

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЦИФРОВАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Текст лекций для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Составители:
Е. Н. Ковалев
К. К. Ершов

Санкт-Петербург
2026

Утверждено
на заседании кафедры АЭиЭ
23.06.2026 г., протокол № 10/25-26

Рецензенты: К. Ф. Лобов, О. А. Кундюков

Текст лекций соответствует программе и учебному плану дисциплины «Цифровая техника в электроприводе» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

В тексте лекций рассматривается структура системы управления частотными преобразователями и приводами постоянного тока. Подробно рассмотрены функциональные возможности современных промышленных приводов и способы настройки их параметров.

Текст лекций предназначен для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве текста лекций

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 01.10.2026 г. Рег. № 5027/26

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ. МЕСТО ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	6
1.1. Понятие электропривода. Силовая часть и система управления преобразователей	6
1.2. Функциональные схемы электроприводов.	8
2. ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.	12
2.1. Назначение, типы и структурирование параметров системы управления приводами.....	12
2.2. Структура системы управления приводом. Основные функции управления.....	17
3. СПОСОБЫ ПОДАЧИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.....	19
3.1. Выбор источников управления	20
3.1.1. Управление с панели оператора.....	20
3.1.2. Управление через дискретные входы (клеммы).....	20
3.1.3. Выбор источника команд (локальный/дистанционный режим).....	21
3.1.4. Управление по полевой шине	21
3.2. Выбор источников заданного значения.....	27
3.2.1. Задание от аналоговых входов	28
3.2.2. Задание со встроенной панели управления	30
3.2.3. Фиксированные задания	31
3.2.4. Функция «мотор-потенциометр»	32
3.2.5. Передача задания по шине управления.....	34
4. ПОДГОТОВКА СИГНАЛА ЗАДАНИЯ	35
4.1. Ограничение максимального и минимального значения	37
4.2. Ограничение минимального задания по абсолютной величине.....	37
4.3. Пропуск критических частот.....	37
4.4. Задатчик интенсивности	39
5. ФУНКЦИИ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ	40
5.1. ПИ-регулятор	41
5.1.1. Постоянная интегрирования и интегральный коэффициент регулятора... ..	42

5.1.2. Адаптация параметров ПИ-регулятора	42
5.2. Выбор обратной связи по скорости	44
5.2.1. Тахогенератор постоянного тока	44
5.2.2. Инкрементальный энкодер	45
5.2.3. Расчетное значение фактической скорости	46
5.2.4. Обратная связь по ЭДС	47
5.3. Функция статизма, Droop-function	48
5.4. Компенсация момента сопротивления, момента инерции	50
5.5. Форсировка сигнала обратной связи (SpeedUp функция)	54
6. РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА	56
6.1. Регуляторы тока как регуляторы момента	56
6.1.1. Цепи ограничения заданного момента	57
6.1.2. Настройка ограничений тока в зависимости от частоты вращения	59
6.1.3. Динамическая коррекция в цепи заданного момента	61
6.1.4. Ограничение темпа нарастания тока	63
6.1.5. Предупреждение в контуре регулирования якорного тока	64
6.1.6. Адаптация регулятора тока	66
6.2. Регуляторы тока как регуляторы магнитного потока	70
7. РЕГУЛЯТОР ЭДС	73
8. ТИПОВЫЕ ФУНКЦИИ	76
8.1. ПИД-регулятор	76
8.2. Функции автонастройки регуляторов	78
8.3. Функции для повышения устойчивости электрооборудования к нарушениям электроснабжения	78
8.3.1. Автоматика повторного включения	79
8.3.2. Подхват на лету (улавливание)	79
8.3.3. Регулирование напряжения V_{dc} , кинетическое буферирование	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	81

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые технологии прочно вошли в область управления электроприводами, превратив ее из классической электромеханики в высокотехнологичную инженерную дисциплину. Сегодня электропривод уже невозможно представить без микропроцессорных систем управления, которые обеспечивают не только регулирование скорости и момента, но и сложную логику работы, взаимодействие по промышленным сетям, диагностику неисправностей и адаптацию к изменяющимся условиям технологического процесса.

В данном курсе лекций основное внимание уделяется цифровым микропроцессорным системам управления – их структуре, параметрированию, способам передачи команд и обратной связи. Рассматриваются реальные преобразователи ведущих производителей (Siemens, ABB, Gefran), их функциональные схемы, регуляторы скорости, тока и ЭДС, а также такие важные инструменты, как ВІСО-технология, слова управления и состояния.

Курс построен таким образом, чтобы студент после изучения материала мог уверенно читать руководства по эксплуатации, конфигурировать параметры и понимать логику работы цифрового привода в составе технологической установки. Последовательное изложение материала от общих вопросов к конкретным примерам позволяет сформировать целостное представление о предмете, а использование реальных функциональных схем и ссылок на параметры преобразователей делает обучение максимально приближенным к практике.

1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ. МЕСТО ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

1.1. Понятие электропривода. Силовая часть и система управления преобразователей

Электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Применяемые в различных отраслях промышленности электроприводы можно классифицировать по самым разнообразным критериям. Например, в [1] приведены следующие критерии классификации.

По виду движения различаются электроприводы вращательного и поступательного однонаправленного и реверсивного движения, а также электроприводы возвратно-поступательного движения. Вращательное однонаправленное, а также реверсивное движение осуществляется электродвигателями (ЭД) обычного исполнения. Поступательное движение может быть получено при использовании ЭД вращательного движения совместно с преобразовательным механизмом (кулисным, винтовым, реечным), либо применением ЭД специального исполнения (линейного, гидродинамического и т. д.).

По степени управляемости электропривод подразделяется на следующие виды:

1. Нерегулируемый (электропривод, в котором исполнительный орган рабочей машины приводится в движение с одной постоянной скоростью).

2. Регулируемый (электропривод, в котором скорость движения исполнительного органа изменяется в соответствии с требованиями технологического процесса).

3. Следящий (электропривод, в котором воспроизводится перемещение исполнительного органа в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом).

4. Программно-управляемый (электропривод обеспечивает перемещение исполнительного органа в соответствии с заданной программой).

5. Адаптивный (электропривод автоматически обеспечивает оптимальный режим движения исполнительного органа при изменении условий его работы).

6. Позиционный (электропривод обеспечивает регулирование положения исполнительного органа рабочей машины).

По способу соединения электродвигателя с исполнительным органом рабочей машины различают:

1. Редукторный (электропривод, механическая передача которого содержит редуктор).

2. Безредукторный (электропривод, электродвигатель которого непосредственно соединен с исполнительным органом).

По роду электрического преобразователя различают:

1. Вентильный электропривод (электропривод, в котором преобразовательным устройством является вентильный преобразователь энергии). Разновидностями вентильного электропривода является полупроводниковый электропривод, который в свою очередь делится на тиристорный и транзисторный электропривод.

2. Система УВ–Д (вентильный электропривод постоянного тока, преобразовательным устройством которого является управляемый выпрямитель).

3. Система ПЧ–Д (вентильный электропривод переменного тока, преобразовательным устройством которого является регулируемый преобразователь частоты).

4. Система Г–Д и МУ–Д (электропривод, преобразовательным устройством которого является, соответственно, электромашинный преобразователь или магнитный усилитель).

По уровню автоматизации можно различать:

1. Неавтоматизированный электропривод (электропривод, в котором осуществляется ручное управление с помощью оператора). В настоящее время такой электропривод встречается редко, преимущественно в установках малой мощности бытовой и медицинской техники и т. п.

2. Автоматизированный электропривод (электропривод, управляемый автоматическим регулированием параметров).

3. Автоматический электропривод (электропривод, в котором управляющее воздействие вырабатывается автоматическим устройством без участия оператора).

По способу передачи механической энергии исполнительному органу электропривод подразделяется на следующие виды:

1. Индивидуальный (электропривод, в котором каждый исполнительный орган рабочей машины приводится в движение отдельным двигателем). Этот вид ЭП наиболее распространенный, так как здесь отсутствуют механические передачи, легко осуществляется автоматизация технологического процесса, улучшаются условия обслуживания рабочей машины.

2. Взаимосвязанный (электропривод, в котором имеется два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов, при работе которых поддерживается заданное соотношение их скоростей или их нагрузок и положение исполнительных органов рабочих машин). Частным случаем взаимосвязанного электропривода является многодвигательный (электропривод, содержащий несколько электродвигателей, механическая связь между которыми осуществляется через исполнительный орган рабочей машины).

3. Групповой (электропривод с одним электродвигателем, обеспечивающий движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или несколько исполнительных органов одной рабочей машины).

Классификация по роду тока и типу преобразователя электрической энергии.

В регулируемых по скорости промышленных электроприводах, работающих при напряжениях до 1000 В, в основном применяются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Конечно же, применяются и другие типы электрических машин: синхронные машины как с обмоткой возбуждения, так и с постоянными магнитами; асинхронные машины с фазным ротором; двигатели постоянного тока с постоянными магнитами, с последовательными обмотками возбуждения; шаговые двигатели и др.

1.2. Функциональные схемы электроприводов

Для регулирования скорости синхронных и асинхронных машин применяют преобразователи частоты. На рисунке 1.1 показана типичная функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Преобразователь частоты UZ выполнен по схеме с промежуточным звеном постоянного тока (управляемый или неуправляемый выпрямитель). За счет широтно-импульсной модуляции напряжения звена постоянного тока на выходе инвертора формируется основная гармоника выходного переменного напряжения; высшие гармоники подавляются выходным фильтром. Регулирование скорости и момента асинхронного двигателя выполняется за счет изменения напряжения и частоты выходного напряжения инвертора.

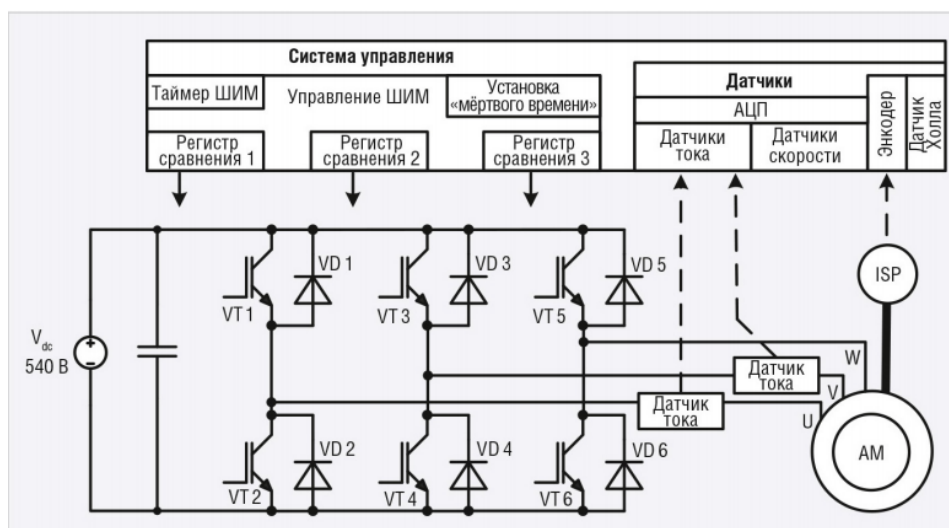


Рисунок 1.1. Функциональная схема регулируемого асинхронного электропривода

Микропроцессор управляет силовыми IGBT ключами преобразователя в соответствии с алгоритмами формирования управляющих импульсов. Для ввода управляющих сигналов и вывода информации о состоянии преобразователя предназначены устройства дискретных и аналоговых входов и выходов,

встроенные панели управления, модули подключения к промышленным информационным сетям, порты подключения к персональному компьютеру.

На рисунке 1.2 показано подключение силовых и сигнальных цепей преобразователя частоты ВЕСПЕР.

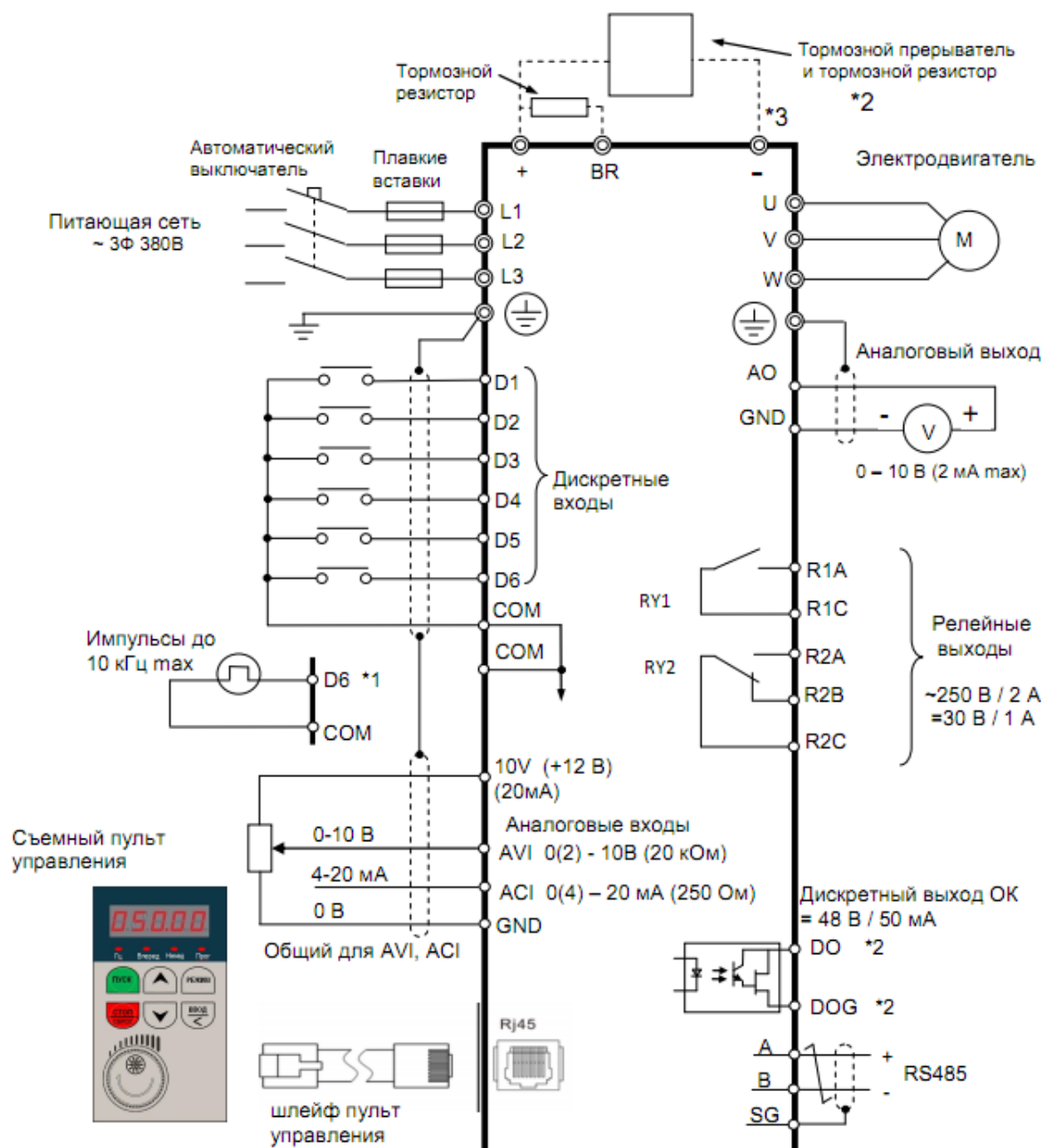


Рисунок 1.2. Подключение преобразователя частоты ВЕСПЕР

В цепи питания преобразователя, кроме автоматического выключателя и плавких вставок, представленных на рисунке 1.2, по необходимости могут быть установлены входной дроссель, радиочастотный фильтр. Цепь питания электродвигателя может быть дополнена, например, выходным дросселем. Съемный пульт управления предназначен для настройки параметров преобразователя, также этот пульт можно использовать для работы при управлении преобразователем. Сигнальные цепи с аналоговыми и дискретными

входными и выходными сигналами позволяют осуществить различные конфигурации системы управления.

Для регулирования скорости двигателей постоянного тока наиболее часто применяют тиристорные преобразователи постоянного тока. На рисунке 1.3 показана типичная функциональная схема привода постоянного тока.

Для питания якорной цепи двигателя в преобразователе UZ обычно применяются реверсивные или нереверсивные тиристорные выпрямители, выполненные по схеме Ларионова. Для питания цепи возбуждения обычно устанавливаются однофазные полууправляемые тиристорные выпрямители. Регулирование скорости и момента двигателя постоянного тока выполняется за счет регулирования угла открытия тириستоров выпрямителей в цепях якоря и возбуждения.

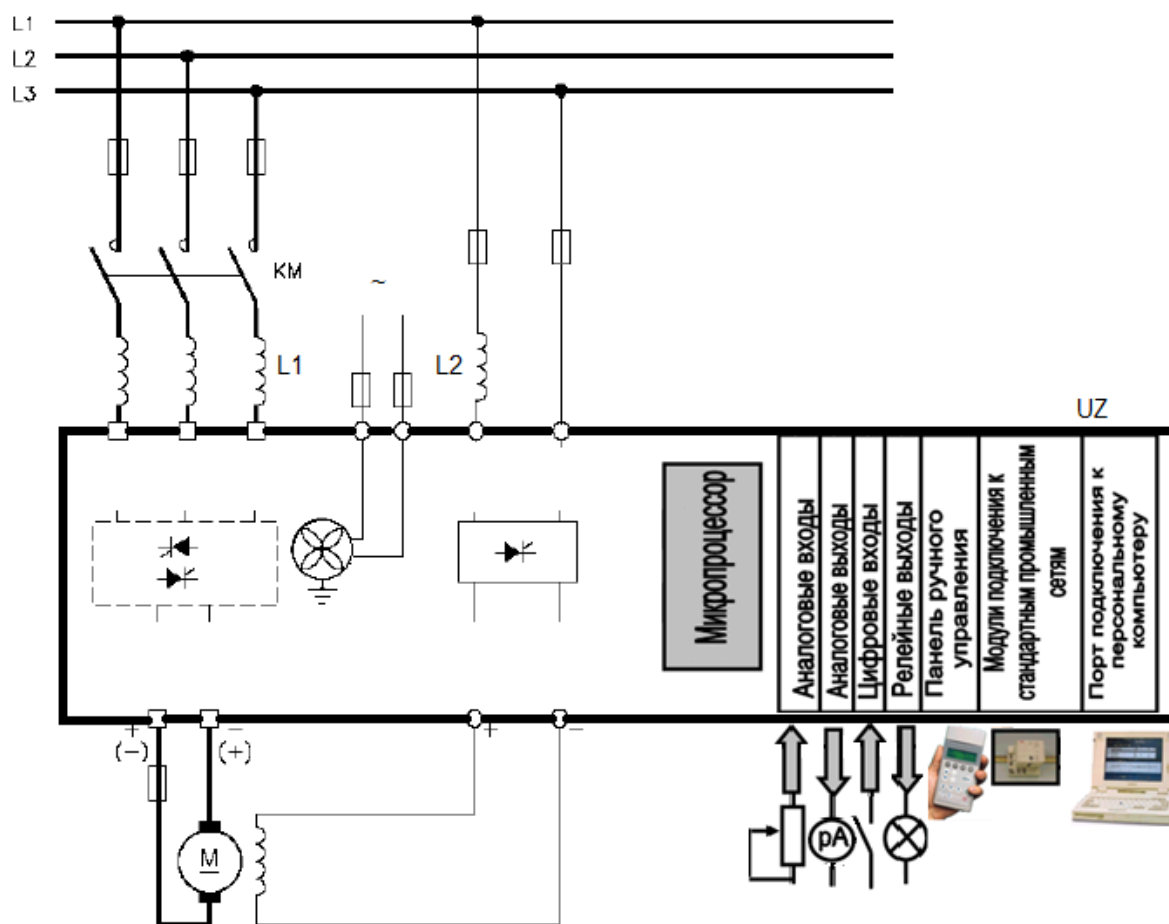


Рисунок 1.3. Функциональная схема электропривода постоянного тока

Блок-схема тиристорного преобразователя TPD32 EV для реверсивного привода постоянного тока показана на рисунке 1.4. Первая группа тириستоров T1, T2, T3, T4, T5, T6 и вторая группа тиристоров T1°, T2°, T3°, T4°, T5°, T6° обеспечивают реверсивное питание цепи якоря двигателя. Тиристоры T1_F, T2_F и диоды D1_F, D2_F входят в состав однофазного полууправляемого тиристорного выпрямителя для обмотки независимого возбуждения двигателя.

