ω и I_μ вектора тока, первая из которых пропорциональна моменту двигателя, а вторая – потокоцеплению.

Величины I_ω и I_μ оцениваются по динамической модели двигателя, составленной представлением мгновенных значений переменных в виде результирующих векторов и переходом к вращающимся системам координат. В системе предусматривается возможность ограничивать момент двигателя в соответствии с заданным значением и управлять интенсивностью изменения момента.

Вариант векторного управления электропривода без датчика скорости (см. рис. 3.14) применяется в производствен-

ных механизмах при диапазоне регулирования скорости до 1:10. Применяется в экструдерах и вентиляторах большой мощности, в транспортных и подъемных механизмах, а также в центрифугах.

В механизмах с большим диапазоном регулирования скорости применяется система управления с датчиком скорости (см. рис. 3.15). Области применения те же, что и в электроприводах без датчика скорости при диапазоне регулирования скорости до 1:10000.

Выбор асинхронного электродвигателя

Общие сведения о выборе

Одним из важнейших мероприятий энергосбережения является правильный выбор установленной мощности асинхронного двигателя. Эта задача особенно актуальна при использовании нерегулируемых двигателей.

Известно, что при использовании АД, номинальная мощность которого меньше, чем требуемая по условиям работы механизма, происходит перегрев электрической машины и ее преждевременный выход из строя. При завышении номинальной мощности двигателя по сравнению с требуемой возрастают капитальные затраты на электропривод, не в полной мере используются заложенные в двигатель активные материалы (медь и сталь), снижается КПД и коэффициент мощности АД.

Электропривод должен в наибольшей степени соответствовать условиям работы механизма, приводимого им в движение. Только в этом случае можно обеспечить высокопроизводительную, надежную и экономичную работу технологической установки. Поэтому электропривод проектируется совместно с проектированием рабочей машины и технологического процесса в АПК.

По технико-экономическим соображениям в общем случае электропривод должен удовлетворять ряду требований:

- 1) иметь минимально возможные габариты и массу;
- 2) иметь низкую стоимость;
- 3) обеспечивать высокую надежность работы;
- 4) быть простым в управлении;
- 5) не оказывать вредного влияния на питающую сеть;
- 6) не создавать помех для работы других электропотребителей.

Чтобы выполнить эти требования, необходимо последовательно решить следующие вопросы:

- 1) изучить особенности работы исполнительного механизма и выполнения технологического процесса;
- 2) выбрать тип электрического привода (регулируемый или нерегулируемый);
- 3) выбрать род тока и тип электродвигателя;
- 4) выбрать напряжение и частоту питающей сети;
- 5) произвести расчет мощности и выбрать электродвигатель и передаточный механизм (если он предварительно не задан);
- 6) разработать систему управления, выбрать ее элементы;
- 7) сделать технико-экономическое обоснование выбранного варианта;
- 8) выполнить конструктивную разработку узлов и размещение электрооборудования на промышленной установке.

В установках, где не требуется регулирования скорости по технологическим условиям, обычно применяют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором как наиболее дешевые, надежные в работе и имеющие высокие коэффициент полезного действия и коэффициент мощности.

Вместе с тем, учитывая большие пусковые токи асинхронных короткозамкнутых двигателей, а также удары в ме-

ханической передаче, следует рассмотреть вопрос возможности и целесообразности использования устройств мягкого пуска и торможения. Если по технологическим условиям возможна достаточно длительная работа асинхронного двигателя с небольшими нагрузками, то следует оценить целесообразность применения полупроводникового регулятора напряжения, работающего автоматически в функции загрузки электродвигателя.

В регулируемых электроприводах стремятся применять системы, которые при выполнении технологических требований оказываются экономически более выгодными.

Поэтому чаще всего рассмотрение регулируемых электроприводов ведут в такой последовательности: полюсно-переключаемые асинхронные двигатели, асинхронные двигатели с фазным ротором и реостатным (дискретным или импульсным) регулированием скорости, система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», каскадные схемы.

Определение мощности и выбор электродвигателя является наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования электропривода.

Применение двигателей завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов, связанных со снижением КПД и коэффициента мощности (для АД). Если выбран двигатель недостаточной мощности, то при этом возникают тепловые перегрузки, ускоренное старение изоляции, понижение надежности работы и возможность аварии.

Длительное воздействие нагрузки на двигатель ограничивается допустимым нагревом, а кратковременное – перегрузочной способностью.

Перегрузочная способность двигателя определяется отношением максимального момента M_{\max} , который способен

развивать двигатель хотя бы кратковременно, к номинальному моменту $M_{\text{ном}}$:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}} \quad (3.40)$$

В асинхронном двигателе максимальный (критический) момент M_k зависит от квадрата напряжения. Поэтому допустимый критический момент M_k определяют с учетом возможного снижения напряжения на 10%:

$$M_{k \text{ доп}} = (0,9)^2 \cdot M_k = 0,81 \cdot M_k. \quad (3.41)$$

Перегрузочная способность асинхронных двигателей на естественной механической характеристике составляет $\lambda_{\text{max}} = 1,7 \div 2,5$.

Ограничение по нагреву электродвигателей определяется теплостойкостью их изоляции. В электромашиностроении применяют несколько классов изоляции, каждый из которых имеет определенную предельно допустимую температуру (табл. 3.1). Представленная температура изоляции $\Theta_{\text{пр}}$ каждого класса состоит из температуры охлаждающей среды Θ_0 , превышения температуры τ и запаса $\Delta\Theta$ (рис. 3.16). По стандарту $\Theta_0 = +40 \text{ }^\circ\text{C}$.

При выборе электродвигателей необходимо учитывать целый ряд суждений.

Применяемые в электроприводе электродвигатели разделяются на две группы:

- 1) двигатели, предназначенные для привода механизмов продолжительного режима работы с мало меняющейся нагрузкой;
- 2) двигатели динамических режимов.

При соблюдении установленных ограничений срок службы изоляции электрических машин составляет 15–20 лет. Нагрев изоляции выше предельных значений резко сокращает срок службы электрических машин. Так, для изоляции класса

А увеличение нагрева на каждые 10° свыше 100 °С сокращает срок службы изоляции в 2 раза.

Таблица 3.1

Теплостойкость электроизоляционных материалов электрических машин

Класс изоляции	Предельно допустимая температура, °С	Основные компоненты
A	105	Хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага, шелк
E	120	Синтетические органические пленки
B	130	Слюда, асбест, стекловолокно. Связующие органические
P	155	Слюда, асбест, стекловолокно. Связующие синтетические
H	180	Слюда, асбест, стекловолокно. Связующие кремнийорганические
C	>180	Слюда, керамика, кварц. Связующие неорганические

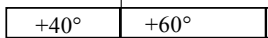
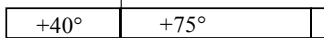
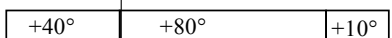
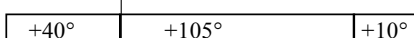
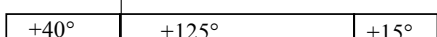
Класс изоляции	$\theta_0, ^\circ\text{C}$	$\tau + \Delta\theta$	$\theta_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$
A	+40°	+60°  $\Delta\theta = 5^\circ$	105
E	+40°	+75°  $\Delta\theta = 5^\circ$	120
B	+40°	+80°  +10°	130
F	+40°	+105°  +10°	155
H	+40°	+125°  +15°	180

Рис. 3.16. Предельные температуры классов изоляции электрических машин

Первая группа электродвигателей предназначена в основном для таких механизмов, как насосы, вентиляторы, компрессоры, воздуходувки, транспортеры, дробилки, су-

шилки, цементные печи и т. п. Для этих механизмов используют электродвигатели общепромышленного применения.

Вторая группа электродвигателей предназначена для механизмов с частыми пусками, торможениями, реверсами и большой частотой включений. В своем большинстве это механизмы кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы (различные подъемники, лебедки, краны, лифты, экскаваторы, манипуляторы и т. д.). Характерной особенностью электродвигателей второй группы является повышенная перегрузочная способность (электрическая и механическая), уменьшенные потери энергии на разгон (меньший диаметр и большая длина ротора), обеспечение большой частоты включений. К этой группе относятся краново-металлургические двигатели переменного тока (например, серии 4МТР (Н), 4МТКР (Н), крановые электродвигатели постоянного тока (например, серий Д, 2Д, ДП), рольганговые двигатели постоянного тока (серии ДС, ДП) и переменного тока (серии АР, 2АР), экскаваторные двигатели постоянного тока (серии ДЭ и ДПЭ), высокомоментные двигатели постоянного тока для механизмов подачи станков (серия 2ПБВ), электродвигатели постоянного тока для промышленных роботов и следящих систем (серии ДР, ПЯ, ДПУ, МИ), вентильные двигатели (серия 2ДВУ).

Электродвигатели выбирают по мощности, скорости, напряжению, току, условиям эксплуатации и монтажа. Выбор двигателей по мощности выполняют в соответствии с нагрузочными диаграммами механизмов и режимами работы.

Скорость электродвигателя выбирается такой, чтобы обеспечить необходимый технологический процесс производственного механизма.

При заданном передаточном числе редуктора или другой передачи этот вопрос решается однозначно. Если передаточное число не задано, то его выбирают оптимальным,

исходя из определенного критерия: быстродействия, минимума потерь, минимума массы редуктор-двигатель и т. □д.