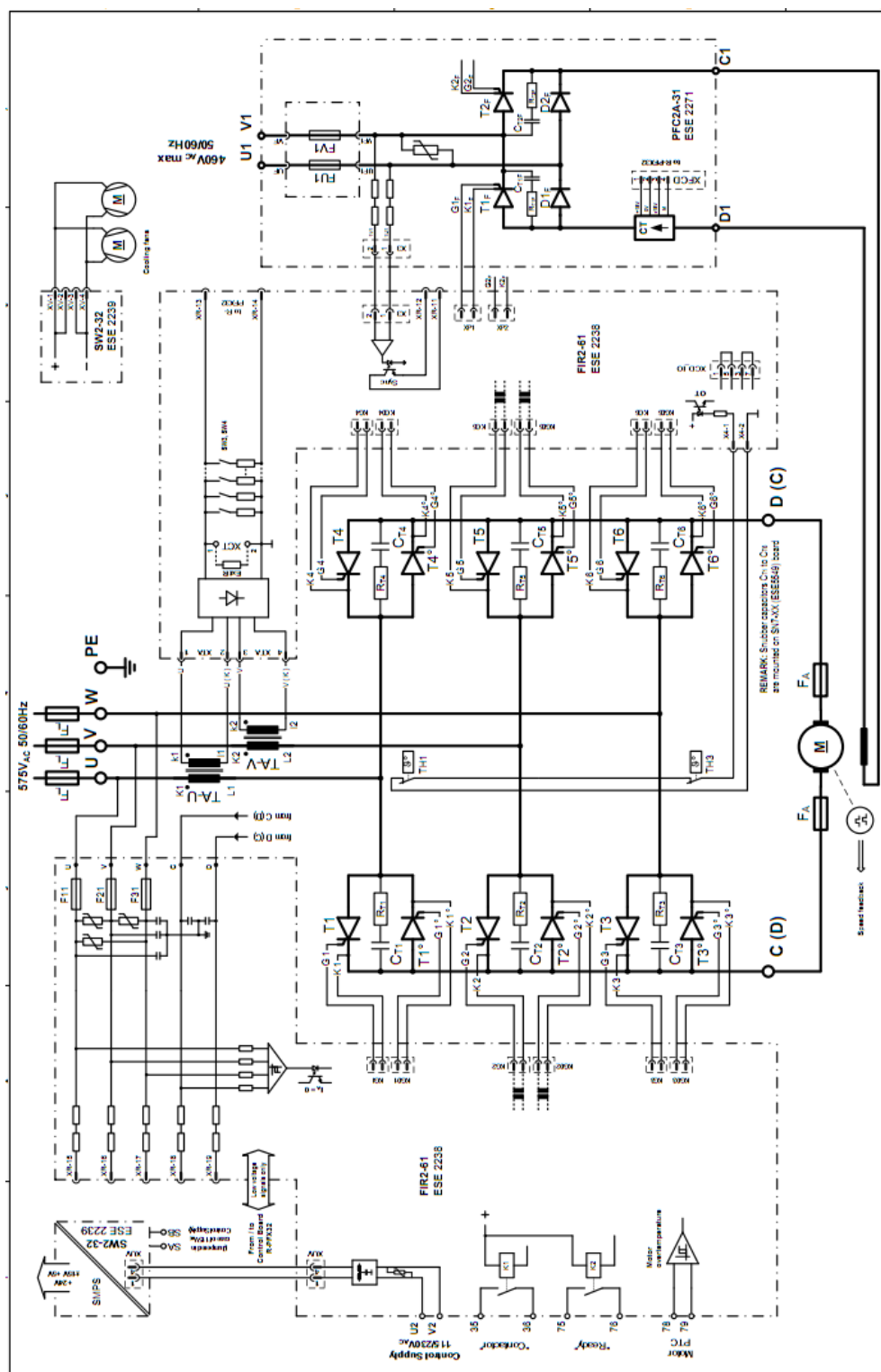


Рисунок 1.4. Блок-схема преобразователя постоянного тока TPD32 EV

Применение управляемых тиристорных выпрямителей в преобразователях постоянного тока ограничивает быстродействие привода из-за того, что в течение в среднем 3,3 мс тиристорный выпрямитель не управляем. Применение преобразователя на IGBT транзисторах, как показано на рисунке 1.5, позволяет

обеспечить частоту коммутации ключей до нескольких килогерц и увеличить быстродействие привода.

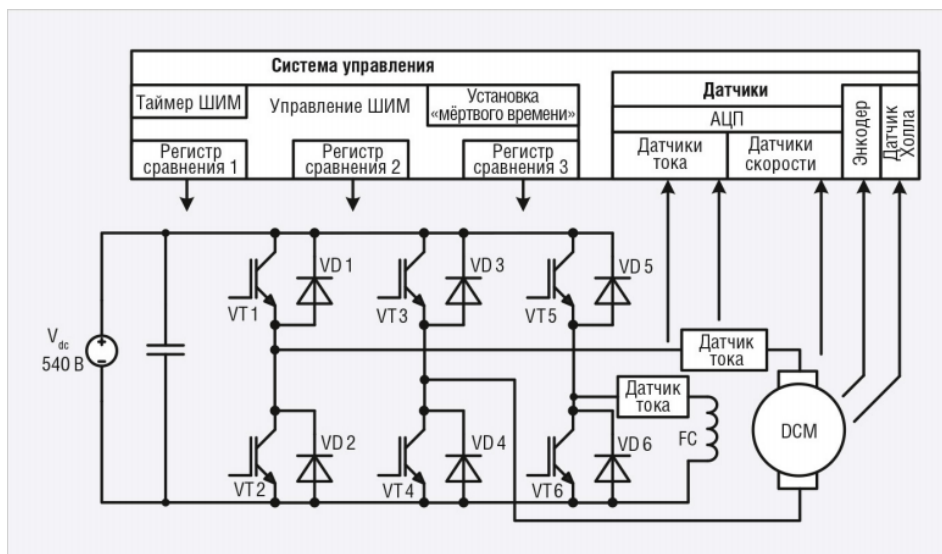


Рисунок 1.5. Функциональная схема электропривода постоянного тока с преобразователем на IGBT транзисторах

2. ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Назначение, типы и структурирование параметров системы управления приводами

Можно условно разделить задачи цифровой системы управления преобразователем на два уровня.

Задачи первого уровня относятся к алгоритмам управления силовыми ключами, формирующими токи в обмотках электродвигателя в соответствии с требуемым моментом. На этом уровне формируются сигналы управления тиристорами в приводах постоянного тока, сигналы управления IGBT транзисторами преобразователей частоты. К задачам второго уровня можно отнести задачи регулирования скорости и крутящего момента.

В системах управления большинства преобразователей доступ пользователя к программному обеспечению задач первого уровня значительно ограничен или вовсе недоступен. Основной доступ пользователя к системе управления преобразователя открыт для задач второго уровня. Это выполнение основных функций управления, включая регулирование скорости и момента, логические функции привода (пуск/останов), ввод/вывод информации, обратную связь, функции связи и защиты.

Доступ к функциональным блокам цифровой системы управления преобразователя выполняется через параметры. Параметры позволяют устанавливать коэффициенты функциональных блоков программы контроллера

цифрового электропривода, конфигурировать назначение дискретных и аналоговых сигналов входов преобразователя, настраивать связи между функциональными блоками.

Параметры системы управления преобразователем структурируются по своему назначению. В руководствах по эксплуатации и программированию (конфигурации) преобразователей параметры распределяются по группам и подгруппам, что облегчает работу с документацией. Ниже на рисунке 2.1 показан фрагмент таблицы параметров преобразователя постоянного тока TPD32EV [2].

Parameter	No.	Format	Value				Access via			
			min	max	Factory American	Factory European	Key.	RS485/ BUS/ Opt2-M	Term.	Opt2-A/ PDC
START UP										
Speed base value [FF]	45	U32***	1	16383	1500	1500	✓	R/Z	-	R
Nom flux curr [A] (Field curr scale [A])	374	Float	0.5	70.0	S	S	✓	R/Z	-	-
Speed-0 f weak ON (Enabled) OFF (Disabled)	499	U16	0	1	0	0	✓	R/W 1 0	-	-
Acc delta speed [FF]	21	U32	0	2 ³² -1	100	100	✓	R/W	-	-
Acc delta time [s]	22	U16	0	65535	1	1	✓	R/W	-	-
Dec delta speed [FF]	29	U32	0	2 ³² -1	100	100	✓	R/W	-	-
Dec delta time [s]	30	U16	0	65535	1	1	✓	R/W	-	-
START UP \ Motor data										
Motor nom flux (Motor field curr [A])	280	Float	0.0	P374	P374	P374	✓	R/Z	-	-
Flux reg mode Constant current Voltage control External control (OFF) Ext digital FC Ext wired FC	469	U16	0	2	Const. current 0	Const. current 0	✓	R/Z 0 1 2 3 4	-	-
Full load curr [A]	179	Float	0.1	IdAN	IdAN	IdAN	✓	R/Z	-	-
Motor max speed [rpm]	162	Float *	0	6553	1500	1500	✓	R/Z	-	R
Max out voltage [V]	175	Float	20	999	400	400	✓	R/Z	-	-
Flux weak speed [%]	456	U16	0	100	100	100	✓	R/Z	-	R
START UP \ Limits										
T current lim [%]	7	U16	0	200	150	150	✓	R/W	1A	R/W
Flux current min [%]	468	U16	0	P467	5	5	✓	R/W	-	----
Flux current max [%]	467	U16	P468	100	100	100	✓	R/W	-	R/W

Рисунок 2.1. Фрагмент таблицы параметров преобразователя TPD32EV

Различают следующие типы параметров:

- параметры, предназначенные только для чтения;
- параметры, предназначенные для записи численных значений;
- параметры, предназначенные для приема значений других параметров.

В преобразователях фирмы Siemens – это параметры, входящие в систему бинекторов и коннекторов (так называемая BICO-система, Binector Connector Technology).

Часто применяются также параметры с **индексной областью**; один параметр может содержать несколько значений с различными номерами индексов.

В преобразователях серии Sinamics (и не только этой серии) параметры отдельных объектов системы привода группируются в наборы данных в следующем порядке [3]:

- параметры, не зависящие от наборов данных; эти параметры встречаются в каждом объекте системы привода только один раз.

- параметры, зависящие от наборов данных; эти параметры могут встречаться несколько раз в каждом объекте системы привода и могут быть адресованы для перезаписи и чтения через индекс параметра.

Различают разные типы наборов данных:

- CDS: CommandDataSet (набор команд); с помощью соответствующего параметрирования нескольких CDS и переключения наборов можно эксплуатировать привод с использованием разных предварительно сконфигурированных источников сигналов.

- DDS: DriveDataSet (набор данных привода); в DDS объединены параметры для переключения настройки параметров системы регулирования привода.

Наборы данных CDS и DDS можно переключать во время текущей работы. Кроме того, существуют другие типы записей данных, которые можно активировать только косвенным путем через переключение DD, например:

EDS Encoder Data Set – Набор данных датчика

В любом приводном устройстве имеется множество соединяемых входных и выходных величин, а также внутренних величин регулирования. С помощью техники BICO можно адаптировать приводное устройство к различным требованиям.

Свободно соединяемые посредством параметров BICO цифровые и аналоговые сигналы отмечены в названии параметра с помощью стоящих впереди BI, BO, CI или CO.

Бинектор представляет собой цифровой (двоичный) сигнал без единицы измерения и может принимать значение 0 или 1. Бинекторы подразделяются на бинекторные входы (приемник сигнала) и бинекторные выходы (источник сигнала), см. рисунок 2.2.

Сокращение	Символ	Наименование	Описание
BI		Бинекторный вход Binector Input (приемник сигнала)	Может быть соединен с бинекторным выходом в качестве источника. Номер бинекторного выхода должен быть записан как значение параметра.
BO		Бинекторный выход Binector Output (источник сигнала)	Может быть использован в качестве источника для бинекторного входа.

Рисунок 2.2. Бинекторы

Коннектор представляет собой цифровой сигнал, например, в 16-битовом формате. Он может использоваться для отображения слов (16 бит), двойных слов (32 бита) или аналоговых сигналов в цифровом формате. Коннекторы

подразделяются на коннекторные входы (приемник сигнала) и коннекторные выходы (источник сигнала).

Сокращение	Символ	Наименование	Описание
CI		Коннекторный вход Connector Input (приемник сигнала)	Может быть соединен с коннекторным выходом в качестве источника. Номер коннекторного выхода должен быть записан как значение параметра.
CO		Коннекторный выход Connector Output (источник сигнала)	Может быть использован в качестве источника для коннекторного входа.

Рисунок 2.3. Коннекторы

На рисунке 2.4 показаны примеры соединения сигналов при помощи техники ВICO.

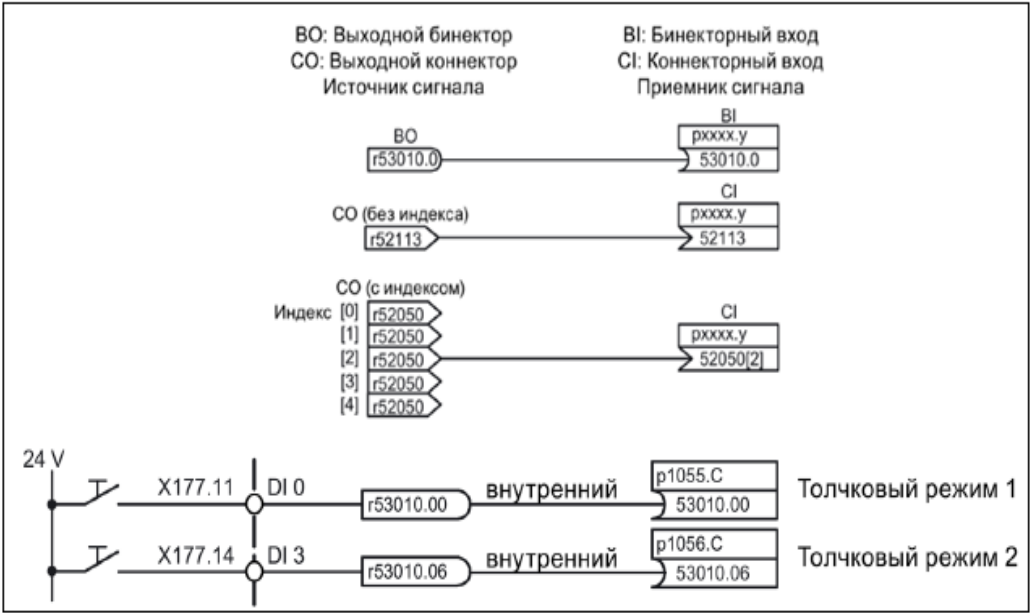


Рисунок 2.4. Соединение сигналов при помощи техники ВICO

Подходы к систематизации параметров преобразователей у различных производителей отличаются в деталях, но в основном параметры разделяются на группы в соответствии с решаемыми этими параметрами задачами. В рабочей документации к преобразователям обычно приводятся не только списки параметров системы управления, но и функциональные схемы, отражающие структуру программного обеспечения (см., например, рис. 2.5).

Интерфейсы преобразователя

Для управления преобразователем и получения информации о режимах его работы управляющий контроллер преобразователя может оснащаться

16

Приложения для настройки преобразователей

Для настройки и обслуживания преобразователей разрабатываются программные средства, устанавливаемые на персональные компьютеры. Основные функции таких программ для настройки преобразователей:

- чтение и изменение параметров настройки преобразователя;
- сохранение параметров преобразователя в файле;
- загрузка параметров из файла в преобразователь;
- регистрация графиков переменных и сохранение графиков в файле;
- возможность открытия графиков из файла для последующего анализа;
- открытие и чтение архива аварийных сообщений;
- вывод на печать информации о преобразователе, значениях параметров и аварийных сообщениях из архива;
- пуск, остановка и задание скорости привода с персонального компьютера.

Большинство приложений включают в себя графический интерфейс, который отображает структуру системы управления преобразователем и облегчает конфигурацию параметров. На рисунке 2.6 показан интерфейс SystemVar Studio для преобразователей System Electric.

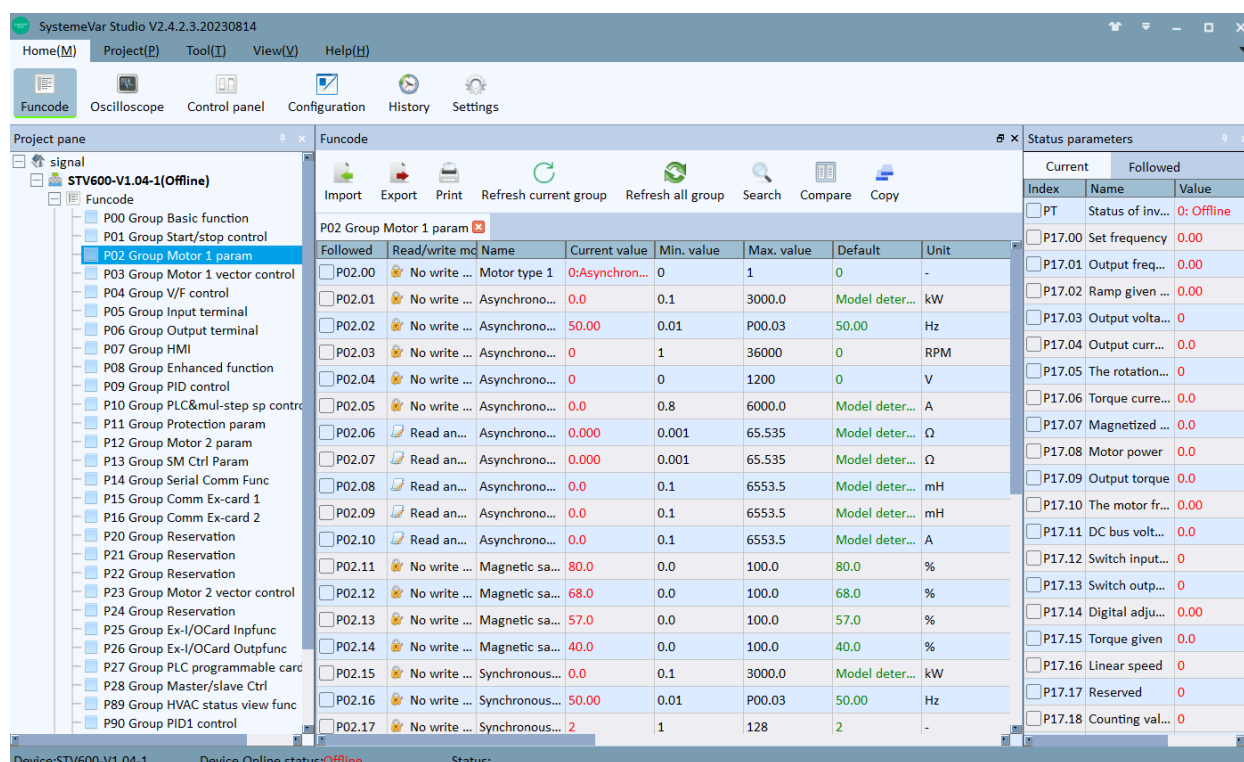


Рисунок 2.6. Интерфейс SystemVar Studio

2.2. Структура системы управления приводом. Основные функции управления

Структура программного обеспечения типовых преобразователей постоянного и переменного тока формируется в виде блоков, каждый из которых

предназначен для выполнения определенной функции. На рисунке 2.7 показана структура программного обеспечения системы управления якорной цепи преобразователя постоянного тока TPD32EV.

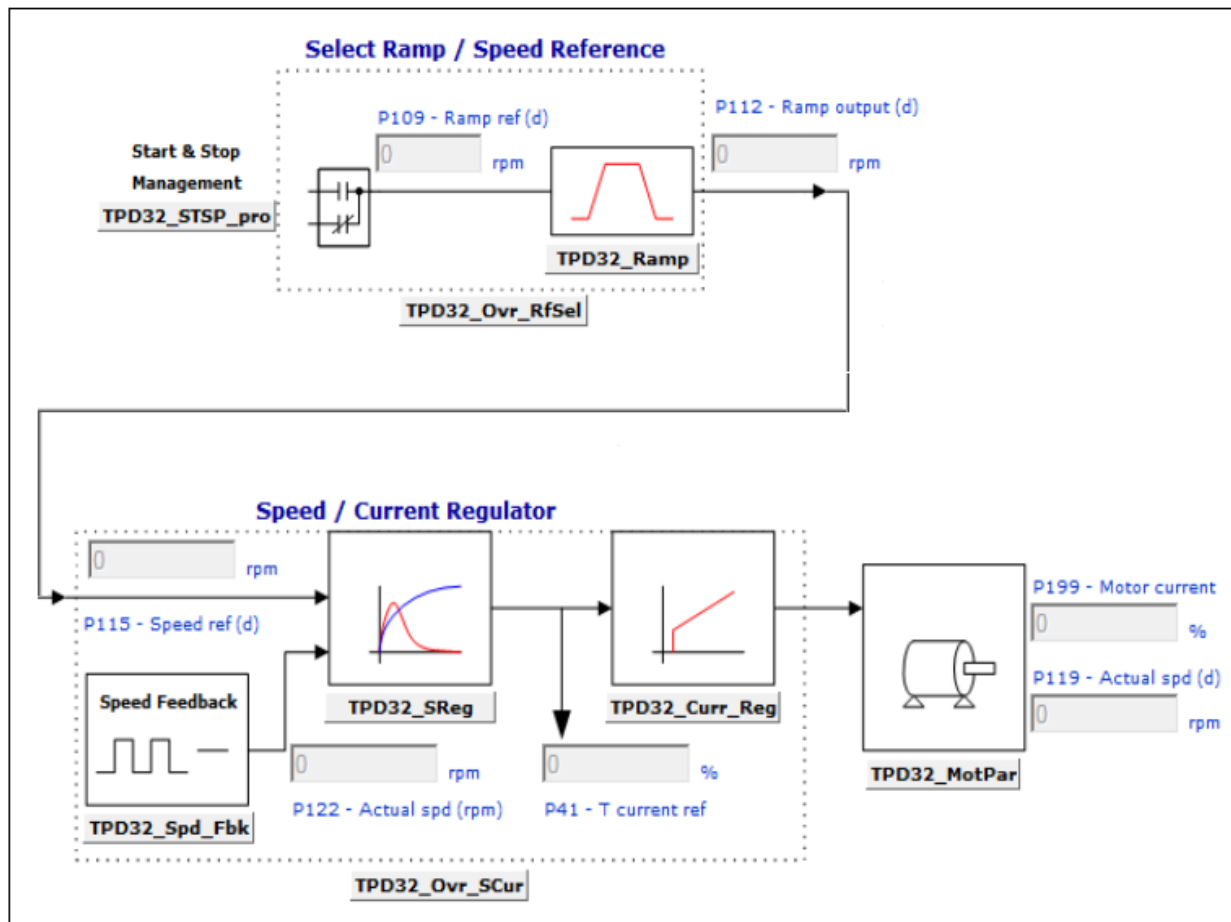


Рисунок 2.7. Система управления якорной цепи преобразователя TPD32EV

В отдельные функциональные блоки выделены следующие элементы системы управления:

- выбор источника задания скорости и блок задатчика интенсивности;
- регулятор скорости, он формирует задание на ток якоря;
- регулятор тока якоря, он формирует задание на систему импульсно-фазового управления (СИФУ), управляющую открытием тириستоров выпрямителя;
- модуль формирования сигнала обратной связи по скорости;
- модуль задания параметров якорной цепи двигателя.

В структурах систем управления преобразователей постоянного тока и в преобразователях частоты с векторным управлением можно увидеть структуру подчиненного регулирования, в которой внутренний контур управления управляется внешним контуром (см. рис. 2.7 и рис. 2.8). Контур скорости выдает задание в контур регулирования момента (которым может выступать, например, контур тока якоря). В сервоприводах контур регулирования положения выдает задание в контур скорости, который, в свою очередь, выдает задание в контур регулирования момента [4].

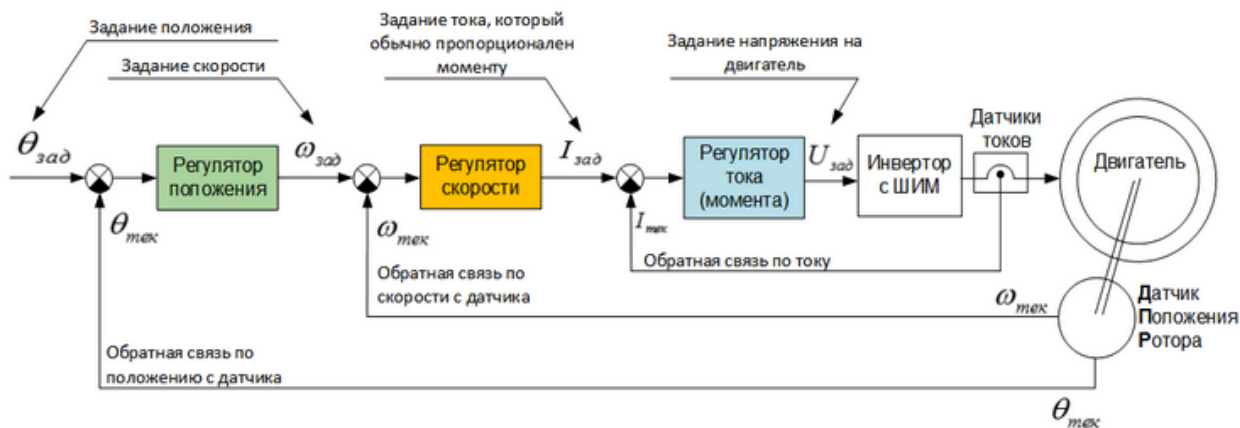


Рисунок 2.8. Трехконтурная система подчинённого регулирования

В состав программных модулей структуры системы управления преобразователей, кроме регуляторов основных регулируемых координат привода (положение, скорость, момент), входят также модули, обеспечивающие работу регуляторов. Такие программные модули выполняют следующие важные задачи:

- выбирают источник задания;
- формируют темп изменения задания;
- формируют ограничения при формировании задания;
- формируют сигналы обратных связей для регуляторов;
- оптимизируют работу регуляторов в специальных режимах;
- связывают преобразователь с управляющими контроллерами и с другими преобразователями;
- выполняют специальные функции электропривода в составе технологической установки.

3. СПОСОБЫ ПОДАЧИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Сигналы управления преобразователем – как дискретные (пуск, стоп, сброс), так и аналоговые (задание скорости, тока) – могут быть доставлены от устройства управления (ПЛК, контроллер, панель оператора) до преобразователя несколькими способами. Выбор конкретного способа определяется требованиями к помехоустойчивости, удаленности привода, сложностью автоматизируемого процесса и стадией эксплуатации (наладка или промышленная эксплуатация).

Принято выделять два основных класса интерфейсов управления:

- **локальные и дискретные интерфейсы** – управление с панели оператора, встроенной в преобразователь, или через дискретные входы/выходы (клеммные соединения);

- **сетевые интерфейсы** – управление по полевой шине (Profibus, Profinet, Modbus, CAN и другие) с использованием специальных слов управления и состояния.

3.1. Выбор источников управления

3.1.1. Управление с панели оператора

Встроенная или выносная панель управления (например, АОР для преобразователей Sinamics, панель для VaconNX) предоставляет оператору набор кнопок и индикаторов. Доступны команды «Пуск», «Стоп», «Сброс ошибки», «Реверс», а также задание скорости с помощью потенциометра или кнопок увеличения/уменьшения.

Управление с панели используется на этапе пусконаладки или при обслуживании привода в автономном режиме, когда связь с верхней системой управления отсутствует. В терминах параметров преобразователя этот способ называется **локальным управлением**.

3.1.2. Управление через дискретные входы (клеммы)

Дискретные команды могут подаваться на преобразователь через клеммные соединения от внешних устройств – кнопок, переключателей, реле, дискретных выходов ПЛК. Каждой команде («Пуск», «Стоп», «Толчок», «Аварийный останов», «Выбор фиксированной скорости») назначается отдельный дискретный вход.

Производители применяют разные подходы к назначению функций на входы.

В одних преобразователях функции дискретных входов жестко предопределены. Например, вход DI1 всегда означает «Пуск вперед», DI2 – «Пуск назад», DI3 – «Стоп», DI4 – «Сброс ошибки». Изменить это назначение нельзя. Такой подход упрощает настройку, но ограничивает адаптацию привода к нестандартной логике.

В большинстве современных преобразователей функции дискретных входов настраиваются. Пользователь через параметры сам определяет, какая команда будет привязана к каждому входу. Это позволяет адаптировать привод к любой схеме автоматизации без изменения монтажа.

Пример – преобразователи Sinamics G120 с технологией BICO (Binector Connector Technology). Каждая дискретная команда имеет параметр-приемник: команда включения (ON/OFF1) – параметр p0840, сброс ошибки – p2103, выбор фиксированной скорости – p1020, p1021 и так далее. В качестве источника сигнала для этих параметров может быть указан любой дискретный вход (di0, di1, di2...). Если требуется, чтобы привод включался не с входа DI0, а с DI3, в параметр p0840 записывается значение di3.

3.1.3. Выбор источника команд (локальный/дистанционный режим)

Большинство преобразователей поддерживают переключение между источниками команд. В SinamicsDCM параметр r00807 определяет источник слова управления: при r00807.00 = 1 используется панель AOP (локальный режим), при 0 – клеммы или полевая шина (удаленный режим). В макропрограмме «Местное/дистанционное управление» VaconNX выбор поста управления назначается на отдельный дискретный вход. Это позволяет совмещать ручное управление при наладке с автоматическим управлением от ПЛК в рабочем режиме.

3.1.4. Управление по полевой шине

При управлении по полевой шине передача каждого дискретного сигнала по отдельному проводу становится невозможной из-за большого количества соединений. Поэтому все дискретные команды объединяются в группы – слова управления (ControlWord). Аналогично, дискретные сигналы состояния привода (готовность, работа, ошибка) объединяются в слова состояния (StatusWord). Типичная разрядность таких слов – 16 бит.

На рисунке 3.1 приведена функциональная диаграмма слова управления преобразователя постоянного тока SinamicsDCM. Доступ к отдельным битам слова управления возможен через соответствующие параметры, к которым могут быть подключены бинекторы с информацией различных дискретных сигналов.

Так, бит 0 слова управления определяет состояние включить (=1) или выключить (=0) привод. При выборе локального способа управления (параметр r00807.00 = 1) в этот бит будет записано значение параметра p03982 от встроенной панели управления AOP. При выборе удаленного способа управления (параметр r00807.00 = 0) в бит 0 слова управления будет записываться значение коннектора, подключенного к параметру BICOp00840.

Значение бита 1 слова управления (разрешение включения) зависит от результата логической функции И трех дискретных сигналов, определяемых параметрами r53100.00, p00845 (p00844 или p03982).

В таблице 3.1 показано содержимое слова управления Fieldbus для профиля управления «Приводы ABB» преобразователя частоты ACS880. Интерфейс встроенной шины Fieldbus преобразует это слово в форму, которая используется в приводе. Текст, выделенный жирным шрифтом и прописными буквами, относится к состояниям, показанным на рисунке 3.1.

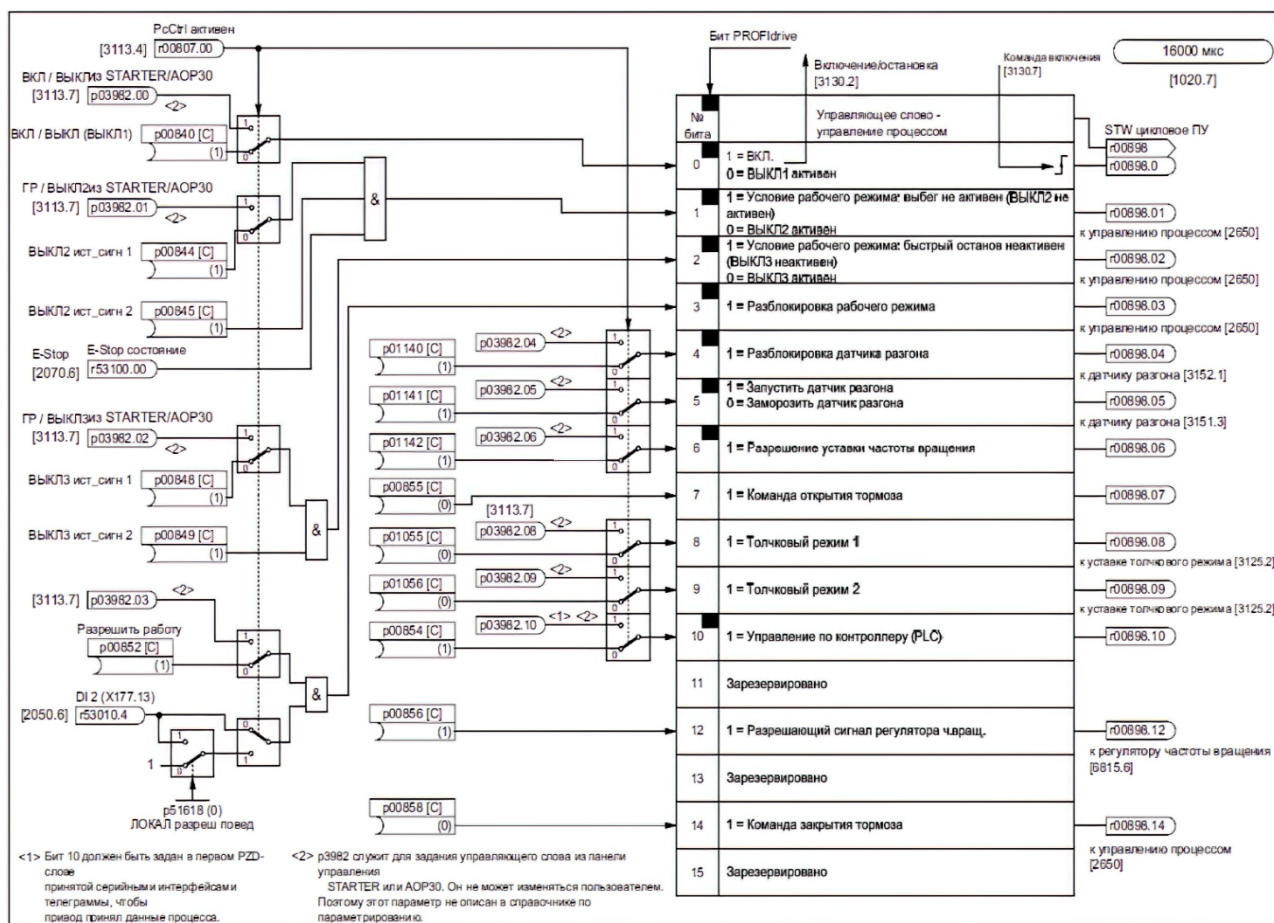


Рисунок 3.1. Состав слова управления преобразователя SinamicsDCM

Таблица 3.1.

Бит	Название	Значение	СОСТОЯНИЕ/Описание
0	OFF1_ CONTROL	1	Переход к состоянию ГОТОВ К РАБОТЕ.
		0	Останов в соответствии с активным в данный момент значением времени замедления. Переход к состоянию ВЫКЛ1 АКТИВЕН; переход к состоянию ГОТОВ К ВКЛЮЧЕНИЮ, если другие блокировки (ВЫКЛ2, ВЫКЛ3) не активны.
1	OFF2_ CONTROL	1	Продолжение работы (ВЫКЛ2 не активен).
		0	Экстренное отключение, останов выбегом. Переход к состоянию ВЫКЛ2 АКТИВЕН, переход к состоянию ВКЛЮЧЕНИЕ ЗАПРЕЩЕНО.
2	OFF3_ CONTROL	1	Продолжение работы (ВЫКЛ3 не активен).
		0	Аварийный останов, останов в течение времени, определяемого параметром привода. Переход к состоянию ВЫКЛ3 АКТИВЕН; переход к состоянию ВКЛЮЧЕНИЕ ЗАПРЕЩЕНО. Предупреждение. При использовании этого режима останова убедитесь в возможности останова двигателя и присоединенного к нему механизма.