Напряжение электродвигателя выбирается исходя из номинального напряжения источника питания. При известной мощности и напряжении однозначно определяется ток электродвигателя.

При выборе электродвигателя необходимо учитывать условия эксплуатации, под которыми понимают воздействие климатических факторов, а также состояние окружающей среды. Электродвигатели изготавливаются для работы в следующих климатических условиях: умеренном климате (У), умеренном и холодном (УХЛ), тропическом (Т), умеренно холодном морском (М), умеренно холодном и тропическом морском (ОМ). Климатические условия характеризуются максимальной, минимальной и средней температурой. Для умеренного климата эти величины составляют +40 °С, -45 °С и +10 °С, для умеренного и холодного: +40 °С, -60 °С, +10 °С, для тропического: +45 °С, -10 °С, +27 °С, для морского: +40 °С, -40 °С, +10 °С, для тропического морского: +45 °С, -40 °С, +27 °С.

В зависимости от места размещения при эксплуатации электродвигатели различают по категориям размещения: 1 – на открытом воздухе; 2 – под навесом; 3 – в закрытом помещении; 4 – в помещении с искусственным климатом; 5 – в помещении с повышенной влажностью.

Электродвигатели изготавливаются в защитных оболочках, которые обеспечивают защиту обслуживающего персонала, а также самой машины от попадания в нее посторонних предметов. Для обозначения степени защиты применяются латинские буквы *IP* (от английского International Protection) и следующие за ними две цифры. Первая цифра показывает степень защиты от попадания внутрь твердых предметов, а вторая – от попадания воды. Защиту от попадания внутрь

твердых предметов классифицируют таким образом: 0 – защита отсутствует; 1 – защита от твердых предметов размером более 50 мм; 2 – более 12 мм; 3 – более 2,5 мм; 4 – более 1 мм; 5 – защита от пыли; 6 – пыленепроницаемость.

Защита от воды разделяется на: 0 – защита отсутствует; 1 – защита от водяных капель; 2 – от капель при наклоне до 15°; 3 – защита от дождя; 4 – защита от брызг; 5 – защита от водяных струй; 6 – защита от волн; 7 – защита при погружении в воду; 8 – защита при длительном погружении в воду.

В закрытом помещении с нормальной средой электродвигатели обычно имеют исполнение *IP00* или *IP20*, на открытом воздухе – *IP44*, в сырых помещениях – *IP43*.

В пожароопасных зонах могут применяться электродвигатели напряжением до 10 кВ при исполнении *IP44*.

Во взрывоопасных зонах необходимо применять специальное взрывобезопасное оборудование.

Для обозначения конструктивного исполнения по способу монтажа применяют латинские буквы *IM* (от английского International Mounting) и следующие за ними 4 цифры. Первая цифра показывает группу конструктивного исполнения (на лапах, без лап, с фланцем и т. □ д.), вторая и третья – способы монтажа, а четвертая – исполнение конца вала (цилиндрический, конический и др.).

Наиболее распространенными по конструктивному исполнению и способу монтажа являются электродвигатели:

1) с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный (*IM1001*);

2) то же, но с вертикальным валом, направленным вниз (*IM1011*);

3) на лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, вал горизонтальный (*IM2001*);

4) с двумя подшипниковыми щитами, без лап, с фланцем на подшипниковом щите и с горизонтальным валом (*IM3001*);

5) то же, но с фланцем на станине (*IM4001*).

На основании анализа разнообразных реальных режимов работы выделен специальный класс режимов – *номинальные режимы*, для которых проектируются и изготавливаются серийные электродвигатели.

Если двигатель работает в номинальном режиме, то его изготовитель гарантирует установленный срок службы и важнейшие энергетические показатели этой электрической машины. Действующим стандартом предусмотрено 8 номинальных режимов, которые в соответствии с международной классификацией имеют буквенно-цифровое обозначение S1-S8:

1. Продолжительный номинальный режим (S1).
2. Кратковременный номинальный режим (S2).
3. Повторно-кратковременный номинальный режим (S3).
4. Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками (S4).
5. Повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением (S5).
6. Перемежающийся номинальный режим (S6).
7. Перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами (S7).
8. Перемежающийся номинальный режим работы с двумя или более скоростями (S8).

Выбор мощности АД для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой

При циклической переменной нагрузке (режимы S6–S8) мощность электродвигателя определяется методом последовательных приближений.

На первом этапе предварительно выбирают электродвигатель на основе нагрузочной диаграммы механизма, а на втором этапе сначала предварительно проверяют его на со-

ответствие заданному режиму по упрощенной нагрузочной диаграмме электропривода, затем рассчитывают переходные процессы за цикл работы и *окончательно* проверяют электродвигатель по нагреву с помощью какого-либо метода из рассматриваемых ниже: средних потерь, эквивалентного тока, эквивалентного момента.

Метод средних потерь. Принимается допущение о цикличности нагрузочной диаграммы электропривода, которая состоит из отдельных участков с разной величиной нагрузки. Рассматривается установившийся в тепловом отношении режим, когда температура перегрева в начале и в конце цикла одинакова, а на протяжении цикла изменяется относительно среднего значения (рис. 3.17).

В этих условиях выделяемое электродвигателем количество тепла за время цикла $t_{\text{ц}}$ отдается в окружающую среду, т. е.

$$\int_0^{t_{\delta}} \Delta P(t) dt = A \cdot \tau_{\text{н}\delta} \cdot t_{\delta} = \frac{I_{\delta}}{R_T} \cdot t_{\delta}, \quad (3.42)$$

$$\tau_{\text{cp}} = \Theta_{\text{cp}} - \Theta_0; \quad (3.43)$$

где A – теплоотдача; R_T – тепловое сопротивление.

Обе части равенства делят на $t_{\text{ц}}$ (3.42):

$$\frac{\int_0^{t_{\delta}} \Delta P(t) dt}{t_{\delta}} = A \cdot \tau_{\text{нп}}. \quad (3.44)$$

Отсюда следует, что при постоянной величине A теплоотдачи в окружающую среду средние потери мощности ΔP_{cp} пропорциональны средней температуре перегрева τ_{cp} , где

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{1}{t_{\delta}} \int_0^{t_{\delta}} \Delta P(t) dt. \quad (3.45)$$

Для номинального режима можно записать аналогичное равенство

$$\Delta P_{\text{ном}} = A \cdot \tau_{\text{cp}}, \quad (3.46)$$

где $\tau_{\text{ном}} = \tau_{\text{доп}}$

$$\Delta P_{\text{ioi}} = \frac{P_{\text{ioi}}(1 - \eta_{\text{ioi}})}{\eta_{\text{ioi}}}, \quad (3.47)$$

$P_{\text{ном}}, \eta_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, номинальный КПДАД.

На основании (3.44) – (3.45) формулируется *метод средних потерь*: если средние за цикл потери мощности не превышают номинальные потери, т. □ е.

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{ioi}}, \quad (3.48)$$

то средняя температура перегрева не будет превышать допустимую температуру, т. □ е.

$$\tau_{\text{cp}} \leq \tau_{\text{ioi}} = \tau_{\text{ioi}}. \quad (3.49)$$

Чтобы действительная температура не отличалась значительно от средней, необходимо соблюдать условие

$$t_{\delta} \ll T_{\text{н}}, \quad (3.50)$$

где $T_{\text{н}}$ – постоянная времени нагрева.

В общем случае средние потери мощности в электродвигателе за цикл рассчитывают по выражению:

$$\Delta \mathcal{D}_{\text{cp}} = \frac{\sum_{k=1}^q \Delta \mathcal{D}_k \cdot t_k + \sum_{j=1}^r \int_0^{t_j} \Delta P_j(t) dt}{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{ox},i} \cdot t_i}, \quad (3.51)$$

где

$$\Delta P_k = \frac{P_k \cdot (1 - \eta_k)}{\eta_k}, \quad (3.52)$$

$$P_k = M_k \cdot \omega_k, \quad (3.53)$$

$$\Delta P_j(t) = \Delta P_{\text{ioi},j}(t) + \Delta P_{\text{iep},j}(t), \quad (3.54)$$

M_k, P_k – момент и мощность двигателя на k -м участке с установившейся угловой скоростью ω_k ;

η_k – КПД электродвигателя при нагрузке M_k и скорости ω_k ;

q – число участков в цикле с установившейся скоростью двигателя;

r – число пуско-тормозных участков в цикле, когда $\omega = \text{var}$;

$\beta_{\text{ox}, i}$ – коэффициент, учитывающий охлаждение самовентилируемого двигателя при $\omega_i < \omega_{\text{ном}}$ и определяемый по выражению

$$\beta_{\text{ox}} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \sqrt{v}, \quad (3.55)$$

где

$$\beta_0 = \frac{A(\omega = 0)}{A(\omega_{i0i})} = \frac{R_T(\omega_{i0i})}{R_T(\omega = 0)}, \quad (3.56)$$

$$v = \frac{\omega}{\omega_{i0i}}, \quad (3.57)$$

$A(\omega = 0), A(\omega_{i0i})$ – теплоотдача соответственно при неподвижном роторе и вращающемся с номинальной скоростью;

n – общее число участков в цикле:

$$n = q + r; \quad (3.58)$$

$\Delta P_j(t)$ – потери мощности в переходном процессе электродвигателя на j -м участке в момент времени t ;

t_i – продолжительность i -го участка цикла, на котором угловая скорость ω_0 принимается постоянной или равной среднему значению.

Если в переходном процессе электропривода скорость двигателя изменяется от нуля до установившегося значения, примерно равного номинальному значению, или наоборот, то коэффициент охлаждения рассчитывается по средней скорости

$$\beta_{\text{ox}} = \alpha = \frac{1 + \beta_0}{2}, \quad (3.59)$$

где β_0 определяется по (3.56).

КПД электродвигателя η_k при частичной нагрузке M_k \square
 $\square M_{\text{НОМ}}$ в зависимости от способа регулирования скорости определяется в соответствии с положениями подраздела 3.7.

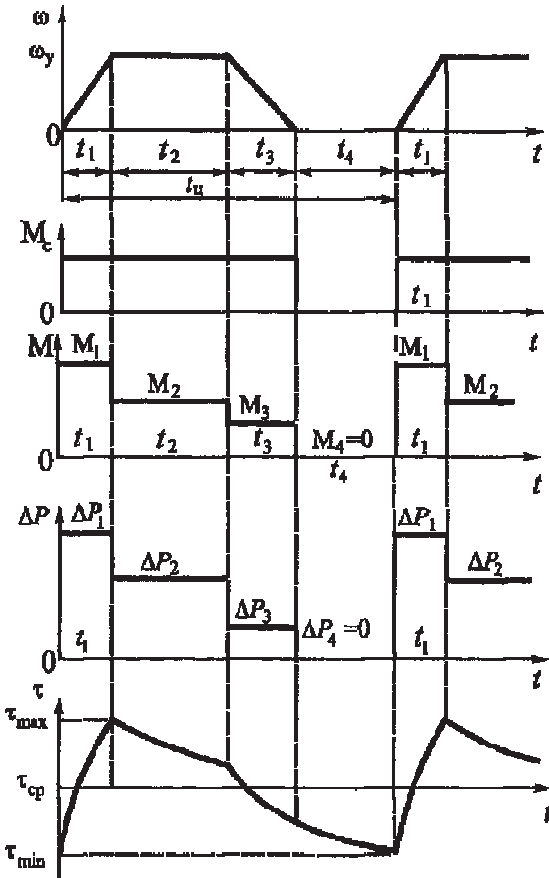


Рис. 3.17. Метод средних потерь

Проверка нагрева электродвигателя методом средних потерь осуществляется по (3.48), где средние потери мощности вычисляются по (3.51).

Для использования метода средних потерь необходимо иметь зависимость КПД электродвигателя от коэффици-

циента загрузки при данной скорости, что, в свою очередь, требует расчета коэффициента постоянных потерь a . Кроме того, необходимо рассчитывать постоянные и переменные потери мощности в переходных процессах электропривода, что связано с необходимостью знания всех параметров электродвигателя. Поэтому, несмотря на свою универсальность, метод средних потерь имеет ограниченное применение.

В практических расчетах прибегают к более удобным методам эквивалентных величин: эквивалентного тока, эквивалентного момента и эквивалентной мощности.

Метод эквивалентного тока. Метод основан на замене действительной переменной величины тока мнимой постоянной величиной тока, вызывающей такой же нагрев двигателя, что и реальный переменный ток. Потери мощности в двигателе ΔP представляют в виде суммы постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$ и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь, т.е.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ioнo}} + \Delta P_{\text{ier}} = \Delta P_{\text{ioсo}} + N \cdot I^2 \cdot R, \quad (3.60)$$

где N – коэффициент, который учитывает число обмоток в двигателе, по которым протекает ток I ;

R – сопротивление одной обмотки.

При циклической нагрузке средние потери мощности выражаются (3.51).

Если выразить потери на каждом участке графика нагрузки через постоянные и переменные, а переменные потери в средней мощности – через эквивалентный ток, то

$$\Delta D_{\text{инo}} + N \cdot I^2 \cdot R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{ioнo}} + N \cdot I_i^2 \cdot R) \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{ox},i} \cdot t_i}. \quad (3.61)$$

По определению, постоянные потери не зависят от нагрузки, поэтому их можно сократить в левой и правой ча-

стях равенства (3.61), приняв для них $\beta_{\text{ок}} = 1$. Тогда остается выражение

$$N \cdot I_{\dot{y}}^2 \cdot R = \frac{\sum_{i=1}^n N \cdot I_i^2 R \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{ок},i} \cdot t_i}. \quad (3.62)$$

Допущение, что сопротивление R обмоток двигателя не зависит от тока (фактически такая зависимость имеется, так как сопротивление зависит от температуры, а температура зависит от тока), позволяет сократить левую и правую части выражения (3.62) на коэффициент $N \cdot R$. В результате получается формула для вычисления эквивалентного тока АД:

$$I_{\dot{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{ок},i} \cdot t_i}}. \quad (3.63)$$

При переходе к пределам в (3.63)

$$I_{\dot{y}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} I^2(t) dt}{\int_0^{t_0} \beta_{\text{ок},i}[\omega(t)] dt}}. \quad (3.64)$$

где $\beta_{\text{ок}}$ выражается через (3.55) и является функцией скорости ω ротора двигателя, которая, в свою очередь, зависит от времени t в пределах цикла.

В частности, при независимой вентиляции ($\beta_{\text{ок}} = 1$)

$$I_{\dot{y}} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} I^2(t) dt}. \quad (3.65)$$

Предварительно выбранный двигатель, работая в расчетном режиме, не будет перегреваться, если

$$I_{\dot{y}} \leq I_{\text{нн}}. \quad (3.66)$$

Кривая тока $I(t)$ обычно представляет сложную зависимость, которая только в отдельных случаях позволяет аналитически вычислить величину эквивалентного тока по (3.64) или (3.65). Чаще всего приходится осуществлять приближенное интегрирование кривой тока, разбивая ее на ряд элементарных фигур: трапеций, треугольников и прямоугольников. Наиболее общей элементарной фигурой является трапеция, поэтому находят эквивалентный ток для трапеции (рис. 3.18). На интервале времени t_1 ток двигателя изменяется по линейному закону

$$I = I_1 + b \cdot t, \quad (3.67)$$

где

$$b = \frac{I_2 - I_1}{t_1} = \frac{\Delta I}{t_1}. \quad (3.68)$$

Эквивалентное значение тока $I_{\text{экв}}$ за время t_1 определяется выражением

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} I^2(t) dt}. \quad (3.69)$$

Продифференцировав (3.69), получают

$$dI = b \cdot dt,$$

откуда

$$dt = \frac{dI}{b} = \frac{t_1}{I_2 - I_1} dI. \quad (3.70)$$

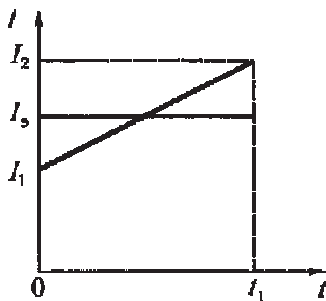


Рис. 3.18. Определение эквивалентного тока трапеции

Теперь имеются новые пределы интегрирования: I_1 и I_2 . Подставляя их в (3.70) и (3.69), находят эквивалентный ток трапеции:

$$I_{\dot{y},\text{трап}} = \sqrt{\frac{1}{I_2 - I_1} \int_{I_1}^{I_2} I^2 dI} = \sqrt{\frac{I_2^3 - I_1^3}{3(I_2 - I_1)}} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_1 \cdot I_2 + I_1^2}{3}}. \quad (3.71)$$

Для треугольника $I_1 = 0$, тогда

$$I_{\dot{y},\Delta} = \frac{I_2}{\sqrt{3}} \quad (3.72)$$

В прямоугольнике $I_1 = I_2$, поэтому эквивалентный ток прямоугольника

$$I_{\dot{y},\text{пря}} = I_2. \quad (3.73)$$

Следует заметить, что для прямоугольника эквивалентное, среднее и максимальное значения совпадают.

Таким образом, сложную кривую тока $I(t)$, полученную в результате расчета переходных процессов за цикл, разбивают на ряд трапеций, треугольников и прямоугольников (рис. 3.19).

В свою очередь, трапеции и треугольники приводятся к эквивалентным прямоугольникам, как показано выше, так что эквивалентное значение тока всей диаграммы за цикл рассчитывается по формуле

$$I_{\dot{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_{\dot{y},i}^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{\text{ок},i}(\omega_i) \cdot t_i}}, \quad (3.74)$$

где $\beta_{\text{ок},i}(\omega_i)$ – коэффициент охлаждения, соответствующий скорости ω_i на i -м участке токовой диаграммы.