3	INHIBIT_ OPERATIO N	1	Переход к состоянию РАЗРЕШЕНИЕ РАБОТЫ.
		0	Запрет работы. Переход к состоянию РАБОТА ЗАПРЕЩЕНА.
4	RAMP_OUT_ ZERO	1	Обычная работа. Переход к состоянию ГЕНЕРАТОР ФУНКЦИИ ПЛАВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ: ВЫХОД РАЗРЕШЕН.
		0	Принудительная установка на ноль выходного сигнала генератора функции плавного изменения. Привод замедляется до останова двигателя (ограничения тока и напряжения шины постоянного тока остаются в силе).
5	RAMP_HOLD	1	Разрешена функция ускорения/замедления. Переход к состоянию ГЕНЕРАТОР ФУНКЦИИ ПЛАВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ: УСКОРЕНИЕ РАЗРЕШЕНО.
		0	Прекращение плавного изменения (поддержание постоянного уровня на выходе генератора функции плавного изменения).
6	RAMP_IN_ НОЛЬ	1	Обычная работа. Переход к состоянию РАБОТА.
		0	Принудительная установка на ноль выходного сигнала генератора функции плавного изменения.
7	СБРОС	0=> 1	Сброс отказа, если имеется активный отказ. Переход к состоянию ВКЛЮЧЕНИЕ ЗАПРЕЩЕНО.
		0	Продолжение работы в обычном режиме.
8	JOGGING_ 1	1	Ускорение до уставки для толчкового режима 1.
		0	Толчковый режим 1 запрещён.
9	JOGGING_ 2	1	Ускорение до уставки для толчкового режима 2.
		0	Толчковый режим 2 запрещён.
10	REMOTE_ CMD	1	Управление по шине Fieldbus разрешено.
		0	Слово управления <> 0 или уставка <> 0: Восстановление последнего слова управления и уставки. Слово управления = 0 и уставка = 0: Управление по шине Fieldbus разрешено. Уставка и функция замедления/ускорения заблокированы.
11		1	Выбор канала внешнего управления ВНЕШН2. Действует, если в настройках указано, что пост управления выбирается с шины Fieldbus.
		0	Выбор внешнего канала управления ВНЕШН1. Действует, если в настройках указано, что пост управления выбирается с шины Fieldbus.
12...15	Резерв		

На рисунке 3.2 приведена функциональная диаграмма слова состояния преобразователя частоты SinamicsS120. Каждый бит этого слова характеризует одну из логических функций состояния преобразователя. Биты слова состояния могут использоваться для диагностики системы управления, а также в качестве аргументов логических функций преобразователя.

Макропрограмма с набором фиксированных скоростей применяется в областях, использующих фиксированные скорости. Скорости выбираются с помощью дискретных сигналов.

Макропрограмма ПИД-регулирования обычно применяется для контроля давления при управлении насосами и вентиляторами. В этих областях Макропрограмма ПИД-регулирования обеспечивает плавное управление процессами за счет встроенных средств измерения.

Универсальная программа позволяет работать с большим диапазоном параметров управления двигателями. Она может применяться в различных процессах, где требуются гибкость сигналов входа/выхода без ПИД-регулирования.

Макропрограмма управления насосами и вентиляторами применяется для управления одним приводом с переменной скоростью и 4 дополнительными приводами. ПИД-регулятор преобразователя частоты управляет скоростью вращения одного привода с переменной скоростью, а также подает управляющие сигналы для пуска/останова вспомогательных приводов для поддержания общего потока. Кроме стандартных групп параметров, добавлена группа параметров для управления насосами и вентиляторами.

Слово Состояния макропрограммы						
Макро- программа Слово Состояния	Стандартная	Местного/ дистанционного управления	С набором фиксированных скоростей	ПИД- регулирования	Универсальная	Управления насосами и вентиляторами
b0						
b1	Готовность	Готовность	Готовность	Готовность	Готовность	Готовность
b2	Работа	Работа	Работа	Работа	Работа	Работа
b3	Отказ	Отказ	Отказ	Отказ	Отказ	Отказ
b4						
b5					Без EMStop (NXP)	
b6	Пуск разрешен	Пуск разрешен	Пуск разрешен	Пуск разрешен	Пуск разрешен	Пуск разрешен
b7	Предупрежде- ние	Предупрежде- ние	Предупрежде- ние	Предупрежде- ние	Предупрежде- ние	Предупрежде- ние
b8						
b9						
b10						
b11	Торможение постоянным током	Торможение постоянным током	Торможение постоянным током	Торможение постоянным током	Торможение постоянным током	Торможение постоянным током
b12	Запрос на пуск	Запрос на пуск	Запрос на пуск	Запрос на пуск	Запрос на пуск	Запрос на пуск
b13	Управление пределами	Управление пределами	Управление пределами	Управление пределами	Управление пределами	Управление пределами
b14					Управление тормозом	Вспомогат. 1
b15				ПИД активен		Вспомогат. 2

Рисунок 3.3. Слово состояния макропрограммы преобразователя частоты VaconNX

Слова управления определяют режимы работы преобразователя и переходы из одних режимов в другие. Каждый из режимов характеризуется определенным значением слова состояния. На рисунке 3.4 представлена схема переходов состояний привода ACS880, когда он использует профиль «Приводы

ABB» и сконфигурирован на выполнение команд слова управления интерфейса встроенной шины Fieldbus. Текст, выделенный прописными буквами, относится к состояниям, используемым в таблицах, в которых представлены слова управления и состояния.

Следует отметить, что не все разработчики широко используют в системе управления преобразователей инструменты слова управления и слова состояния; в некоторых разработках эти инструменты вообще не обнаруживаются в перечне параметров системы управления, в других преобразователях использование таких параметров, как слово управления и слово состояния, очень ограничено.

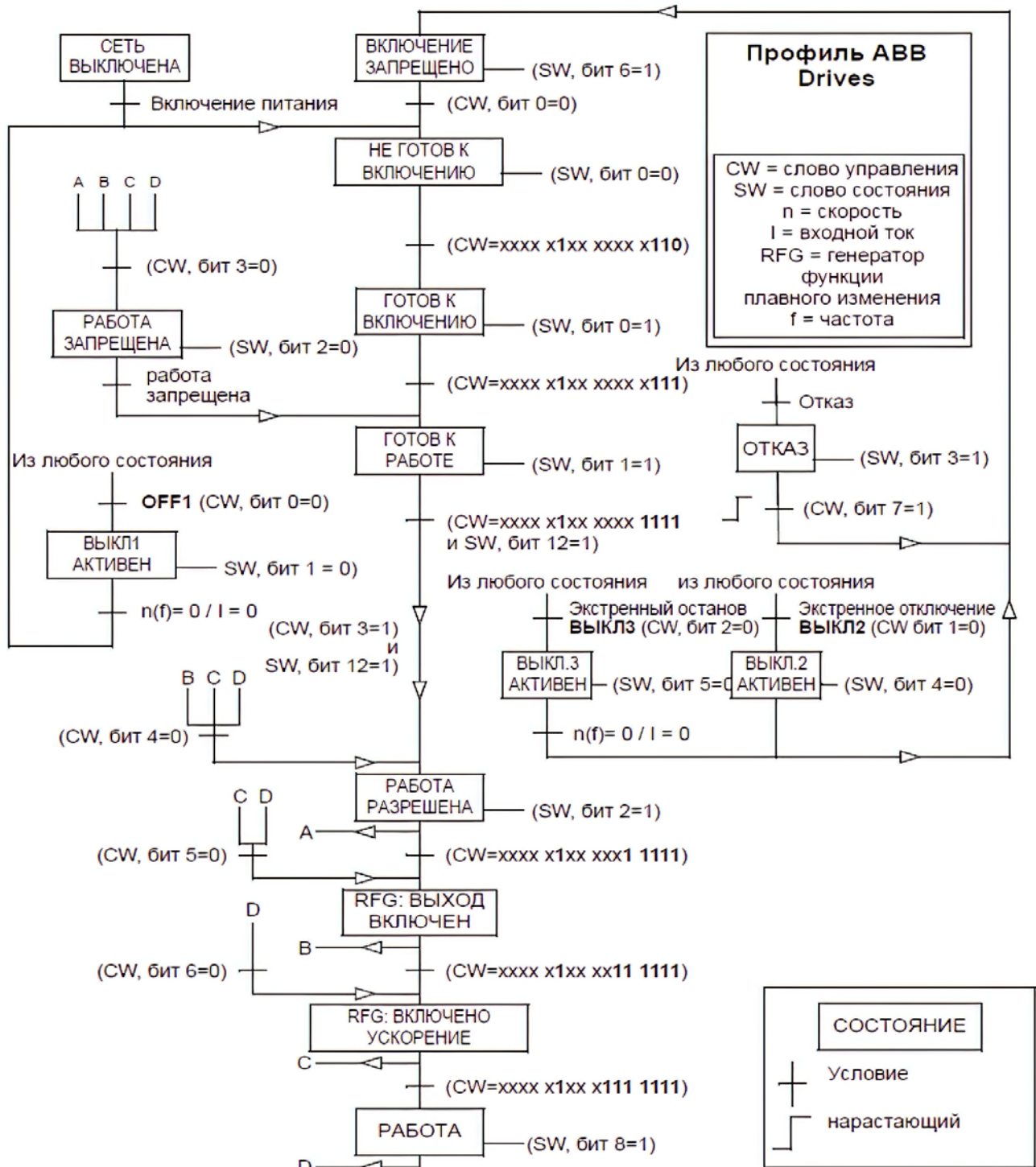


Рисунок 3.4. Схема переходов состояний преобразователя частоты ACS88

3.2. Выбор источников заданного значения

Заданные значения в преобразователи могут поступать от различных интерфейсов, например, таких как: аналоговые входы; цифровое задание с панели управления; фиксированные задания, выбираемые комбинацией дискретных входов; применение функции «Мотор-потенциометр»; передача задания по шине управления (Profibus, Profinet, Modbus, CAN и т. п.); задания скорости толчковых режимов (Jog). На рисунке 3.5 показана логическая схема меню выбора источника задания преобразователя частоты Unidrive M700.

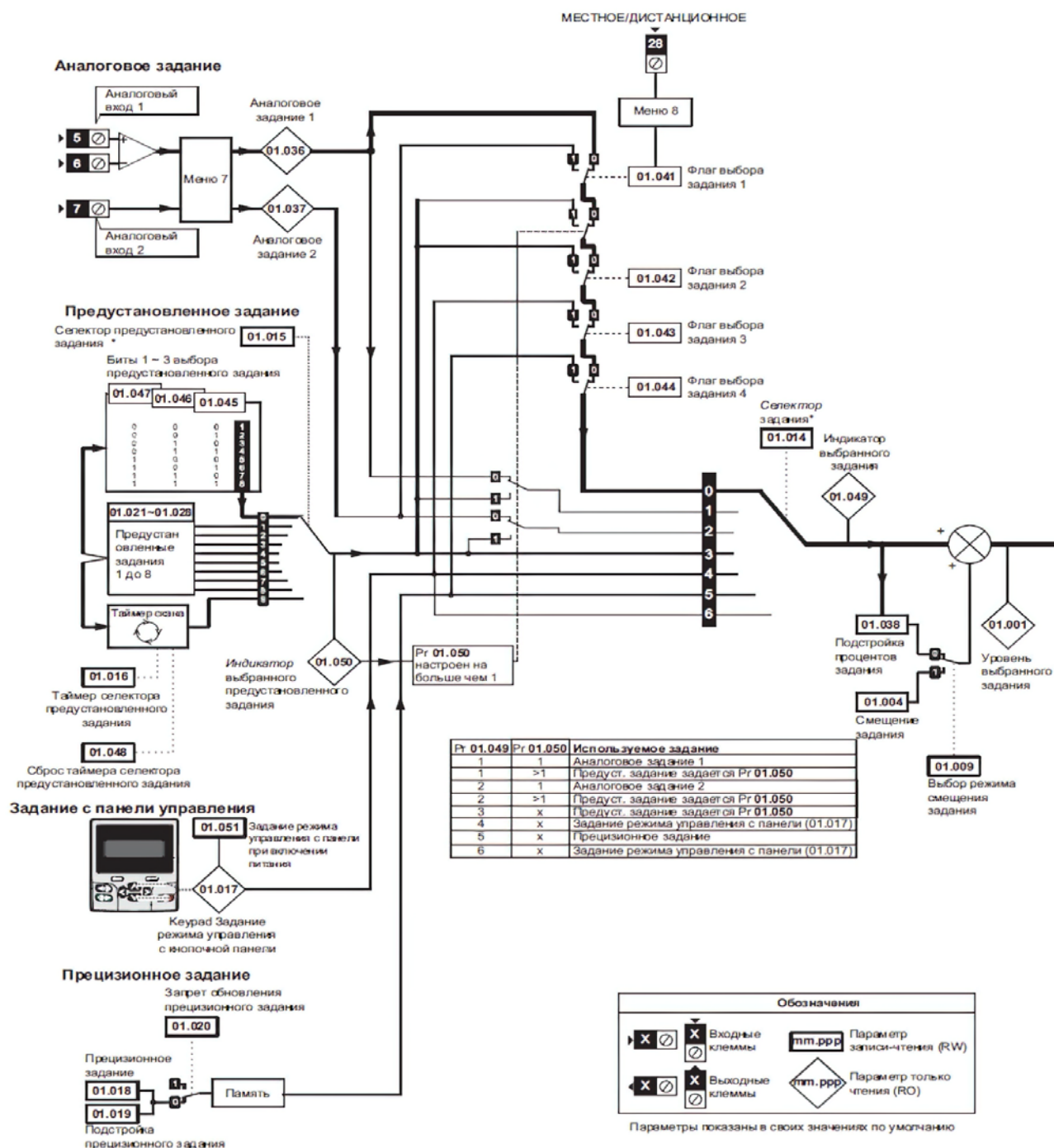


Рисунок 3.5. Меню задания скорости преобразователя частоты Unidrive M700

Как правило, в системе управления предусматривается подача двух заданий одновременно (основного и дополнительного задания). На рисунке 3.6 главное задание в преобразователе SinamicsG120 формируется из задания, приходящего по шине управления Profibus, а также из задания, получаемого с аналогового входа. Кроме главного задания, в преобразователе может быть выбран один из толчковых режимов Jog1 или Jog2; также предусмотрено задание от ПИД-регулятора, встроенного в программное обеспечение системы управления преобразователя.

Задание скорости в преобразователе TPD32 EV, как показано на рисунке 3.6, формируется из сигналов Rampref1 (P44) и Rampref2 (P48). Подключение аналогового входа преобразователя к цепи задания скорости выполняется при конфигурации аналогового входа, как показано на рисунке 3.8.

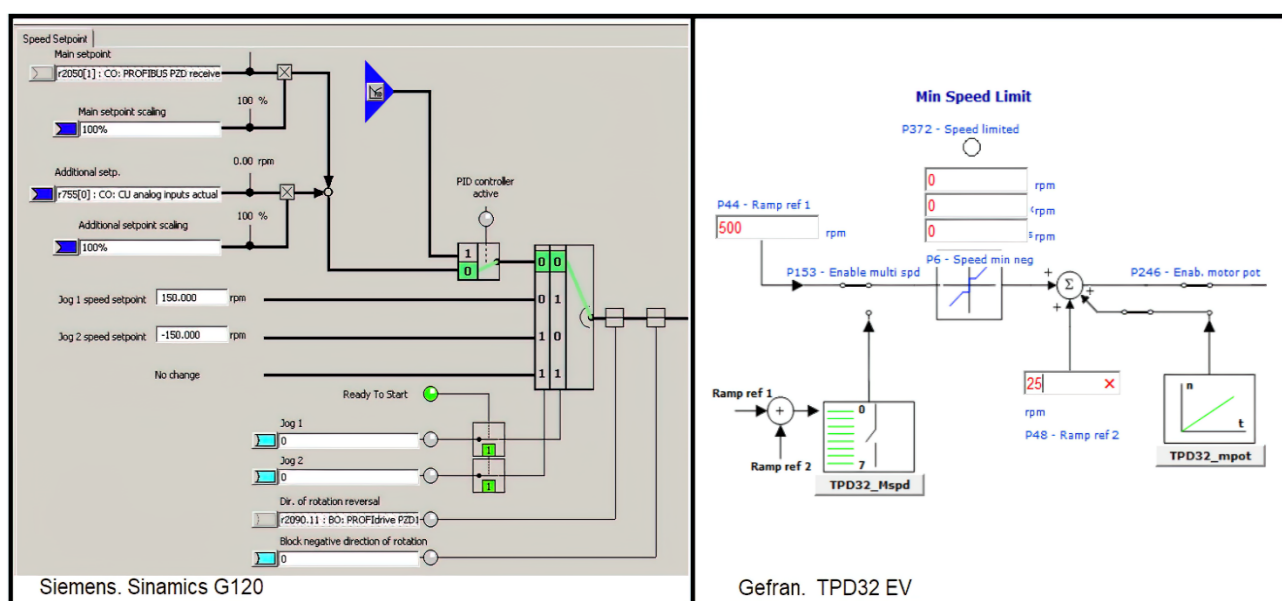


Рисунок 3.6. Функциональные схемы формирования задания скорости

3.2.1. Задание от аналоговых входов

Применение аналоговых сигналов для управления предусматривается практически во всех преобразователях. Аналоговые сигналы задания могут подаваться от потенциометров, устанавливаемых на пультах управления, от аналоговых выходов управляющих контроллеров и других источников. На рисунке 3.7 показана штатная схема подключения потенциометра для задания скорости преобразователя частоты ACS880. Аналоговые входы преобразователей обычно рассчитаны на прием сигналов следующих форматов: -10...+10 В; 0...+10 В; 0...20 мА; 4...20 мА.

Аналоговые входы преобразователя оснащаются аппаратными и программными фильтрами, модулями нормирования сигналов задания. На рисунке 3.8 и рисунке 3.9 показаны функциональные диаграммы обработки аналоговых сигналов задания в преобразователях постоянного тока TPD32EV и SinamicsDCM. В TPD32EV предусмотрен компаратор, определяющий попадание

входного сигнала в заданный диапазон. В SinamicsDCM предусмотрены выбор абсолютного значения и инвертирование сигнала.

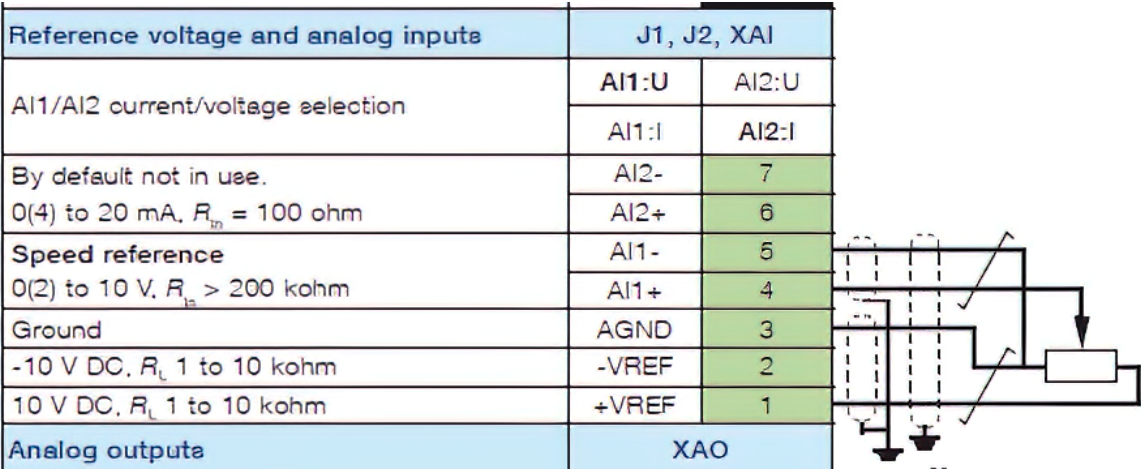


Рисунок 3.7. Подключение потенциометра к аналоговому входу для задания скорости в преобразователе ACS880

Цифровой сигнал на выходе блока обработки аналогового сигнала в приводе TPD32EV по умолчанию подключается к параметру P70 Rampref1 (см. рис. 3.8).