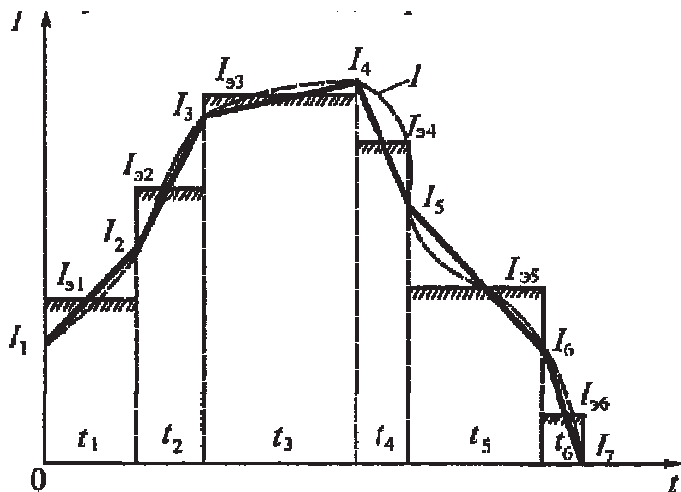


Рис. 3.19. Приближенное определение эквивалентного тока с помощью сложной кривой

Если для рассчитанного по (3.74) эквивалентного тока условие (3.66) соблюдается, то двигатель правильно выбран по нагреву. Затем выбранный двигатель проверяется на перегрузочную способность по току

$$\frac{I_{\max}}{I_{\text{доп}}} \leq \lambda_{\text{доп}}, \quad (3.75)$$

где I_{\max} — максимальное значение тока на диаграмме $I(t)$;
 $\lambda_{\text{доп}}$ — допустимая перегрузочная способность АД по току.

Понятно, что метод эквивалентного тока можно применить, если имеется рассчитанная (или экспериментально снятая) токовая диаграмма за цикл работы электропривода.
Метод эквивалентного момента. Метод эквивалентного момента применим для электроприводов асинхронных двигателей, когда магнитный поток можно считать примерно постоянным. Его достоинство заключается в том, что определение эквивалентного момента не связано с пара-

метрами двигателя, так как упрощенную нагрузочную диаграмму электропривода можно построить по данным исполнительного механизма.

Аналогично (3.64) можно записать общее выражение для эквивалентного момента:

$$M_{\dot{\gamma}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} M^2(t) \cdot dt}{\int_0^{t_0} \beta_{\text{ox}}[\omega(t)] \cdot dt}}, \quad (3.76)$$

которое при $\beta_{\text{ox}} = 1$ принимает вид

$$M_{\dot{\gamma}} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} M^2(t) \cdot dt}. \quad (3.77)$$

При этом приближенное интегрирование кривой $M(t)$ осуществляется таким же образом, как и кривой тока.

Предварительно выбранный электродвигатель, работая в расчетном режиме, не будет перегреваться, если

$$M_{\dot{\gamma}} \leq M_{\text{ном}}. \quad (3.78)$$

Методом эквивалентного момента нельзя пользоваться при переменном магнитном потоке (асинхронные короткозамкнутые двигатели, работающие в пуско-тормозных режимах).

После проверки двигателя по нагреву выполняют проверку его на перегрузочную способность:

$$\frac{I_{\text{max}}}{M_{\text{ioi}}} \delta \leq \lambda_{\text{л}}, \quad (3.79)$$

где M_{max} — максимальное значение момента двигателя в цикле работы;

$\lambda_{\text{л}}$ — допустимая перегрузочная способность двигателя по моменту.

Расчет силовой части электропривода

Функцию выпрямления выполняет неуправляемый выпрямитель, обычно собранный по трёхфазной мостовой схеме. Выпрямленное напряжение сглаживается емкостным (реже L–C) фильтром. Ёмкость фильтра C_ϕ дополнительно выполняет следующие функции: накопителя энергии, возвращаемой электродвигателем в тормозном режиме и реактивной проводимости в цепи обратного тока.

Расчёт силового фильтра выполняется аналогично вышеприведенным пунктам.

Расчёт неуправляемого выпрямителя (трёхфазный диодный мост) направлен на определение и выбор силовых элементов – диодов. Диоды выбираются по следующим параметрам:

– по максимально допустимому обратному напряжению $U_{обр\ max}$;

– по максимальному допустимому среднему току $I_{пр\ max}$.

Максимальное амплитудное напряжение на диоде:

$$U_{max} = \sqrt{2} \cdot k_{\zeta 1} \cdot U_{\bar{e}}, \quad (3.80)$$

где $k_{\zeta 1} = 1,3 \dots 1,5$ – коэффициент запаса по напряжению;

$U_{\bar{e}}$ – линейное напряжение.

Средний ток через диод для трёхфазной мостовой схемы:

$$I_{cp} = \frac{\lambda \cdot I_{\bar{e}}}{3}. \quad (3.81)$$

Средний ток, приведенный к классификационным параметрам диода:

$$I_{\bar{e}d} = k_{\zeta i} \cdot I_{cp}, \quad (3.82)$$

где $k_{\zeta i} = 1,5 \dots 2$ – коэффициент запаса по току.

По полученным данным выбираются диоды таким образом, чтобы были выполнены условия

$$U_{\bar{e}d\ max} > U_{max}, \quad (3.83)$$

$$I_{i0 \max} > I_{i0}. \quad (3.84)$$

На рис. 3.20 представлена силовая часть схемы частотно-регулируемого электропривода.

Расчёт балластного резистора устройства регенерации

Расчёт балластного резистора проводится из условия равенства энергии запасаемой в конденсаторе, энергии электропривода и энергии, используемой на нагрев балластного сопротивления:

$$\frac{C \cdot \Delta U^2}{2} + I^2 \cdot R \cdot t_r = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (3.85)$$

где $\Delta U^2 = U_{\max} - U_{\min} = 750 - 450 = 300 \text{ В}$;

$$R = \frac{J \cdot \omega^2}{2 \cdot I^2} - \frac{C \cdot \Delta U^2}{2 \cdot I^2}; t_r \approx J \cdot \frac{\omega_i}{\lambda \cdot M_i}.$$

Выбор транзисторов и шунтирующих диодов

Выбор транзисторов производится по следующим параметрам:

- по максимальному току перехода эмиттер–коллектор в открытом состоянии через транзистор $I_{к. \max}$;

- по максимальному напряжению перехода эмиттер–коллектор транзистора $U_{кэ. \max}$.

Кроме того, необходимо выбирать транзисторы с минимально возможным временем включения и выключения для обеспечения максимально возможной частоты коммутации.

Выбор и проверка тиристоров

Выбор и проверка тиристоров, принятых к установке в преобразователе, производятся в соответствии с методикой, изложенной в работе [15], по трем параметрам: по среднему току, максимальному амплитудному значению напряжения на тиристоре и ударному току внутреннего короткого замыкания (КЗ).

Максимальное напряжение на тиристоре (U_{\max}) должно быть меньше повторяющегося напряжения тиристора.

Для нахождения ударного тока внутреннего короткого замыкания (КЗ на стороне постоянного тока, якорная цепь двигателя и реакторы вне цепи) определяется амплитуда базового тока [34]:

$$I_{KT} = \frac{U_{2\delta\delta}}{\sqrt{X_{2k}^2 + R_{2k}^2}} \quad (3.90)$$

где $U_{2\delta\delta} = \sqrt{2} \cdot U_{2\delta}$ – амплитуда фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора;

$X_{2k} = X_T + X_{2kc}$, $R_{2k} = R_T + R_{2kc}$ – приведенные к вторичной обмотке трансформатора реактивное и активное сопротивления одной фазы трансформатора и питающей сети. При мощности электропривода меньше 500 кВт сопротивлениями X_{2kc} , R_{2kc} питающей сети можно пренебречь.

Ударный ток внутреннего короткого замыкания находится по формуле

$$I_{\delta\delta} = i_{\delta\delta} \cdot I_{KT}, \quad (3.91)$$

где $i_{\delta\delta}$ берется из справочников в зависимости от $\text{ctg } \varphi = R_{2k} / X_{2k}$.

Если тиристорный преобразователь подключается к сети через анодные реакторы и мощность электропривода меньше 500 кВт, то X_{2kc} и R_{2kc} представляет собой реактивное и активное сопротивление этих реакторов. Величина ударного тока для этого случая, т.е. $i_{\delta\delta}$, определяется в зависимости от $\text{ctg } \phi = R_{2k} / X_{2k}$ при $60^\circ < \nu < 180^\circ$.

Тиристор будет удовлетворять требованиям, если ток внутреннего короткого замыкания в преобразователе будет меньше $I_{\delta\delta}$ ударного тока тиристора, т.е.