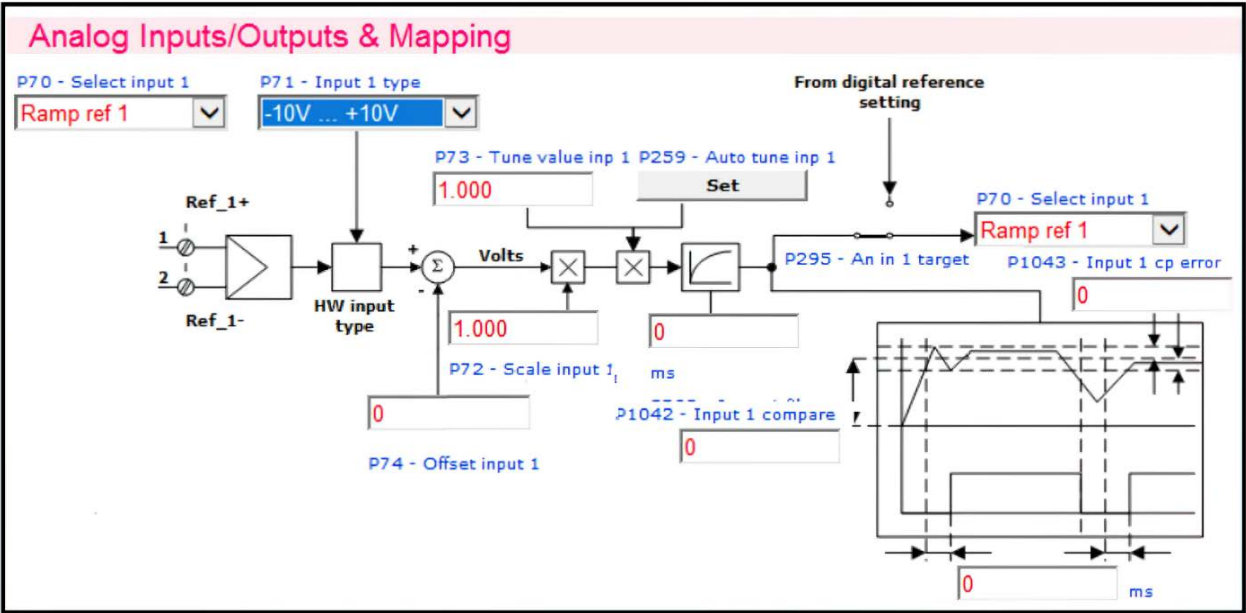


Рисунок 3.8. Обработка аналогового задания в преобразователе TPD32EV

Выходной цифровой сигнал блока обработки сигнала аналогового входа в приводе SinamicsDCM (коннектор r52011, см. рис. 3.9) по умолчанию подключается к параметру r50433 в цепи формирования сигнала задания.

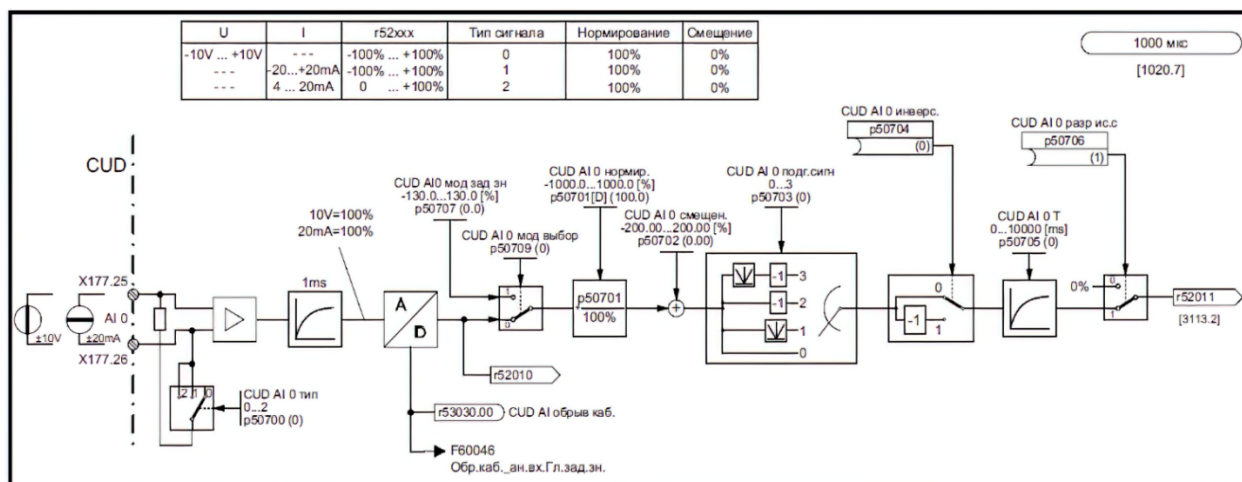


Рисунок 3.9. Обработка аналогового задания в преобразователе SinamicsDCM

3.2.2. Задание со встроенной панели управления

Преобразователи постоянного и переменного тока могут комплектоваться пультами (панелями) управления. Дизайн пультов, как правило, интуитивно понятен; с помощью пульта возможно выполнение конфигурации преобразователя, пуск и останов, задание скорости и т. п. Пульты управления используются для первоначального запуска преобразователя в работу, а также при выполнении профилактических работ по обслуживанию привода. На рисунке 3.10 представлены пульта управления.



Рисунок 3.10. Пульта управления преобразователей, выпускаемых фирмами Siemens, Vacon, Gefran, ABB, MitsubishiElectric

Для задания требуемой величины скорости и других параметров в пультах применяются различные способы; это может быть пошаговое изменение величины требуемого параметра с помощью кнопок, изменение величины параметра с помощью колесика и т. п. Дисплей пульта может иметь несколько строк для текста и цифр, а также для графики. Также применяются светодиодные

индикаторы для отображения определенных состояний преобразователя (готовность, работа, авария, ограничение момента и т. д.).

3.2.3. Фиксированные задания

Во многих прикладных задачах достаточно эксплуатировать привод на нескольких жестко заданных скоростях. В этом случае аналоговое заданное значение скорости подавать не требуется. Вместо этого фиксированные значения вызываются дискретными входными сигналами. Комбинация значений дискретных входов определяет адреса ячеек памяти, в которых занесены фиксированные задания. Например, как показано на рисунке 3.11, в преобразователях FR-A800 можно выбрать до 15 уставок частоты (и, тем самым, скоростей вращения двигателя), вызываемых через клеммы RH, RM, RL, REX. Величина уставки скорости определяется комбинацией этих четырех дискретных сигналов ($N = 4$); количество таких комбинаций (включая нулевое задание) равно 2^N .

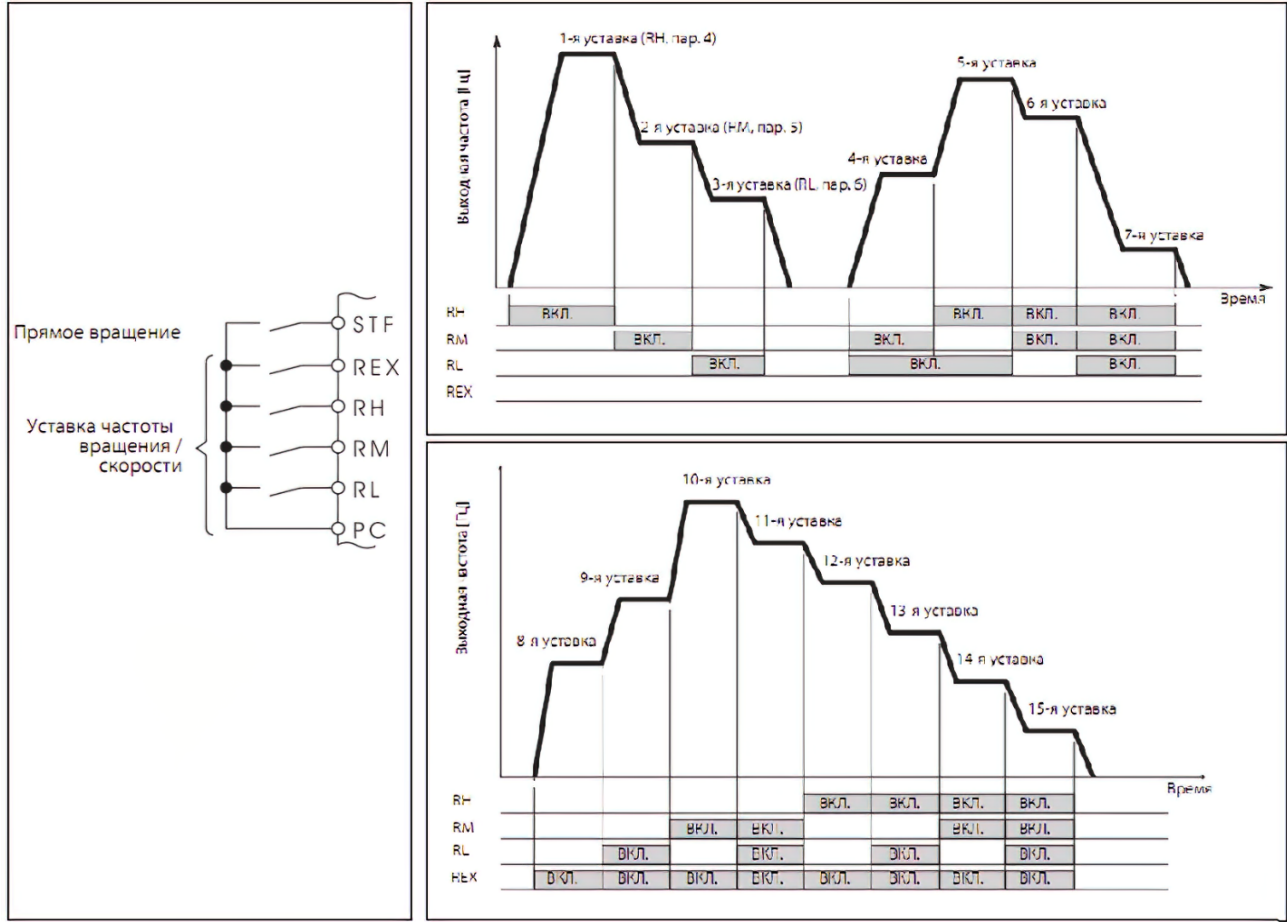


Рисунок 3.11. Фиксированные задания скорости через дискретные входы

Аналогичный инструмент фиксированных заданий в преобразователях Sinamics построен следующим образом, как показано на рисунке 3.12. В параметры слова управления канала задания P1020, P1021, P1022, P1023 устанавливаются бинарные дискретных входов. Комбинация значений этих

бинекторов определяет фиксированное задание, выдаваемое из набора констант в выходной бинектор r1024. Константы устанавливаются в параметрах P1001,.. P1015.

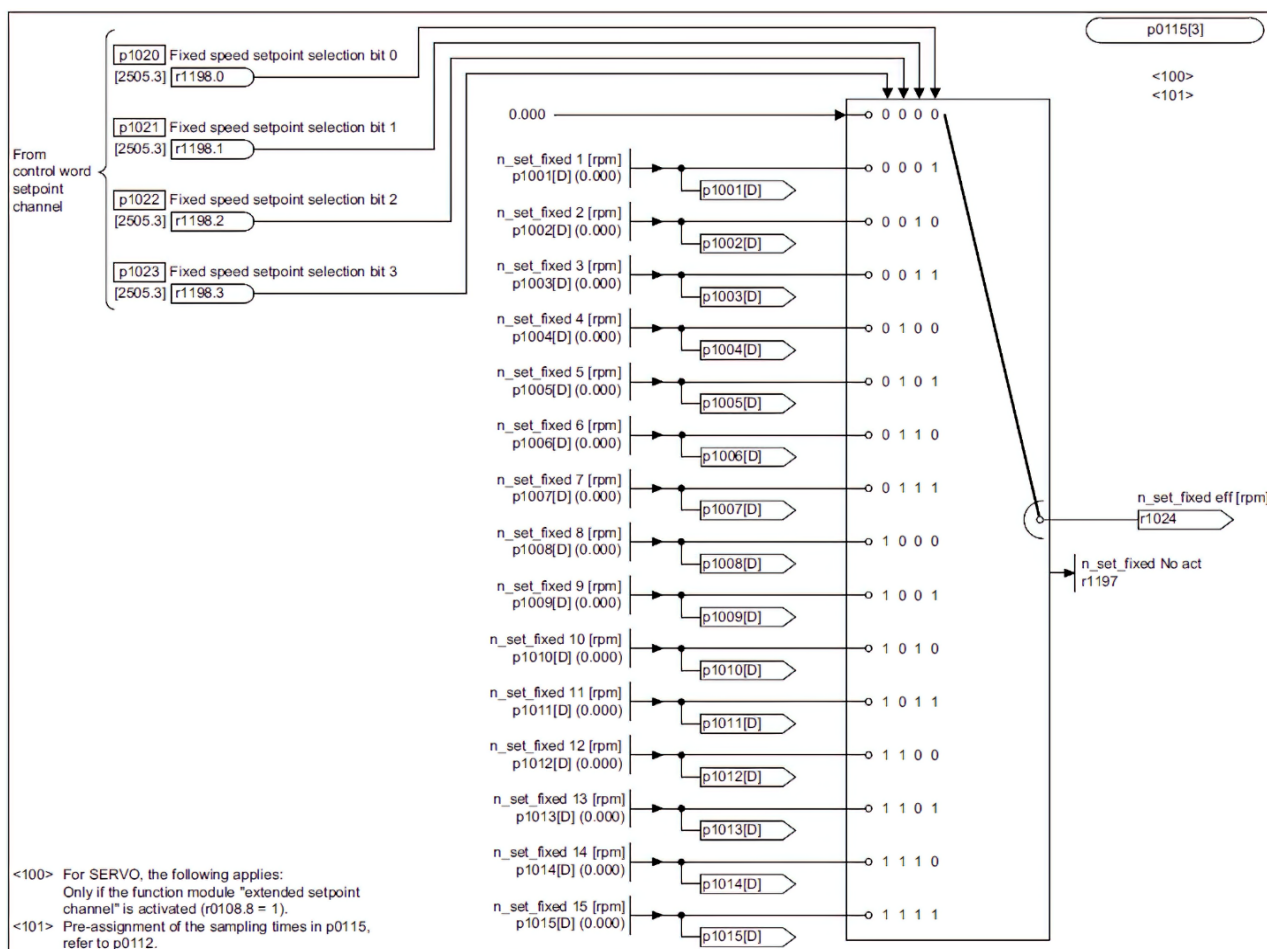


Рисунок 3.12. Фиксированные задания в SinamicsS120

3.2.4. Функция «мотор-потенциометр»

Изначально мотор-потенциометр представлял собой потенциометр с небольшим электроприводом, который управлялся двумя кнопками «Вперед» и «Назад», как показано на рисунке 3.13. Соответственно, при нажатии на кнопку «Вперед» («Увеличить») задание скорости возрастает, при нажатии на кнопку «Назад» («Уменьшить») электропривод мотор-потенциометра реверсируется и в итоге задание скорости снижается.

Для минимизации воздействия помех потенциометр R1 должен находиться как можно ближе к аналоговому входу системы управления приводом, установленным, как правило, в электропомещении. Кнопки «Вперед» и «Назад» можно вынести на пульт оператора, находящийся в машинном зале, где установлены двигатели технологических механизмов; при этом потенциометр остается рядом с системой управления.

В цифровой системе управления преобразователем ни мотора, ни потенциометра нет, но функция «мотор-потенциометр» активно используется.

Функция «мотор-потенциометр» позволяет регулировать скорость с использованием дискретных входов преобразователя; также эта функция используется для управления скоростью двигателя с пульта управления преобразователя.

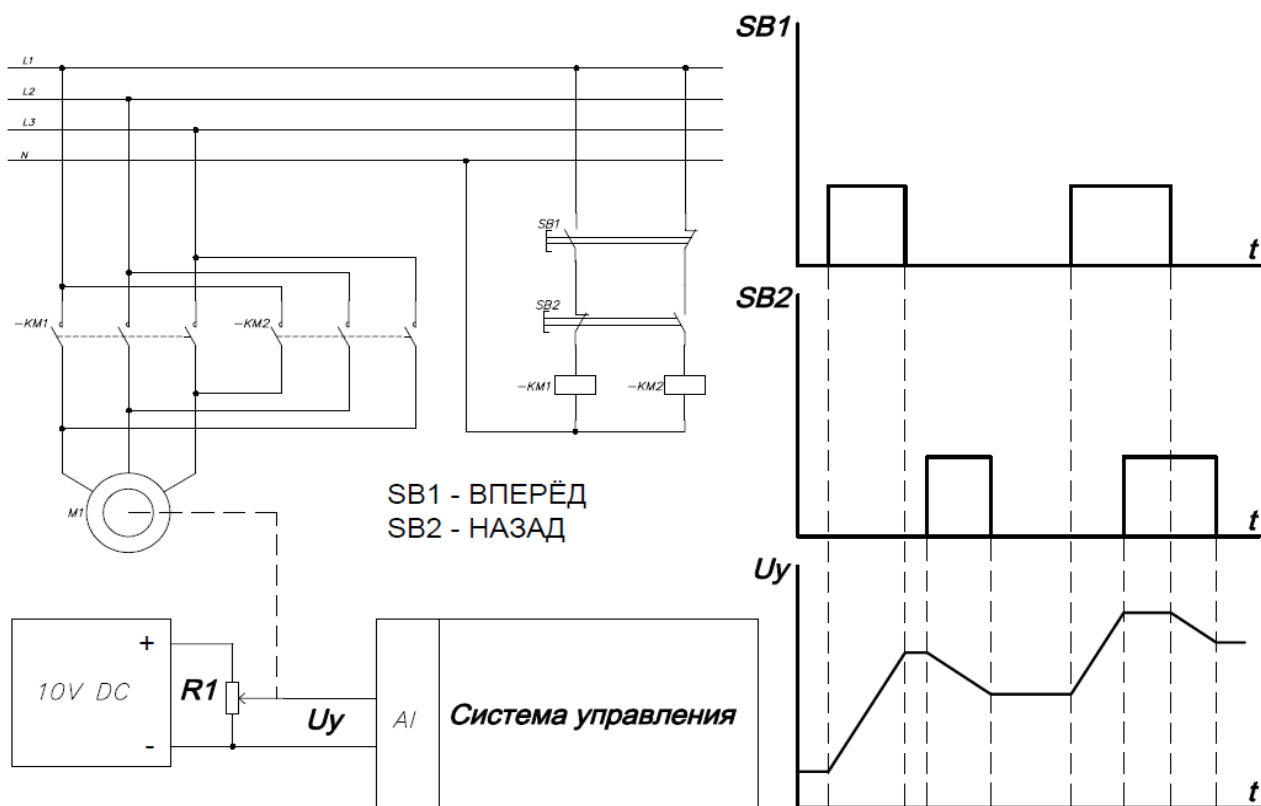


Рисунок 3.13. Устройство и диаграмма работы мотор-потенциометра

На рисунке 3.14 приведена функциональная схема функции «мотор-потенциометр», реализованной в преобразователе SinamicsDCM.

Предусмотрено изменение темпов увеличения и уменьшения выходного сигнала посредством параметров p50462 и p50463.

Возможна установка предустановленного значения выхода; величина задания определяется коннектором, подключаемым к параметру p50466, бит установки принимает параметр p50472.

Задание пределов изменения выходного сигнала мотор-потенциометра записывается в параметры p50468 и p50469.

Переключение между автоматическим и ручным заданием определяет значение бинектора, установленного в параметре p50471; коннектор с сигналом автоматического задания подключается к параметру p50461.