$$I_{\delta\delta} > I_{\delta\delta}. \quad (3.92)$$

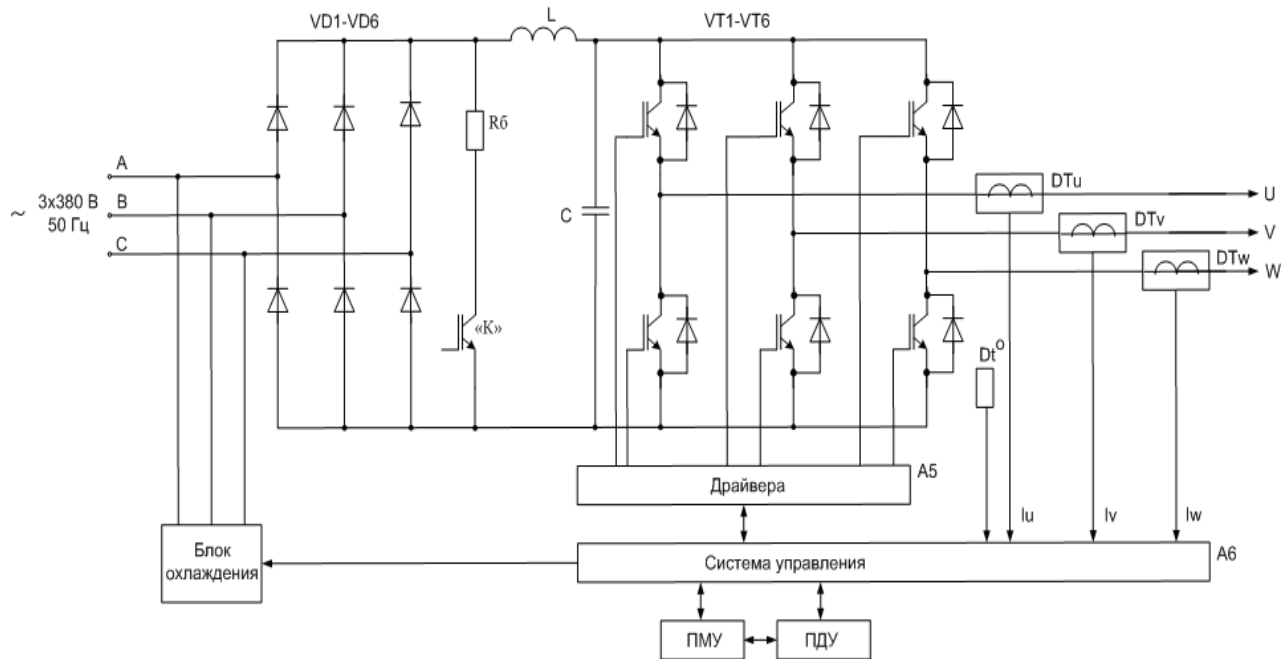


Рис. 3.20. Силовая часть схемы частотно-регулируемого электропривода

По основным соотношениям (3.87), (3.88), (3.92) выбирается тип тиристора (прил. Е), а при использовании в электроприводе типового тиристорного преобразователя необходимо сделать заключение о загрузке установленных тиристорov в преобразователе.

Выбор схемы управления силовыми ключами

Для управления силовыми ключами применяют драйверные микросхемы. Драйвер представляет собой микросхему в стандартном корпусе. Входным сигналом служит сигнал управления стандартной амплитуды логического уровня. На выходе драйвера – напряжение управления транзистором. В драйвере создан эквивалент гальванической развязки, имеются дополнительные функции – вход, отключения, защита от пониженного напряжения питания, фильтр коротких управляющих импульсов.

Варианты схем драйверов производства MITSUBISHI ELECTRIC представлены на рис. 3.21, 3.22.

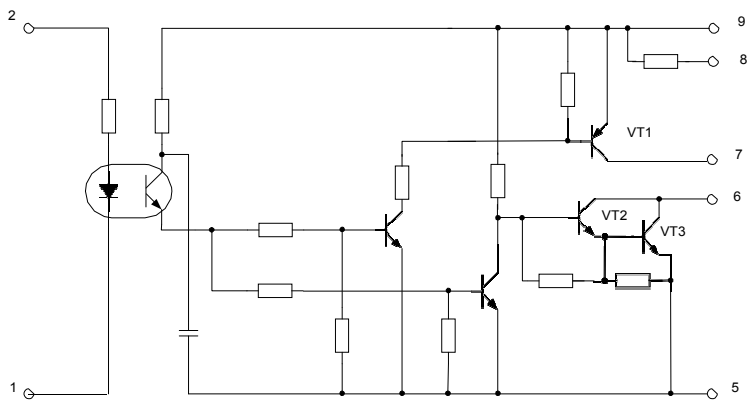


Рис. 3.21. Функциональная схема драйвера M57915L

Параметры драйверной микросхемы M57915L:

- максимальное напряжение на выходе относительно общего провода на оптопаре 2500 В;
- максимальное напряжение на управляющем выходе не более 7 В;

- максимальный ток управления 3 А;
- время включения $t_{\text{вкл}} = 120 \text{ нс}$;
- время выключения $t_{\text{выкл}} = 120 \text{ нс}$;
- диапазон рабочих температур $(-25 \dots +100) \text{ }^\circ\text{C}$.

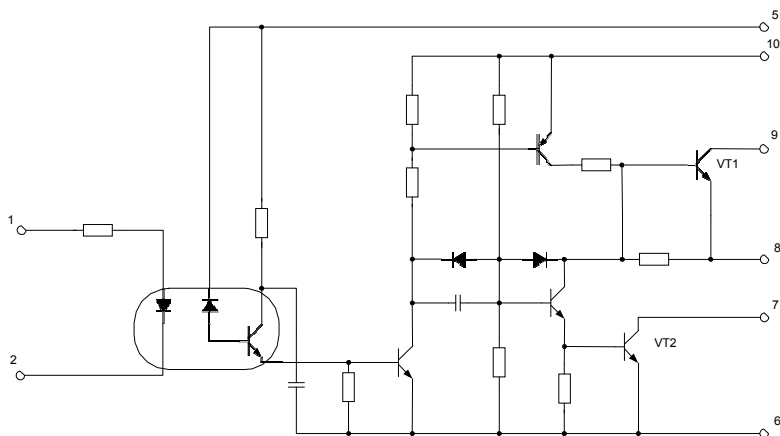


Рис. 3.22. Функциональная схема драйвера M57955L

Параметры драйверной микросхемы M57955L:

- максимальное напряжение на выходе относительно общего провода на оптопаре 2500 В;
- максимальное напряжение на управляющем выходе не более 7 В;
- максимальный ток управления 1,3 А;
- время включения $t_{\text{вкл}} = 150 \text{ нс}$;
- время выключения $t_{\text{выкл}} = 1000 \text{ нс}$;
- диапазон рабочих температур $(-25 \dots +100) \text{ }^\circ\text{C}$.

Расчет параметров регуляторов

Расчет параметров регуляторов трехканального замкнутого контура регулирования фазных токов

Трёхканальный замкнутый контур регулирования фазных токов статора предназначен для отработки задающих воздействий на трёхфазные токи статора. В структурной

схеме одного контура регулирования фазного тока, представленной на рис. 3.23, используются следующие обозначения: РФТ – регулятор фазных токов; ПЧ – преобразователь частоты; статор АД – фазная обмотка статора.

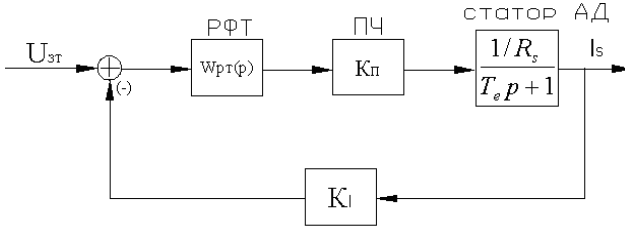


Рис. 3.23. Структурная схема контура регулирования фазного тока статора

При построении контура регулирования тока возможно применение разных вариантов регуляторов тока.

Случай 1. Регулятор тока – пропорциональный с коэффициентом пропорциональности $K_{пр}$.

Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W_{\text{ЭО}}(\delta) = \frac{K_{\dot{y}}}{\delta \dot{y} \cdot \delta + 1}. \quad (3.93)$$

где $\hat{E}_{\dot{y}} = \frac{\hat{E}_{\delta\delta} \cdot \hat{E}_{\dot{\gamma}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} \right)}{1 + \hat{E}_{\delta\delta} \cdot \hat{E}_{\dot{\gamma}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} \right)}$ – эквивалентный коэффициент усиления;

$$T_{\dot{y}} = \frac{\hat{E}_{\delta\delta} \cdot \hat{E}_{\dot{\gamma}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} \right)}{1 + \hat{E}_{\delta\delta} \cdot \hat{E}_{\dot{\gamma}} \cdot \left(\frac{1}{R_s} \right)}$$

– эквивалентная постоянная времени апериодического звена.

Исходя из требований к динамике, задаются полосой пропускания контура тока $\Omega_{\text{крт}}$; обычно задаются данным параметром таким образом, чтобы полоса пропускания контура тока была в несколько раз выше, чем полоса пропускания контура скорости и не менее чем в 3–4 раза ниже

по сравнению с частотой широтно-импульсной модуляции транзисторного инвертора.

Полоса пропускания для апериодического звена связана с постоянной времени следующим соотношением:

$$\Omega_{\text{epo}} = \frac{1}{\dot{O}_y}. \quad (3.94)$$

Из (3.94) находится коэффициент усиления регулятора тока:

$$K_{\text{do}} = \frac{\Omega_{\text{eoo}} \cdot \dot{O}_a - 1}{\hat{E}_i \cdot (1/R_s) \cdot K_I}. \quad (3.95)$$

Случай 2. Регулятор тока – пропорционально-интегральный.

Выбирается передаточная функция регулятора следующего вида:

$$W_{\text{do}}(p) = \hat{E}_{\text{do}} \cdot \frac{\dot{O}_a \cdot \delta + 1}{\dot{O}_a \cdot \delta}. \quad (3.96)$$

Определению подлежит коэффициент передачи K_{pr} . Передаточная функция замкнутого контура тока:

$$W_{\text{eo}}(p) = \frac{1 / \hat{E}_I}{\dot{O}_y \cdot \delta + 1}, \quad (3.97)$$

где $T_y = \frac{\dot{O}_a}{\hat{E}_{\text{do}} \cdot \hat{E}_{\dot{y}} \cdot (\sqrt{R_s}) \cdot K_I}$ – эквивалентная постоянная контура тока для данного варианта регулятора.