Бинекторы, управляющие увеличением или уменьшением выходного сигнала мотор-потенциометра, подключаются к параметрам p50673 и p50674.

В программном обеспечении блока, кроме выходного коннектора с сигналом задания r52240, предусмотрен также выход производной от сигнала задания, представленный коннектором r52241.

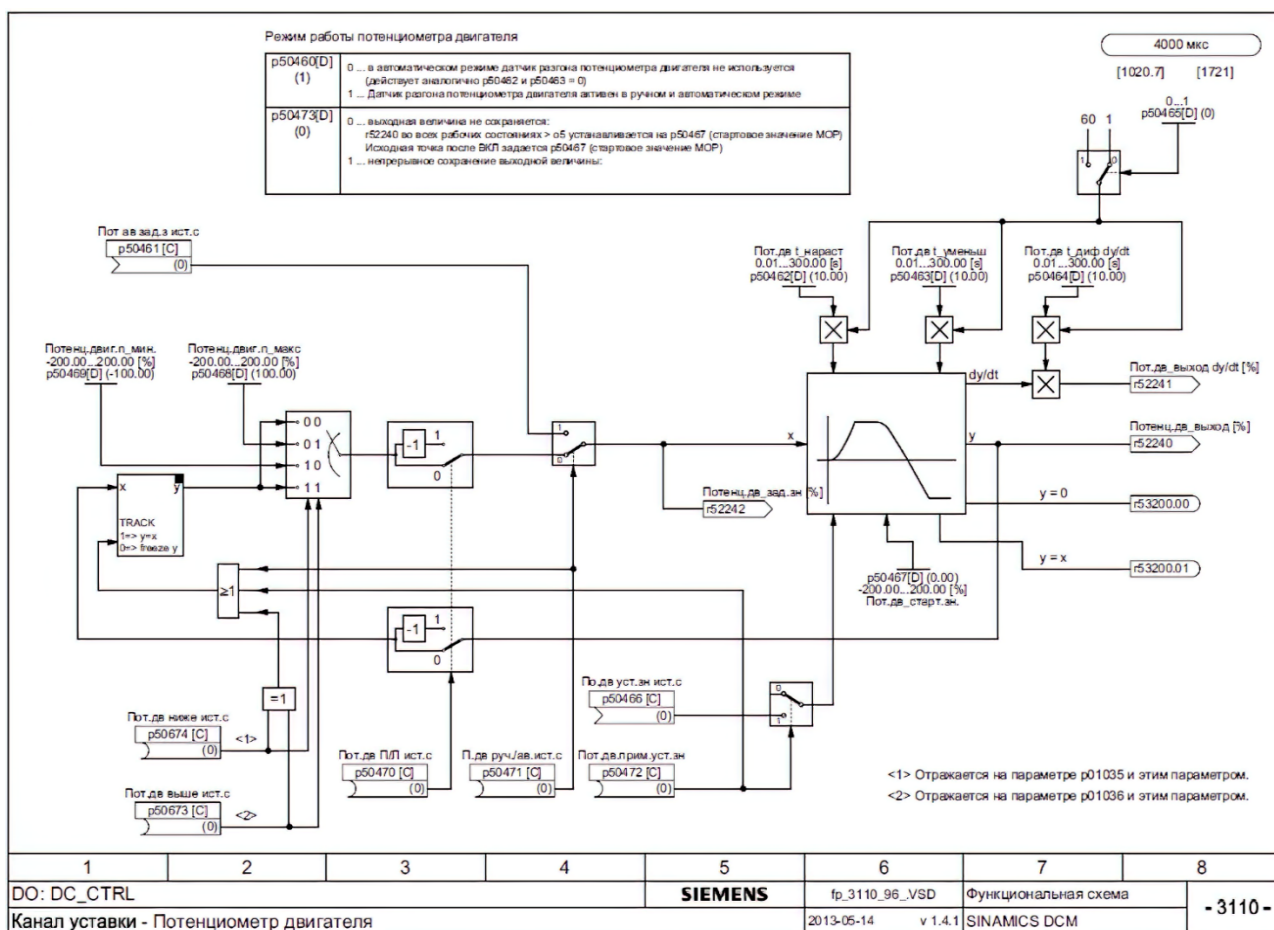


Рисунок 3.14. Функциональная схема функции «мотор-потенциометр»

3.2.5. Передача задания по шине управления

Задание на скорость привода, как и другие задания, может подаваться по полевой шине управления. **Полевые шины** – это промышленные системы связи, использующие для соединения устройств с центральной управляющей системой целый ряд передающих сред, таких как: медный кабель, оптоволоконно или беспроводные, с последовательной побитовой передачей. В цифровых приводах применяются различные полевые шины управления, отличающиеся по применению передающих сред и по протоколам обмена информацией. Можно отметить следующие системы: Modbus, ProfibusDP, Profinet, CAN, DeviceNet, PowerLink. В руководствах по эксплуатации преобразователей можно изучить порядок подготовки привода к обмену информацией с управляющей системой по полевой шине управления.

Для передачи задания необходимо сконфигурировать преобразователь так, чтобы он брал значение скорости из определенного слова входящей телеграммы. Например, при конфигурации телеграммы записи информации контроллера в преобразователь TPD32 EV по шине управления ProfibusDP второе слово телеграммы (Pdcout 1) записывается в параметр Rampref 1, как показано на рисунке 3.15; на рисунке 3.6 показано место параметра Rampref 1 в цепи задания скорости.

	IPA	Short Description	Value
	9657	Pdc out 0	Virtual Dig In
	9658	Pdc out 1	Ramp ref 1
	9659	Pdc out 2	T current lim +
	9660	Pdc out 3	T current lim -
	9661	Pdc out 4	Load comp
	9662	Pdc out 5	Adapt Par

Рисунок 3.15. Пример распределения слов телеграммы Profibus в параметры преобразователя TPD32EV

На рисунке 3.16 показан порядок конфигурации главного задания скорости в преобразователе SinamicsG120, передаваемого по шине управления Profibus.

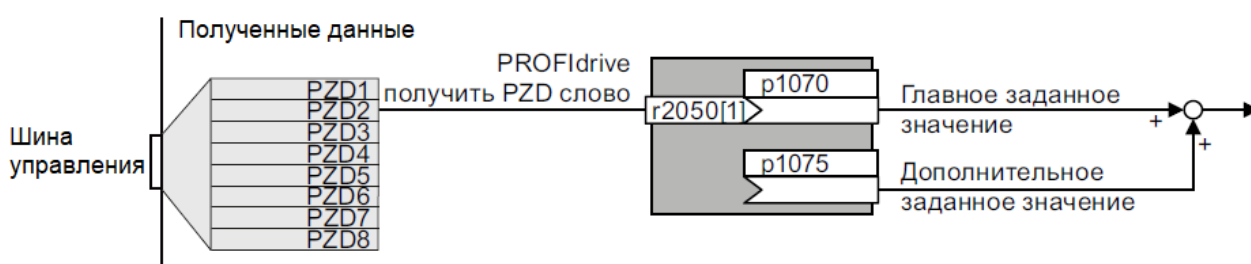


Рисунок 3.16. Подача заданного значения через шину управления

Слово PZD2 телеграммы Profibus, в которое контроллер записывает задание на скорость привода, в преобразователе SinamicsG120 попадает в коннектор r2050 [1]. При конфигурации привода этот коннектор устанавливается в BICO параметр p1070, предназначенный для главного заданного значения (задания скорости привода).

4. ПОДГОТОВКА СИГНАЛА ЗАДАНИЯ

Принятый одним из вышеперечисленных способов сигнал задания скорости подготавливается для подачи на вход регулятора скорости. В основном применяются следующие способы подготовки сигнала.

- Изменение масштаба и инверсия знака заданного значения.
- Ограничение максимального и минимального задания.
- Ограничение минимального задания по абсолютной величине.
- Пропуск критических частот.
- Задатчик интенсивности (Ramp).

На рисунке 4.1 приведена функциональная схема подготовки сигнала задания в преобразователе SinamicsDCM.

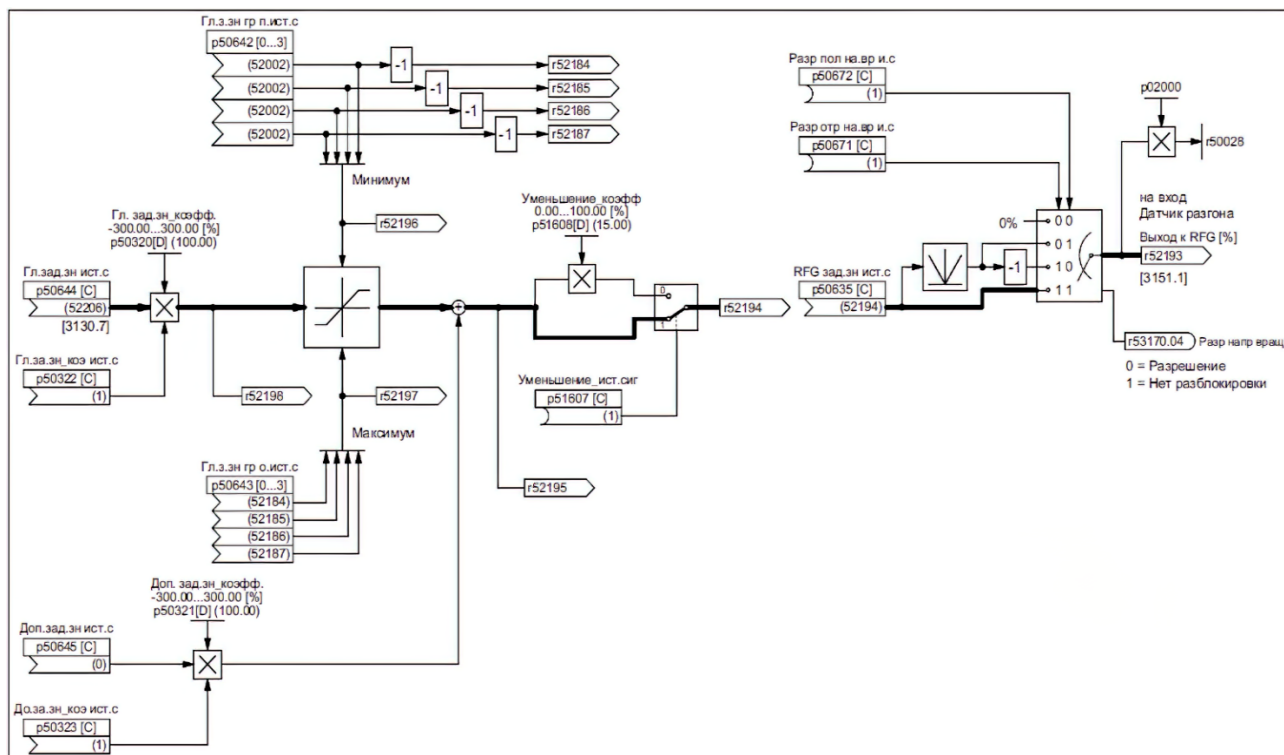


Рисунок 4.1. Подготовка сигнала задания в SinamicsDCM

Коннектор с сигналом главного заданного значения подключается к параметру p50644; параметры p50320 и p50322 предназначены для масштабирования сигнала главного задания.

Верхний и нижний пределы блока ограничения главного задания определяются коннекторами, подключенными к параметрам p50642 и p50643, а также логикой выбора минимального верхнего ограничения и максимального нижнего ограничения.

К сигналу на выходе этого блока ограничения может быть добавлен дополнительный сигнал задания коннектором, подключенным к параметру p50645; параметры p50321 и p50323 предназначены для масштабирования сигнала дополнительного задания.

Битом, устанавливаемым бинектором в параметр p51607, можно уменьшить масштаб сигнала задания в пределах от 0 до 100 %; коэффициент уменьшения задается параметром p51608.

Сигнал коннектора на входе параметра p50635 может быть передан в выходной коннектор r52193 без изменения, может быть выбрана абсолютная величина сигнала, абсолютная величина, умноженная на (-1), также в коннектор r52193 может быть внесена величина 0 %. Выбор того или иного преобразования определяется комбинацией двух бинекторов, подключенных к параметрам p50671 и p50672.

4.1. Ограничение максимального и минимального значения

Максимальное и минимальное допустимые задания скорости могут быть одинаковыми по величине, например, ограничения допустимой скорости двигателя (в оборотах в минуту, rpm):

$$n_{\max} = 3000 \text{ rpm}, \quad n_{\min} = -3000 \text{ rpm}.$$

Ограничения скорости двигателя по технологическим соображениям могут быть различной величины, например:

$$n_{\max} = 3000 \text{ rpm}, \quad n_{\min} = -100 \text{ rpm}$$

$$\text{или } n_{\max} = 3000 \text{ rpm}, \quad n_{\min} = 0 \text{ rpm}.$$

Например, на рисунке 4.2 показана функциональная диаграмма инверсии и ограничения задания, реализованная в преобразователе SinamicsG120.

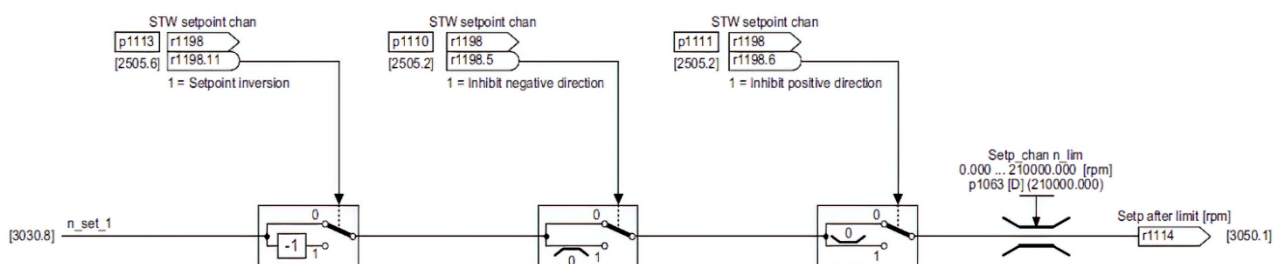


Рисунок 4.2. Ограничения и инверсия сигнала задания

4.2. Ограничение минимального задания по абсолютной величине

В некоторых случаях может быть установлено минимально допустимое по абсолютной величине задание больше нуля, как показано на рисунке 3.6 в цепи формирования задания скорости преобразователя TPD32EV. Это может понадобиться, например, если поступающее с аналогового входа задание содержит небольшой шум (помеху); тогда порог минимального задания устанавливается выше уровня этой помехи.

4.3. Пропуск критических частот

Критические скорости могут быть предварительно заданы в системах, в которых требуется исключить определенные скорости или диапазоны скоростей вращения двигателя, например, из-за проблем с механическим резонансом. Функция критических скоростей не допускает, чтобы уставка скорости долго находилась в критическом диапазоне. На рисунке 4.3 показана схема функции пропуска критических частот и ограничения скорости в преобразователях SinamicsG120.

Абсолютное значение допустимой минимальной скорости задается параметром p1080 и коннектором, подключенным к параметру p1106; максимальное из них значение определяет допустимый минимум заданной

скорости. Величины критических скоростей указываются в параметрах p1091, p1092, p1093, p1094. Коннектор, подключенный к параметру p1098, масштабирует заданные значения критических скоростей. В параметре p1101 задается ширина зоны пропуска.

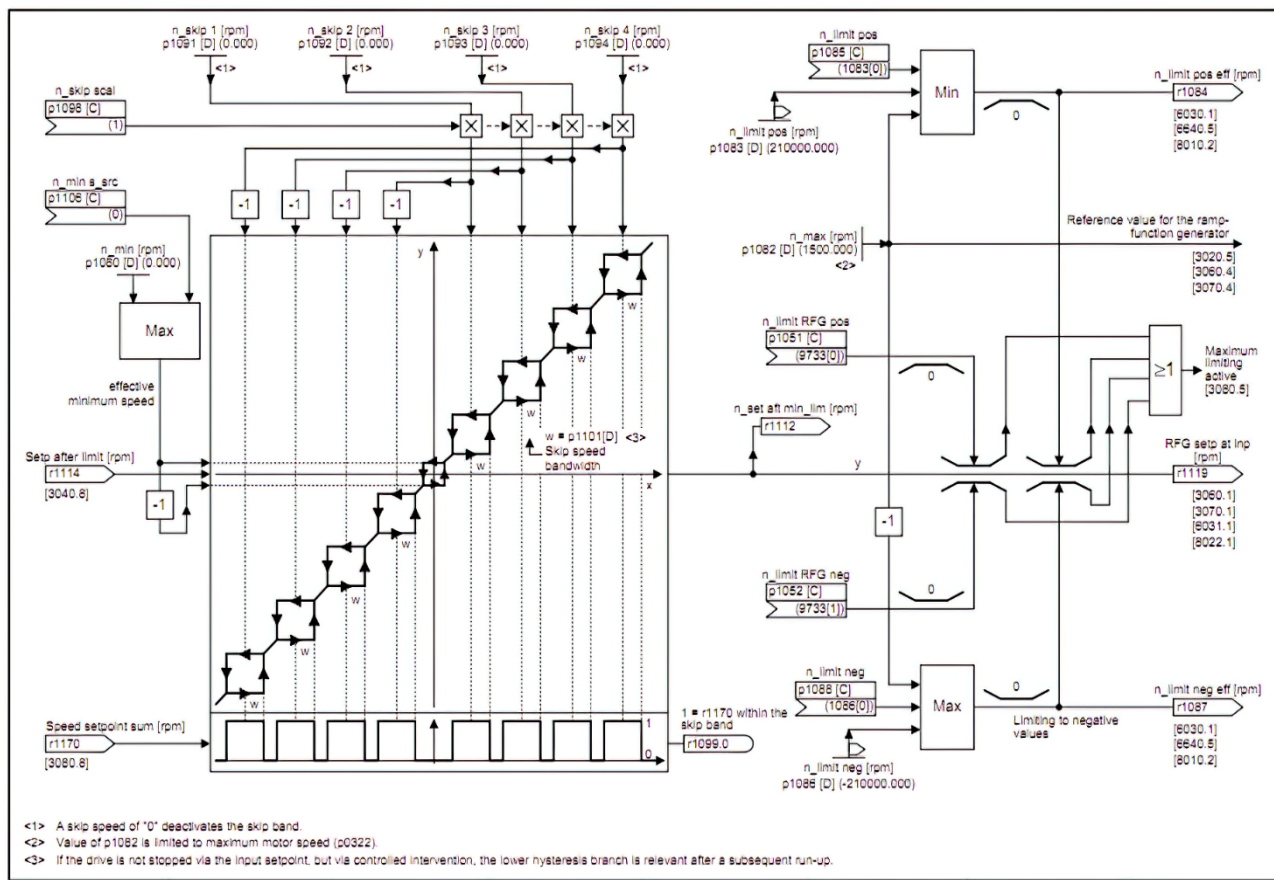


Рисунок 4.3. Функция пропуска критических частот

Диаграмма, поясняющая назначение параметров настройки функции пропуска частот в преобразователе частоты FR-A800 Mitsubishi, показана на рисунке 4.4. В отличие от привода Sinamics на графике не предусмотрено изменение устанавливаемой частоты по петле гистерезиса при изменении задания в районе резонансной частоты.