Как и в предыдущем случае, задаются полосой пропускания контура тока $\Omega_{\text{крт}}$ и находят параметр $K_{\text{пр}}$:

$$\hat{E}_{\text{do}} = \frac{\Omega \cdot \dot{O}_e}{\hat{E}_{\dot{y}} \cdot (1/R_s) \cdot K_I}. \quad (3.98)$$

Случай 3. Регулятор тока – релейный, в цепи обратной связи для задания частоты автоколебаний в контуре постав-

лен фильтр (рис. 3.24). Такое построение, например, имеет контур тока электропривода типа РАЗМЕР.

В [26] указано, что частота автоколебаний (реального скользящего режима) в таком контуре тока равна:

$$f_{\text{н\acute{e}}}^2 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2} \cdot \frac{2 \cdot \xi \cdot T + \dot{\Delta}_e}{\dot{\Delta}_a \cdot \dot{\Delta}_\delta} \quad (3.99)$$

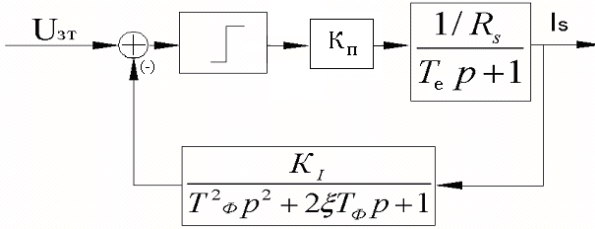


Рис. 3.24. Структурная схема релейного регулятора тока

Максимальная амплитуда колебаний тока A_{max} :

$$A_{\text{max}} = \frac{4 \cdot U_0}{\pi \cdot R_s} \cdot \frac{T_\delta}{2 \cdot \xi \cdot \dot{\Delta}_s} \quad (3.100)$$

где U_0 – напряжение в звене постоянного тока силовой части электропривода.

Задавшись частотой автоколебаний в контуре, находят из соотношения (3.99) постоянную времени фильтра. Коэффициент демпфирования ξ обычно выбирают равным 0,707. Затем по формуле (3.100) делают оценку максимальной амплитуды пульсации тока статора.

Синтез регулятора скорости

При синтезе регулятора скорости инерционностью контуров регулирования тока можно пренебречь, если обеспечить разнесение полос пропускания:

$$\Omega_{\text{\acute{e}pc}} \ll \Omega_{\text{\acute{e}p\delta}} \quad (3.101)$$

В этом случае система автоматического управления может быть представлена в виде рис. 3.25.

На схеме рис. 3.25 обозначено:

– механическая постоянная времени:

$$\dot{\omega}_i = J \cdot \frac{\omega_i}{T_M}; \quad (3.102)$$

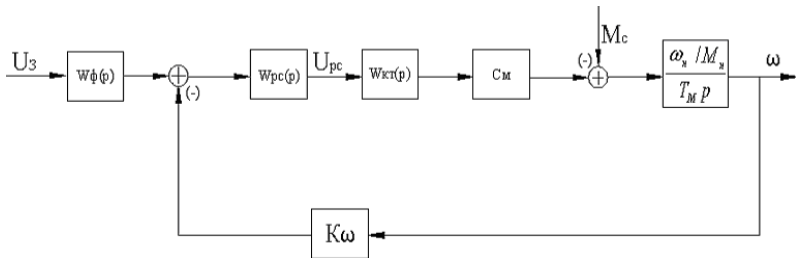


Рис. 3.25. Схема контура регулирования скорости

– передаточная функция замкнутого контура тока, равная

$$W_{\omega\omega}(\delta) = 1/K_I; \quad (3.103)$$

– коэффициент пропорциональности между током статора и моментом двигателя:

$$C_i = \frac{\hat{I}_i}{I_{s i}}; \quad (3.104)$$

– коэффициент обратной связи по скорости:

$$\hat{E}_\omega = \frac{U_{c \max}}{\omega_i}; \quad (3.105)$$

Задаются видом регулятора скорости. Пусть это ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\delta\hat{n}}(p) = \hat{E}_\omega \cdot \frac{\delta + 1}{\delta}; \quad (3.106)$$

Искомыми в этом случае являются параметры регулятора T_c и K_c .

Передаточная функция замкнутого контура скорости будет иметь вид:

$$W_{\omega}(p) = \frac{1 / \hat{E}_{\omega} \cdot (T_{\dot{n}} \cdot \delta + 1)}{\frac{\dot{O}_{\dot{i}} \cdot \hat{E}_I}{\hat{E}_{\dot{n}} \cdot \tilde{N}_{\dot{i}} \cdot \hat{E}_{\omega} \cdot \omega_{\dot{i}} / \tilde{I}_{\dot{i}}} \cdot \delta^2 + \dot{O}_{\dot{n}} \cdot \delta + 1} \quad (3.107)$$

Нормированная передаточная функция имеет вид:

$$W_n(p) = \frac{1 / \hat{E}_{\omega}}{\dot{O}_{\dot{\delta\delta n}}^2 \cdot \delta^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{\dot{\delta\delta n}} \cdot \delta + 1} \quad (3.108)$$

Приравнивая знаменатели передаточных функций (3.90) и (3.91), получают систему уравнений для определения параметров регулятора:

$$\dot{O}_c = 2 \cdot \xi \cdot \dot{O}_{\dot{\epsilon}pc}, \quad (3.109)$$

$$\dot{O}_{\dot{\delta\delta n}} = \sqrt{\frac{T_{\dot{i}} \cdot \hat{E}_I}{\hat{E}_{\dot{n}} \cdot \tilde{N}_{\dot{i}} \cdot \hat{E}_{\omega} \cdot \omega_{\dot{i}} / \tilde{I}_{\dot{i}}}} \quad (3.110)$$

Коэффициент демпфирования принимают $\xi = 0,707$, что соответствует настройке на фильтр Баттерворта.

Второе уравнение используется для определения K_c при известном $T_{крс}$:

$$T_{\dot{\delta\delta n}} = \frac{1}{\Omega_{\dot{\delta\delta n}}} \quad (3.111)$$

Для компенсации числителя передаточной функции (133) на входе САУ устанавливается апериодический фильтр с передаточной функцией

$$W_{\delta}(p) = \frac{1}{T_{\dot{n}} \cdot \delta + 1} \quad (3.112)$$

В том случае, когда $\Omega_{\text{эрс}} \ll \Omega_{\text{эрд}}$ не выполняется и пренебречь инерционностью контура тока статора нельзя, для расчёта параметров регулятора скорости можно воспользоваться классической методикой расчёта систем подчинённого регулирования.

Передаточная функция контура тока, как это следует из (3.93) и (3.97), равна:

$$W_{\text{эо}}(p) = \frac{1 / \hat{E}_l}{\hat{O}_y \cdot \delta + 1}. \quad (3.113)$$

Задаются настройкой контура скорости, соответствующей симметричному оптимуму:

$$W_{\text{со}}(p) = \frac{1 / k_{\omega}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{(4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p}, \quad (3.114)$$

где T_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени.

Тогда передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{1 / K_{\omega}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{(4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p} \times \frac{(T_y \cdot p + 1) \cdot T_{\bar{1}} \cdot \delta}{(1 / \hat{E}_l) \cdot C_{\bar{1}} \cdot \frac{\bar{I}_{\bar{1}}}{\omega_{\bar{1}}}}. \quad (3.115)$$

При условии $T_{\mu} = T_y$,

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{1 / \hat{E}_l \cdot (4 \cdot T \cdot \delta + 1) \cdot T}{\omega_{\bar{1}}} \cdot \frac{8 \cdot T_y^2 \cdot (1 / \hat{E}_l) \cdot \bar{N}_{\bar{1}} \cdot \frac{\omega_{\bar{1}}}{\bar{I}_{\bar{1}}}}{\bar{I}_{\bar{1}}}. \quad (3.116)$$

Так как при настройке на симметричный оптимум получается большое перерегулирование по управляющему воздействию, то на входе контура скорости должен быть поставлен фильтр.

4 ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЫБОР УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ

На основании каталогов, технических описаний на типовые тиристорные преобразователи комплектных электроприводов производится описание основных устройств управления, защит и блоков питания. Основными элементами системы управления являются: система импульсно-фазового управления, устройство ограничения углов, логика управления совместно с датчиками тока или датчиками состояния тиристоров при раздельном управлении реверсивными группами, устройства ограничения тока двигателя. Здесь же приводятся регулировочная характеристика системы управления, которой является зависимость угла регулирования от напряжения управления, и регулировочная характеристика собственно преобразователя с учетом ограничения α_{\min} , α_{\max} . Эти характеристики необходимы для расчета коэффициента усиления управляемого преобразователя. Современные преобразователи предусматривают следующие виды защит: защита от аварийных токов, защита от длительной перегрузки, как в переходных, так и в квазиустановившихся режимах от перенапряжений, защита от работы на пониженном напряжении, а также блокировки: от пропадания фаз, неправильного чередования фаз, отключения вентиляции, работы на ползучих скоростях и т. д.

Защита от аварийных токов производится автоматическими выключателями [3] или плавкими предохранителями, защита от длительной перегрузки в квазиустановившемся режиме – автоматическими выключателями, а также быстродействующими устройствами защиты, воздействующими на СИФУ с целью сдвига управляющих импульсов к границе инверторного режима и прекращения подачи их в дальнейшем. Выбор автоматических выключателей и плавких вставок предохранителей для защиты параллельно вклю-

ченных тиристорных силовых плеч производится по условиям расчетного тока нагрузки защищаемой цепи с учетом пусковых токов электропривода из каталогов (прил. Г).

Элементы защиты преобразователя от коммутационных перенапряжений могут быть рассчитаны по соотношениям, приведенным в работах [4, 14], или могут быть приняты с параметрами, приведенными в информационных материалах заводов-изготовителей тиристорных преобразователей.

5. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ И ЕЕ ОПИСАНИЕ

Разработанная принципиальная схема должна обеспечивать требуемые режимы работы автоматизированного электропривода: пуск, реверс, торможение и предусматривать устройства защиты, задания скорости, блокировки, сигнализации, подключения обмотки возбуждения двигателя и тахогенератора, а также контрольно-измерительной аппаратуры. Принципиальная схема выполняется по всем требованиям ГОСТа на электрические схемы.

Систему управления преобразователем следует приводить в виде блок-схемы, но с обязательным указанием функциональных связей между отдельными ее элементами.

В расчетно-пояснительной записке выпускной квалификационной бакалаврской работы приводится: краткое описание работы электропривода по принципиальной схеме при пуске и торможении, работа защитных устройств и их типы, а также тип контрольно-измерительной аппаратуры.

6. СПЕЦИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В спецификацию электрооборудования в выпускной квалификационной бакалаврской работе включаются все элементы, входящие в комплект поставки типового преобра-

зователя: электродвигатель, тахогенератор, трансформатор, реакторы, автоматические выключатели, пускозащитная аппаратура, реле, командоаппараты, контрольно-измерительная аппаратура, тиристорный преобразователь и т.д., а также устройства и элементы, отличные от принятых в типовом комплектном электроприводе. Это резисторы, конденсаторы и операционные усилители, на которых реализуются регуляторы системы. Спецификация электрооборудования составляется в соответствии с требованиями ЕСКД и подшивается в расчетно-пояснительную записку выпускной квалификационной бакалаврской работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом разделе приводится краткое содержание выполненного объема работ в выпускной квалификационной бакалаврской работе и производится сравнение показателей спроектированного автоматизированного электропривода и требований задания на его разработку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алиев И. И.* Электротехнический справочник / И. И. Алиев. – Изд. 4-е, испр. – М.: РадиоСофт, 2001. – 384 с.
2. *Асинхронные* двигателя серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 156 с.
3. *Андреев Г. И.* Электроприводы главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ / Г. И. Андреев, М. А. Босинзон, А. И. Кондриков. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
4. *Архангельский Н. Л.* Электроприводы постоянного тока с импульсными преобразователями / Н. Л. Архангельский. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 1995. – 123 с.
5. *Башарин А. В.* Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. *Белов М. П.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учеб. для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. *Берестов В. М.* Синтез систем векторного управления асинхронного электропривода типа «Эратон-4М». Система управления транзисторного электропривода «Эратон-4М»: вопросы теории / В. М. Берестов, О. В. Нос. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 230 с.
8. *Браславский И. Я.* Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; под. ред. И. Я. Браславского. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 268 с.
9. *Бургин Б. Ш.* Системы управления электроприводами: лекции для студентов / Б. Ш. Бургин. – Новосибирск: Изд-во НЭТИ, 1991. – 115 с.

10. *Быстродействующие* электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М. Е. Гольц, А. Б. Гурзенко, М. М. Остреров [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
11. *Востриков А. С.* Теория автоматического регулирования: учеб. пособие / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 364 с.
12. *Герман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
13. *Герман-Галкин С. Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
14. *Забродин Ю. С.* Промышленная электроника: учеб. пособие для вузов (энергетической и электромеханической специальностей) / Ю. С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496 с.
15. *Зимин Е. И.* Электропривод постоянного тока с вентильными преобразователями / Е. И. Зимин, В. Л. Кацевич, С. К. Козырев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
16. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г. С. Зиновьев. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
17. *Иванов Г. Я.* Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Г. Я. Иванов, А. Ю. Кузнецов. – Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2010. – 60 с.
18. *Ильинский, Н. Ф.* Основы электропривода: учеб. пособие / Н. Ф. Ильинский. – М.: Изд. центр МЭИ, 2000. – 134 с.
19. *Интегральные* микросхемы: справочник / Б. В. Тарабарин, Л. Ф. Лунин, Ю. Н. Смирнов [и др.]; под ред. Б. В. Тарабарина. – 2-е изд., испр. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 528 с.
20. *Ковчин А. С.* Теория электропривода: учеб. для вузов / А. С. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.

21. *Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков* / Н. В. Донской, А. А. Кириллов, Я. М. Купчан [и др.]; под ред. А. Д. Поздеева. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
22. *Кочергин В. В. Следящие системы с двигателями постоянного тока* / В. В. Кочергин. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
23. *Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования* / М. М. Кацман. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 480 с.
24. *Кисаримов Р. А. Электропривод: справочник*. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. – 352 с.
25. *Лебедев А. М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ* / А. М. Лебедев, Р. Т. Орлова, А. М. Пальцев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
26. *Микеров А. Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентильных двигателей: учеб. пособие*. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 60 с.
27. *Панкратов В. В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие для студентов IV–V курса ЭМФ* / В. В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 78 с.
28. *Реакторы сглаживающие серии СРОМ*. – М.: Информэлектро, 1985. Каталог 03.81.02–85.
29. *Реакторы токоограничивающие типа РТСТ*. – М.: Информэлектро, 1986. Каталог 03.80.04–86.
30. *Семёнов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов* / Б. Ю. Семёнов. – М.: Солон-Р, 2001. – 183 с.
31. *Силовые полупроводниковые приборы: справочник* / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

32. *Симаков Г. М.* Системы автоматического управления электроприводов металлорежущих станков: учеб. пособие / Г. М. Симаков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 300 с. – («Учебники НГТУ»).

33. *Симаков Г. М.* Системы автоматического управления электроприводами: учеб. пособие по курсовому проектированию / Г. М. Симаков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 116 с.

34. *Справочник по автоматизированному электроприводу* / под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

35. *Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами* / под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.

36. *Справочник по электрическим машинам: в 2 т.* / под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

37. *Справочник по преобразовательной технике* / под ред. И. М. Чиженко. – Киев: Техника, 1978. – 447 с.

38. *Устройство управления тиристорное серии БТУ-3601: Техническое описание и инструкция по эксплуатации / ОЛХ 468 153. ОБК 469. 563. Издание 02.*

39. *Усынин Ю. С.* Системы управления электроприводов / Ю. С. Усынин. – Челябинск: ЮурГУ, 2004. – 328 с.

40. *Частотно-регулируемые электроприводы ИРБИ-8.* – Новосибирск: ИРБИС, 2003. – 32 с.

41. *Чернов Е. А.* Электроприводы подачи станков с ЧПУ: справ. пособие / Е. А. Чернов, В. П. Кузьмин, С. Г. Синичкин. – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1986. – 234 с.

42. *Чернов Е. А.* Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: справ. пособие / Е. А. Чернов, В. П. Кузьмин. – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1989. – 320 с.

43. *Шрейнер Р. Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. – 654 с.
44. *Шрейнер Р. Т.* Системы подчиненного регулирования электроприводов. Ч.1: Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во УГППУ, 1997. – 279 с.
45. *Электроприводы* постоянного тока серии ЭПУ: Каталог 08.30.12–79. – М.: Информэлектро, 1980. (Паспорт «Электропривод постоянного тока серии ЭПУ»).
46. *Электроприводы* постоянного тока серии ЭШИР: Каталог 09.150.15–85. – М.: Информэлектро, 1985. (Паспорт «Электропривод постоянного тока серии ЭШИР»).
47. *Электропривод* асинхронный глубокорегулируемый комплектный РАЗМЕР – 2М – 5–2: Техническое описание / ИДАФ.655174.002 ТО.
48. *Электропривод* комплектный ЭШИР-1-А: Техническое описание. Паспорт изделия / ИЕГЕВ 0904565436.
49. *Черных И. В.* SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
50. *Рекомендации* по организации и методике подготовки выпускных квалификационных работ / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост.: Ю. А. Гуськов, Ю. Н. Блынский, П. И. Федюнин. – Новосибирск: Изд. центр ИИ, 2013. – 23 с.
51. *Общие* требования к оформлению курсовых и дипломных проектов (работ). Стандарт предприятия. СТП 01–10: метод. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост.: Г. А. Евдокимова, Ю. И. Евдокимов, Е. В. Петрова, И. К. Языков. – Новосибирск: Изд. центр ИИ, 2010. – 58 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А (справочное)

Технические данные трансформаторов

Тип	$K_{тр}$	$R_a, \text{ Ом}$	$X_a, \text{ Ом}$	$U_k, \%$
ТСТ 1-230/40-М1	1,86	0,069	0,063	2,44
ТСТ 1-230/63-М1	1,82	0,065	0,059	3,8
ТСТ 1-230/100-М1	1,8	0,023	0,065	4,75
ТСТ 1-230/160-М1	1,79	0,014	0,05	5,7
ТСТ 1-230/250-М1	1,79	0,008	0,031	5,3
ТСТ 1-230/320-М1	1,73	0,006	0,033	6,8
ТСТ 1-230/40-Н1	0,82	0,32	0,23	3,4
ТСТ 1-230/63-Н1	0,79	0,14	0,4	5,6
ТСТ 1-230/100-Н1	0,77	0,09	0,3	6,4
ТСТ 1-230/160-Н1	0,79	0,054	0,17	6,0
ТСТ 1-230/250-Н1	0,8	0,02	0,12	6,4

$$U_k = 2 \%, U_1 = 380 \text{ В}$$

Тип	$S_T, \text{ кВА}$	$U_2, \text{ В}$	$P_{xx}, \text{ Вт}$	$P_{кз}, \text{ Вт}$	$I_k, \%$
ТСТ - 6.3	6.3	104	75	175	12
ТСТ - 10	10	200	105	220	10
ТСТ - 16	16	416	120	340	6
ТСТ - 25	25	416	200	380	6

$$U_k = 8 \dots 10 \%, U_{1л} = 380 \text{ В}$$

Тип	$S_T, \text{ кВА}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$	$L, \text{ мГн}$
Т 6Т-2/0.104-04	2,06	60	9	1,97
Т 6Т-4/0.208-04	4,15	120	9	4,75
Т 6Т-8/0.104-04	8,2	60	36	0,675
Т 6Т-16/0.208-04	16,5	120	36	1,42
Т 6Т-20/0.104-04	20,6	60	90	0,218