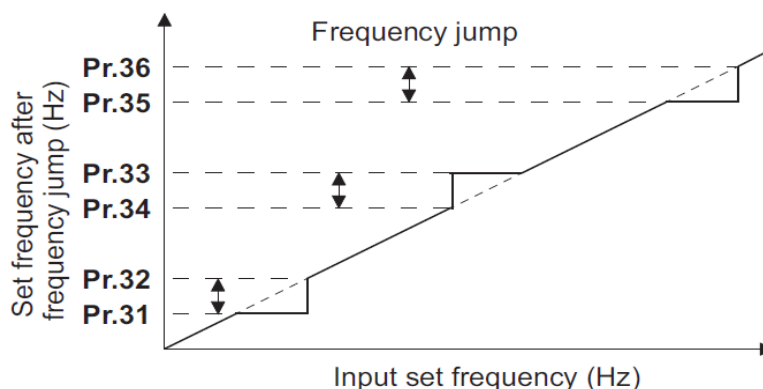


Рисунок 4.4. Пропуск критических частот механизм

4.4. Задатчик интенсивности

Задатчик интенсивности определяет темп нарастания сигнала задания на входе регулятора. Ограничение темпа нарастания скорости приводит к уменьшению необходимого динамического момента двигателя. На рисунке 4.5 представлены графики задания скорости x на входе задатчика интенсивности, сигнал на выходе задатчика интенсивности y и график динамического момента M , который должен быть создан приводом для достижения заданной скорости (при моменте сопротивления равном нулю).

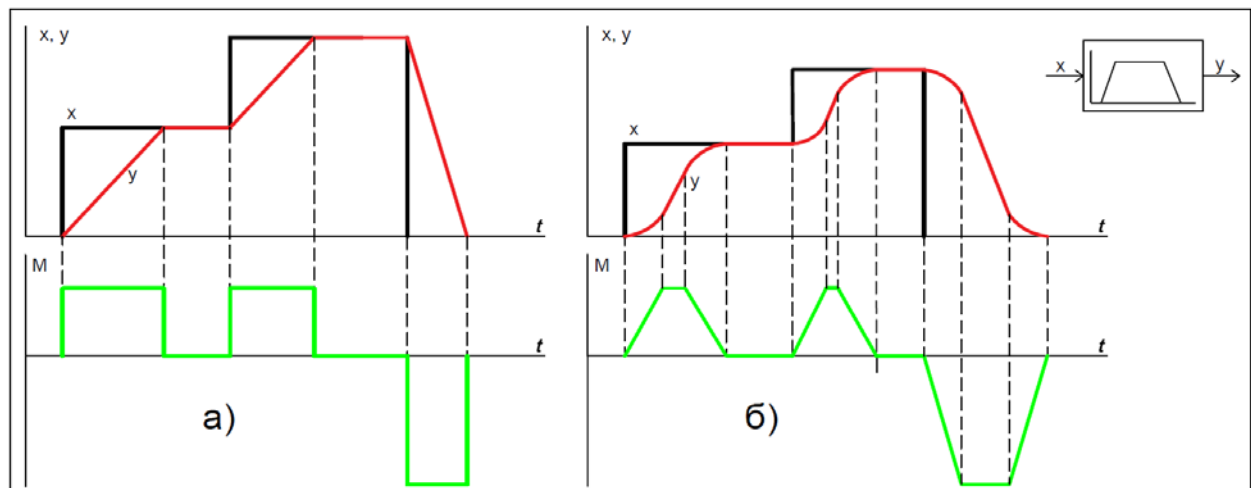


Рисунок 4.5. Сигналы задатчика интенсивности и динамический момент привода: а) линейный ЗИ; б) S-образный ЗИ

Простые линейные задатчики интенсивности применяются в функциональных блоках преобразователей, где требуется ограничить темп изменения сигнала. Линейные задатчики интенсивности позволяют ограничить динамический момент привода, однако не ограничивают рывок (производную по времени от момента). Ограничивающие рывок S-образные задатчики интенсивности полезны для ограничения бросков тока привода, снижения ударов в механизме при выборе люфтов.

Функции задатчиков интенсивности могут иметь следующие дополнительные возможности:

- кроме основного выходного сигнала задания скорости может быть дополнительный выходной сигнал производной от задания скорости;
- задания параметров темпа разгона и замедления могут иметь несколько фиксированных значений или задаваться по шине управления;
- часто предусматривается возможность обхода задатчика (байпас) по специальному сигналу разрешения;
- на основной выходной сигнал задатчика могут накладываться дополнительные ограничения по амплитуде;
- формирование битов слова состояния задатчика интенсивности.

На рисунке 4.6 приведена функциональная схема задатчика интенсивности преобразователя SimoregDCM.

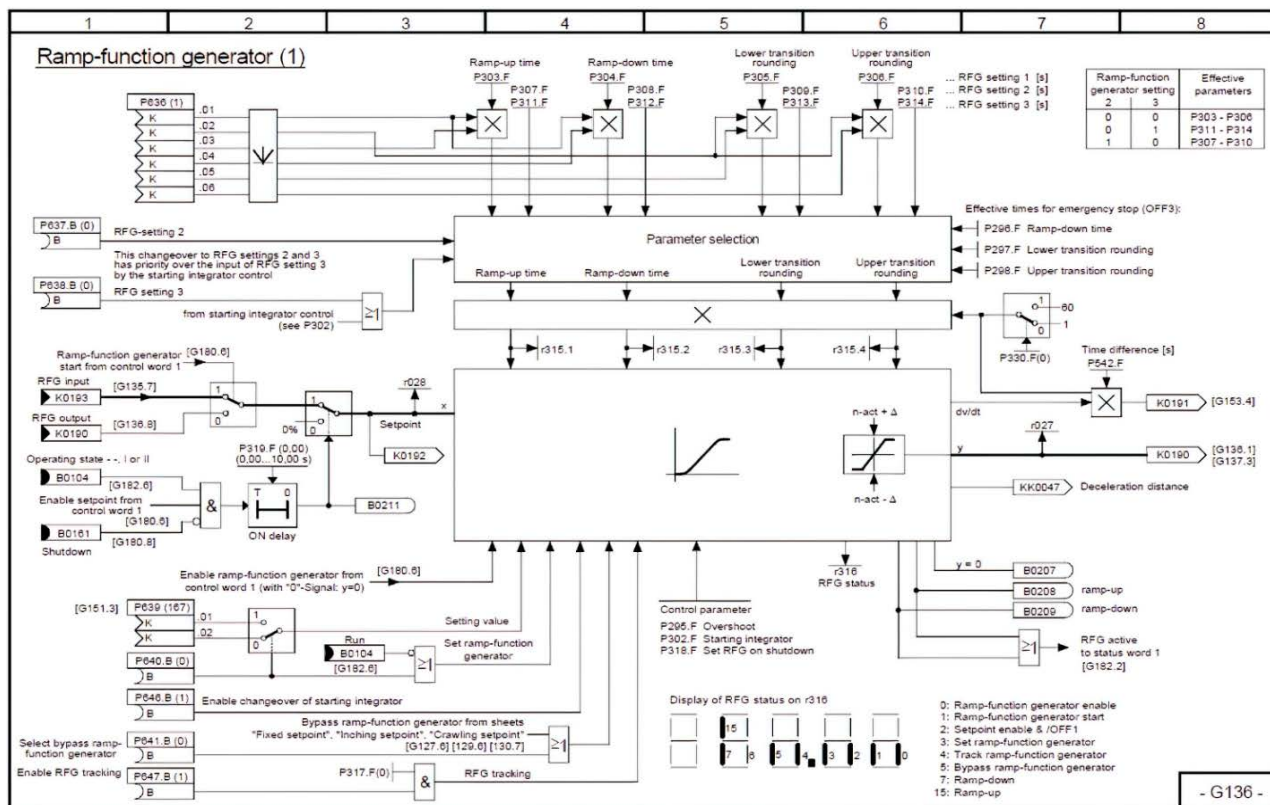


Рисунок 4.6. Функциональная схема задатчика интенсивности SimoregDCM

5. ФУНКЦИИ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ

На рисунке 5.1 представлена функциональная схема регулятора скорости преобразователя TRD32EV; кроме собственно ПИ-регулятора здесь предусмотрены функции, значительно расширяющие возможности регулятора скорости. К таким функциям относятся следующие:

- выбор источника обратной связи;
- адаптация пропорционального и интегрального коэффициентов ПИ-регулятора;
- функция статизма или Dгоор функция;
- компенсация момента сопротивления и момента инерции;
- Speed Up функция.

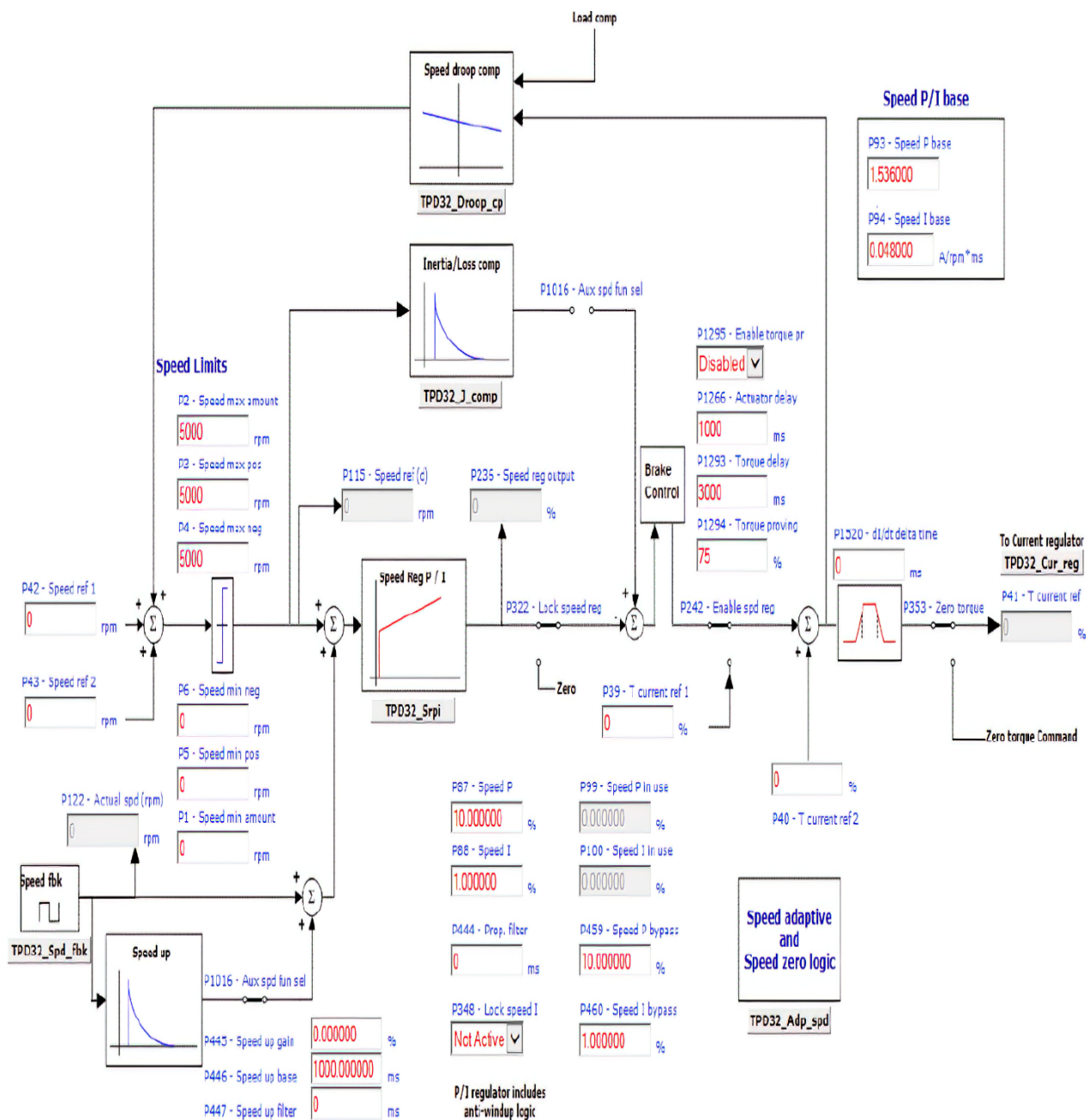


Рисунок 5.1. Регулятор скорости преобразователя TPD32EV

5.1. ПИ-регулятор

Основной закон регулирования регулятора скорости, принятый в преобразователях постоянного и переменного тока, — пропорционально-интегральный. Соотношение пропорциональной и интегральной составляющих выполняется по двум вариантам, отличающимся вычислением интегральной составляющей (см. рис. 5.2). Соответствующие передаточные функции $W_a(s)$ и $W_b(s)$ имеют вид:

$$W_a(s) = (K_{\Pi} T_{\text{и}} s + 1) / T_{\text{и}} s, \quad W_b(s) = K_{\Pi} (T_{\text{и}} s + 1) / T_{\text{и}} s. \quad (5.1)$$

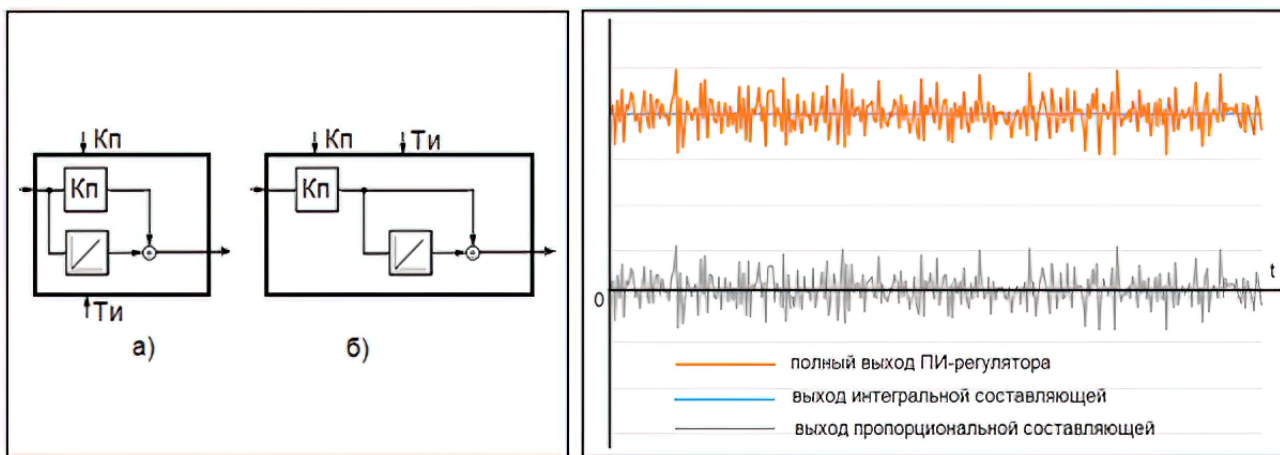


Рисунок 5.2. Структурные схемы ПИ-регулятора; пропорциональная и интегральная составляющие выхода регулятора скорости

В некоторых случаях отдельно используются пропорциональная или интегральная составляющие выхода ПИ-регулятора. Поскольку ПИ-регулятор скорости обеспечивает нулевую установившуюся ошибку, то среднее значение пропорциональной составляющей выхода регулятора равно нулю. Как видно из рисунка 5.2, интегральная составляющая выхода соответствует фильтрованному значению полного выхода регулятора.

5.1.1. Постоянная интегрирования и интегральный коэффициент регулятора

Уравнение для вычисления выхода интегратора в каждом цикле $[n]$ управляющего контроллера можно записать в следующем виде:

$$y[n] = y[n-1] + (\Delta t / T_i) \cdot x[n] \text{ или } y[n] = y[n-1] + K_i \cdot x[n], \quad (5.2)$$

где Δt – длительность цикла; T_i – постоянная интегрирования; $y[n-1]$ – интегральная сумма интегратора; K_i – интегральный коэффициент усиления.

Учитывая соотношения (5.2), следует отметить, что одни производители преобразователей в качестве параметра интегральной составляющей регулятора используют параметр T_i , а другие – параметр K_i . Эти два параметра обратно пропорциональны друг другу.

5.1.2. Адаптация параметров ПИ-регулятора

Во многих механизмах в процессе их работы происходит изменение механических параметров, например, меняется момент инерции моталки и разматывателя при изменении диаметра рулона с металлом. В таком случае для поддержания оптимальной настройки контура скорости необходимо менять коэффициенты регулятора скорости. В ряде преобразователей предусматривается так называемая адаптация параметров K_p и T_i (или K_i).

Такая функция адаптации предусматривает изменение параметров регулятора в зависимости от задаваемого входного сигнала. На рисунке 5.3 приведены функциональные диаграммы адаптации пропорционального K_p и интегрального T_n коэффициентов регулятора скорости преобразователя SinamicsDCM.

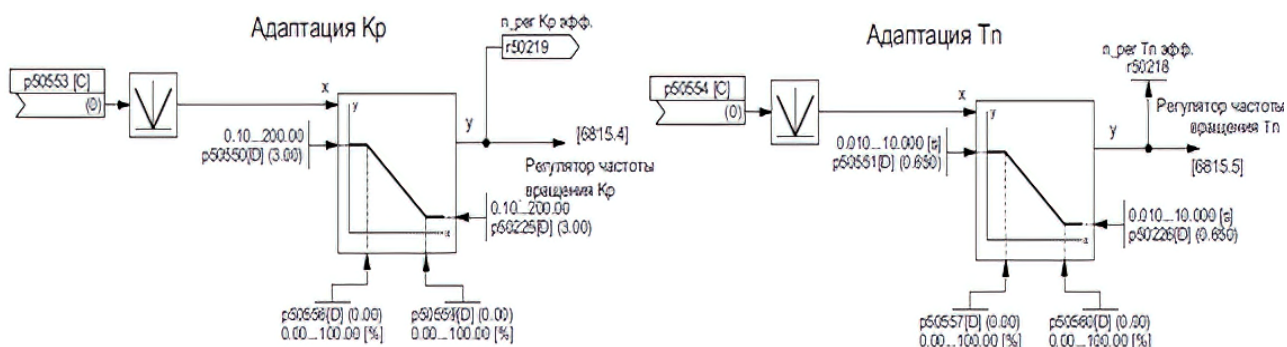
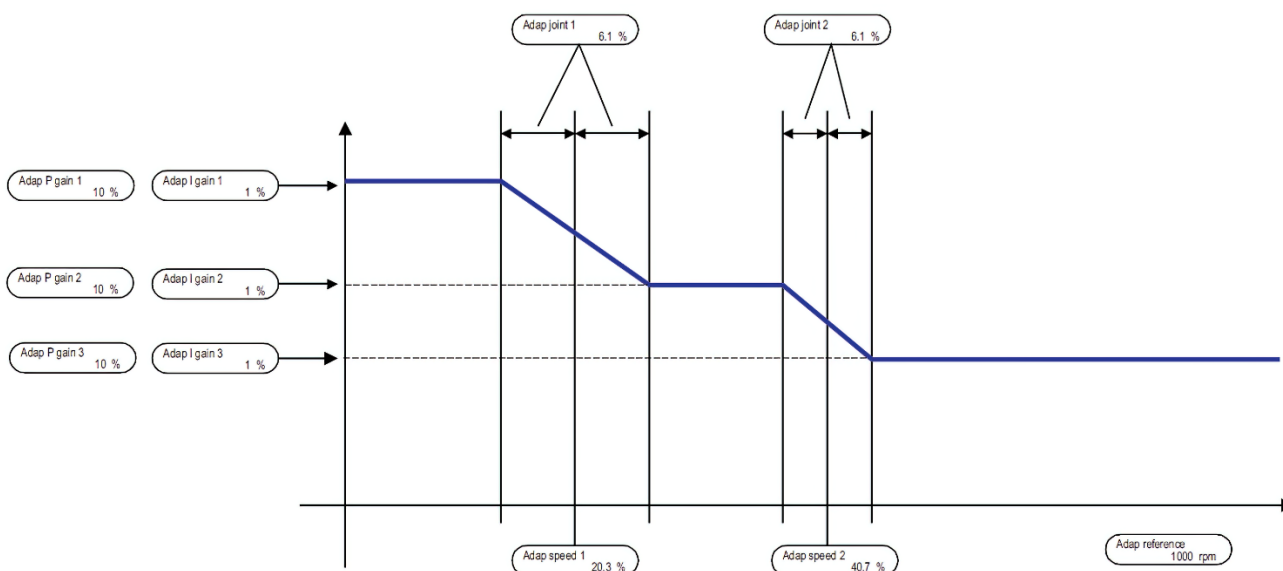


Рисунок 5.3. Адаптация коэффициентов ПИ-регулятора скорости SinamicsDCM

Величина пропорционального коэффициента K_p может меняться в зависимости от абсолютной величины коннектора, подключаемого к параметру p50553. Диапазон изменения K_p определяют параметры p50550 и p50225. Параметры p50556 и p50559 определяют границы, в которых коэффициент K_p меняется в пределах своего диапазона. Механизм изменения интегрального коэффициента T_n аналогичен.

На рисунке 5.4 приведена диаграмма адаптации коэффициентов регулятора скорости “Speed P” и “Speed I” преобразователя TPD32EV. Настройка блока адаптации состоит в формировании зависимостей коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих от параметра адаптации. Для этого по каждой из составляющих ПИ-регулятора задаются три значения коэффициента, соответствующие определенным диапазонам параметра адаптации, а также два значения параметра адаптации, определяющие указанные диапазоны. Для плавного изменения коэффициентов “Speed P” и “Speed I” на границах диапазонов задаются величины коридоров, в которых происходит изменение коэффициентов.



Часто в регуляторах скорости предусматриваются возможности фиксации или установки заданного значения интегральной составляющей по дискретному сигналу; подключения или отключения пропорциональной или интегральной составляющих и т. п.

Как правило, в преобразователях предусматривается несколько способов получения сигнала обратной связи по скорости. Можно отметить следующие источники сигнала фактической скорости привода.

Тахогенераторы постоянного тока по принципу действия и конструкции представляют собой электрические коллекторные микромашины постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов. Выходным сигналом тахогенератора является напряжение, величина которого прямо пропорциональна угловой скорости вращения ротора; это напряжение снимается через щетки с коллектора. Поскольку в работе участвуют коллектор и щетки, тахогенератор постоянного тока подвержен износу. Кроме того, щеточно-коллекторный узел в процессе своей работы порождает импульсные помехи в выходном сигнале тахогенератора. Тахогенераторы постоянного тока характеризуются коэффициентом преобразования, который выражает отношение снимаемого напряжения к соответствующей данному напряжению частоте вращения. Этот параметр дается в технической документации на тахогенератор и измеряется в милливольтках, умноженных на обороты в минуту. Обычно напряжение тахогенератора подается на специализированный аналоговый вход, способный

принимать достаточно высокое напряжение сигнала скорости, например, до 270 В.

Асинхронные и синхронные тахогенераторы применяются значительно реже, чем тахогенераторы постоянного тока.

5.2.2. Инкрементальный энкодер

Инкрементные энкодеры предназначены для передачи информации о направлении, угле поворота и скорости вращения вала. Энкодер формирует периодические сигналы, при этом количество периодов пропорционально углу поворота вала, которые регистрируются и интерпретируются приемным устройством в качестве информации о скорости и угле поворота вала. Устройство энкодера показано на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5. Устройство инкрементального энкодера

Все инкрементальные энкодеры имеют интерфейс в виде двух импульсных сигналов А и В, а некоторые имеют и дополнительный индексный канал I (см. рис. 5.6). Импульсный сигнал, формируемый на выходе инкрементального энкодера, принимает два значения – максимальное и минимальное. Минимальное значение в большинстве случаев соответствует нулю. Максимальное значение может быть или фиксированным (например: 3,3 В, 5 В), так и зависеть от напряжения питания, поданного на энкодер. Разрешение энкодера определяется количеством импульсов на один оборот.

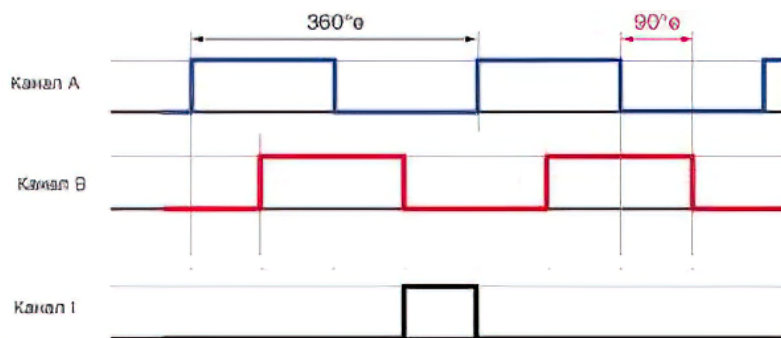


Рисунок 5.6. Выходные сигналы инкрементального энкодера

По способу формирования выходного сигнала можно выделить энкодеры с несимметричным выходом и с дифференциальным выходом.

В случае несимметричного выхода сигналы всех трех импульсных каналов формируются относительно общей точки источника питания. Такой сигнал достаточно прост при использовании и экономичен с точки зрения числа подключаемых проводов, однако уязвим для электромагнитных помех в случае передачи по проводам значительной длины. Сигнал энкодеров с дифференциальным выходом лишен этого недостатка. Для каждого канала при помощи специального формирователя вместо одного сигнала формируется пара сигналов – нормальный и логически инверсный, а соответствующий приемник принимает сигнал по разности этой пары сигналов. Это позволяет устойчиво передавать сигнал по длинным проводам (десятки и сотни метров) даже при наличии помех.

5.2.3. Расчетное значение фактической скорости

В преобразователях частоты, работающих в векторном режиме, возможен режим работы регулятора скорости с сигналом обратной связи **n_Act**, вычисляемым математической моделью двигателя. Параметры математической модели двигателя определяются на этапе автоматической настройки преобразователя.

На рисунке 5.7, а показана диаграмма выбора сигнала обратной связи по скорости в преобразователях частоты Sinamics. В коннектор **r0063** заносится величина фактической скорости, определяемая или от энкодера, или от математической модели; выбор источника сигнала обратной связи определяется бинарным (дискретным сигналом) **r1407.1**. Коннектор **r0063** передает информацию о фактической скорости в регулятор скорости.

На рисунке 5.7, б показан фрагмент диаграммы регулятора скорости с использованием вычисленного значения фактической скорости двигателя.

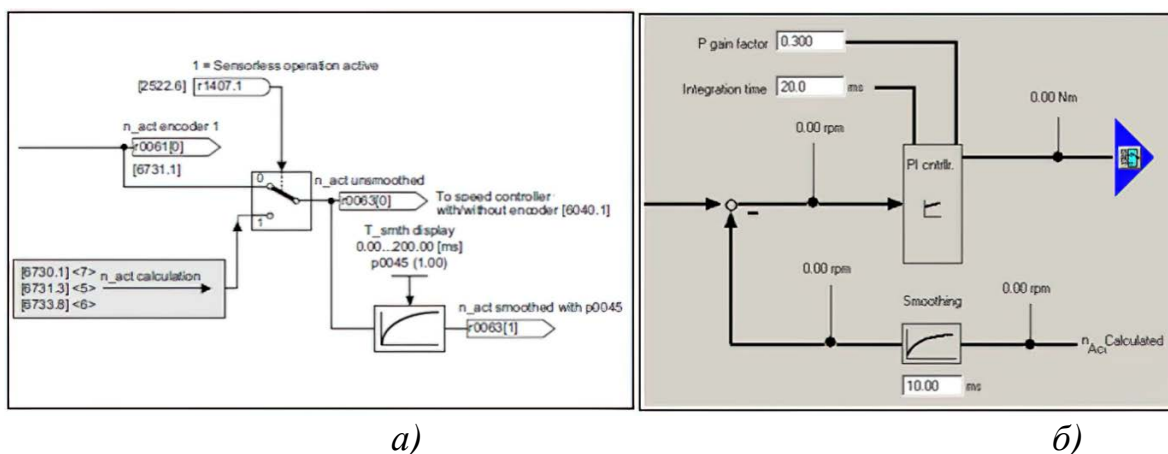


Рисунок 5.7. Применение расчетного значения фактической скорости в преобразователе частоты

5.2.4. Обратная связь по ЭДС

В преобразователях постоянного тока информация о скорости двигателя **n** может быть получена из величины ЭДС **E_a**, если поток возбуждения двигателя **Φ_в** номинальный или используется двигатель с постоянными магнитами.

$$E_a = C_E \cdot n \cdot \Phi_v, \quad E_a = U_a - I_a \cdot R_a - L_a \cdot dI_a/dt, \quad (5.3)$$

где U_a – напряжение на обмотке якоря двигателя; I_a – ток якоря; R_a – сопротивление якорной цепи; L_a – индуктивность якорной цепи; dI_a/dt – производная от тока якоря.

При использовании обратной связи по ЭДС двигателя отпадает необходимость в установке дополнительного датчика скорости, однако точность такого сигнала обратной связи ниже, чем при использовании тахогенератора или энкодера. Негативное влияние на точность привносят помехи, влияющие на датчик напряжения якоря, смещение сигнала датчика напряжения якоря, а также помехи в сигнале датчика тока якоря.

Вместе с тем обратная связь по ЭДС используется на начальном этапе наладки привода для конфигурации параметров тахогенератора или энкодера; знак фактической скорости, определенной тахогенератором или энкодером, должен совпадать со знаком скорости, определенной по ЭДС двигателя.

На рисунке 5.8 приведена диаграмма конфигурации сигнала обратной связи по скорости **nFdbk** преобразователя постоянного тока DCREG4, разработанного компанией «Elettronica SanternoS.p.A».

В этом преобразователе предусмотрено три входа для подключения тахогенератора; входы отличаются допустимым максимальным напряжением; имеются параметры для наладки канала тахогенератора. Предусмотрен канал обратной связи по ЭДС; имеются параметры для наладки этого канала. Сигнал обратной связи по скорости можно также получать от энкодера. Выбор одного из трех каналов осуществляется параметром C070.

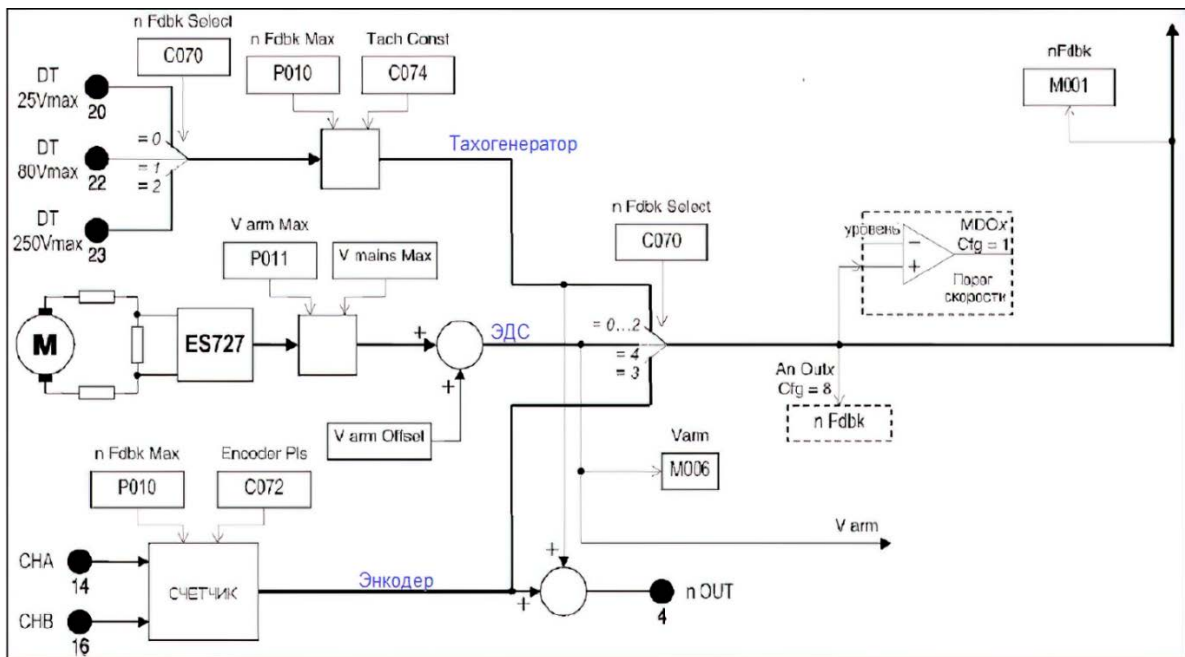


Рисунок 5.8. Конфигурация сигнала обратной связи привода DCREG4

5.3. Функция статизма, Droop-function

Функция статизма, она же Droop-function, позволяет сделать механическую характеристику привода мягкой, т. е. при увеличении момента сопротивления скорость двигателя будет уменьшаться. На функциональной диаграмме регулятора скорости преобразователя TPD32EV (см. рис. 5.1) функция статизма представлена блоком “Speed droop compensation”. Сигнал выхода ПИ-регулятора с заданной функцией статизма коэффициента вычитается из сигнала задания регулятора.

На вход цепи Droop-function поступает сигнал выхода регулятора скорости; с этим сигналом суммируется величина, занесенная в параметр **P698 – Loadcomp**. Блок фильтра **P697 – Droopfilter** предназначен для сглаживания результата суммирования. Коэффициент в параметре **P596 – Droopgain** определяет крутизну получающейся механической характеристики; блок ограничения **P700 – Drooplimit** ограничивает диапазон влияния функции. Сигнал выхода этой цепи добавляется к заданию ПИ-регулятора, как показано на рисунке 5.9, а.

На рисунке 5.9, б показаны механические характеристики привода при изменении параметров Droop-function.

1 – механическая характеристика привода с ПИ-регулятором скорости при отключенной функции статизма;

2 – регулятор с функцией статизма; коэффициент Droopgain K1;

3 – регулятор с функцией статизма; коэффициент Droopgain K2 > K1;

4 – регулятор с функцией статизма; коэффициент Droopgain K3 > K2;

5 – регулятор с функцией статизма с коэффициентом K3 и при установке блока ограничения Drooplimit.

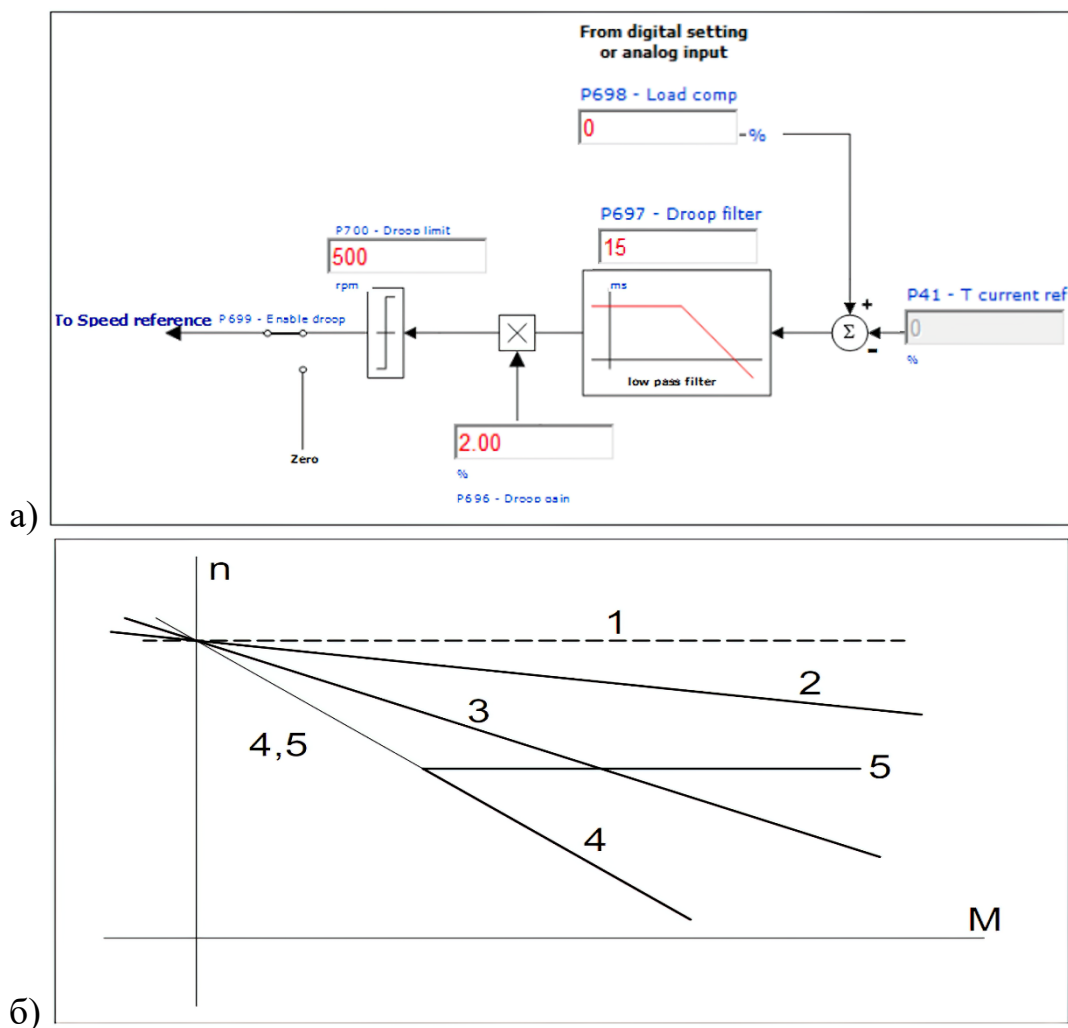


Рисунок 5.9. а) функциональная схема цепи Droop-function; б) механические характеристики

Droop-function часто используется для распределения моментов между приводами, работающими на общую нагрузку. В преобразователе TPD32EV (см. рис. 5.9, а) для этого от ведущего привода на вход “**P698 Loadcomp**” подается сигнал, пропорциональный заданию момента ведущего привода.

На рисунке 5.10 показана функциональная диаграмма Droop-function в преобразователях SinamicsS120. Сигнал на выходе мультиплексора **p1488** соответствует сигналу на входе “**P698 Loadcomp**” на рисунке 5.9, а. Мультиплексор **p1488** позволяет выбрать один из четырех источников задания момента от ведущего привода:

- интегральная составляющая выхода ПИ-регулятора скорости ведущего привода **r1482**;
- полный выход регулятора скорости ведущего привода **r1508**;
- общее задание момента ведущего привода **r0079**;
- фиксированное значение **StatikM_kompSkal**.

В параметр **p1486** подключается один из коннекторов ведомого привода **r1482**, **r1508**, **r0079**, соответствующие заданию момента этого привода.