Приложение Б (справочное)

Технические данные анодных реакторов

Тип	R_a , Ом	X_a , Ом	U_k , %
РС-25/1,9	0,068	0,18	1,9
РС-40/1,4	0,083	0,08	1,4
РС-63/2,3	0,097	0,1	2,3
РС-100/4,5	0,12	0,12	4,5
РС-160/6,3	0,1	0,1	6,3
РС-250/8,2	0,09	0,09	8,2
РС-320/13,5	0,11	0,13	13,5

Приложение В (справочное)

Технические данные сглаживающих дросселей

Тип	I_n , А	L , мГн
ДС-25/1,0	25	1
ДС-32/0,75	32	0,75
ДС-50/0,6	50	0,6
ДС-100/0,2	100	0,2

Приложение Г (справочное)

Технические данные автоматических выключателей

Тип	U_n , В	I_n , А	$I_{пред}$, кА	$t_{откл}$, с
A3700	380	40–630	5–100	0,1–0,4
AE 20000	380	10–100	16	0,02

Приложение Д (справочное)

Технические данные силовых диодов

Тип	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, mA	$I_{ср пр}$, А	$I_{уд}$, кА	$U_{имп}$, В
Д151–125	600–1600	20	125	3	1,5
Д151–160	600–1600	20	160	3,5	1,5
Д151–200	600–1600	20	200	4,3	1,3
Д161–250	600–1800	40	250	5,5	1,6
Д161–320	600–1800	40	320	6,4	1,4
Д161–400	600–1800	40	400	7,5	1,3
Д171–500	600–1800	50	500	14	1,4
Д133–630	1000–3200	50	630	11	2
Д133–800	400–2000	50	800	15	2,7
Д133–1000	400–2000	50	1000	16	2,1

Примечание: $U_{обр}$ – повторяющееся импульсное обратное напряжение;
 $I_{обр}$ – повторяющийся импульсный обратный ток; $I_{ср пр}$ – средний прямой ток;
 $U_{имп}$ – ударный прямой ток.

Приложение Е (справочное)

Технические данные тиристоров

Тип	$U_{\text{пор}}$, В	U_{max} , В	$I_{\text{max,cp}}$, А	$I_{\text{уд}}$, кА	$Pt_{\text{тир}}$, А ² с	(du/dt) , В/мкс
Т 112–10	1,25	100...1200	10	0,15	200	20
Т 112–16	1,2	100...1200	16	0,2	200	20
Т 122–20	1,15	100...1200	20	0,3	613	20
Т 122–25	1,1	100–1200	25	0,35	613	20
Т 142–32	1,25	130–2000	32	0,38	3200	20
Т 131–40	1,05	100–1200	40	0,75	3200	50
Т 131–50	1,03	100–1200	50	0,8	3200	50
Т 141–63	0,95	100–1200	63	1,2	6000	80
Т 151–80	1,1	130–2000	80	1,2	24400	80
Т 151–100	1,15	300–1600	100	2	31200	100
Т 161–125	1,15	300–1600	125	2,5	60000	100
Т 161–160	1,15	300–1600	160	4	80000	100
Т 171–200	1,15	500–1200	200	5,2	135000	160
Т 171–250	1,1	300–1600	250	6	150000	160
Т 171–320	1,05	300–1600	320	7	200000	160
Т 143–400	1,2	400–1600	400	8	260000	160
Т 143–500	1,1	400–1600	500	10	320000	160
Т 143–630	1	400–1200	630	12	440000	160
Т 143–800	1,75	400–1600	800	14	500000	320
Т 143–1000	1,7	100–800	1000	19	640000	320

Примечание: $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение; U_{max} – максимальное обратное напряжение; $I_{\text{max,cp}}$ – максимальный средний ток в прямом направлении; $I_{\text{уд}}$ – ударный ток тиристора; $Pt_{\text{тир}}$ – защитный показатель тиристора, характеризующий термодинамическую стойкость тиристора при кратковременных перегрузках; (du/dt) – максимально-допустимая скорость нарастания напряжения на тиристоре.

Приложение Ж
(справочное)

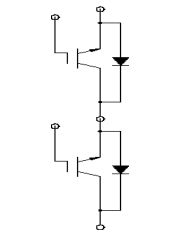
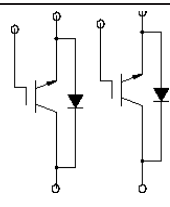
Технические данные IGBT транзисторов

Производитель: MOTOROLA

Тип	$U_{кз}^?$, В	$I_{к}^?$, А	$U_{кз.вкл}^?$, В	$t_{вкл}^?$, мкс
MGP5N60E	600	5	2	10
MGP11N60E	600	11	2	10
MGP15N60U	600	15	1,7	10
MGP15N60	600	20	2,9	3
MGP25N60U	600	25	2,9	2,5
MGW30N60	600	30	2,6	3
MGW40N60U	600	40	1,7	3
MGV12N120D	1200	12	3,7	10
MGY25N120	1200	25	3	10

Технические данные гибридных модулей IGBT

Производитель: MOTOROLA

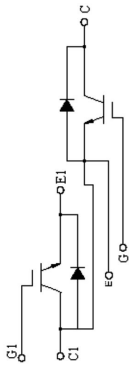
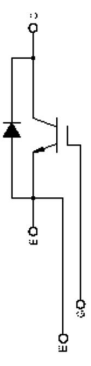
Тип	$U_{кз.маx}^?$, В	$I_{к}^?$, А	$U_{кз.вкл}^?$, В	$t_{вкл}^?$, мкс	Схема
MHRM2A400A60M	600	400	2,5	3	
MPM2A400A120C4	1200	400	3	5	
MPM2A600A120C4	1200	600	3,2	7	

Примечание: В приложении Ж в графе $U_{кз.маx}^?$ приведено максимальное напряжение для данного типа транзисторных модулей; минимальное напряжение 100 В.

Производитель: MITSUBISHI

Тип	$U_{кз. max}^?$ В	$I_{к}^?$ А	$U_{кз. вкл.}^?$ В	$t_{вкл.}^?$ мс	Схема
CM200DU-24H	1200	200	3,2	300	
CM300HA-24H	1200	300	3,4	350	
CM400DU-24H	1200	400	3,5	350	
CM600DU-24H	1200	600	3,2	350	

Производитель: SIEMENS AG

$U_{кз. макс}, В$	$I_k, А$	Схема, тип	Схема, тип
			
600	400	BSM400GB60DN2	
1200	25	BSM25GB120DN2	
1200	35	BSM35GB120DN2	
1200	50	BSM50GB120DN2	
1200	75	BSM75GB120DN2	
1200	100	BSM100GB120DN2	
1200	150	BSM150GB120DN2	
1200	200	BSM200GB120DN2	BSM200GA120DN2
1200	300		BSM300GA120DN2
1200	400		BSM400GA120DN2
1700	50	BSM50GB170DN2	
1700	75	BSM75GB170DN2	
1700	100	BSM100GB170DN2	
1700	150	BSM150GB170DN2	
1700	200		BSM200GA170DN2
1700	300		BSM300GA170DN2

Примечание. $t_{вкл} = 100 \dots 500$ нс, $t_{откл} = 150 \dots 600$ нс.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И СОДЕРЖАНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА	4
2. ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА	6
3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	10
Расчет параметров асинхронного двигателя	10
Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным данным	13
Механические и скоростные характеристики	15
Выбор типа электропривода	18
Примеры систем векторного управления	31
Выбор асинхронного электродвигателя	33
Расчет силовой части электропривода.....	52
Расчет параметров регуляторов.....	58
4. ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЫБОР УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ	65
5. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРО- ПРИВОДОМ И ЕЕ ОПИСАНИЕ	66
6. СПЕЦИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	68
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	73

Симаков Геннадий Михайлович
Кузнецов Андрей Юрьевич
Зонов Павел Владимирович

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебное пособие
по написанию раздела выпускной квалификационной
бакалаврской работы по профилю 110800.02.62 –
Электрооборудование и электротехнологии в АПК

Редактор *Т.К. Коробкова*
Компьютерная верстка *В. Н. Зенина*

Подписано в печать 15 января 2015 г. Формат 60 × 84 ^{1/16}.
Объем 3,9 уч.-изд. л., 5,1 усл. печ. л. Тираж 100 экз.
Изд. № 93. Заказ № 1214.

Отпечатано в Издательском центре «Золотой колос»
Новосибирского государственного аграрного университета
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел. (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru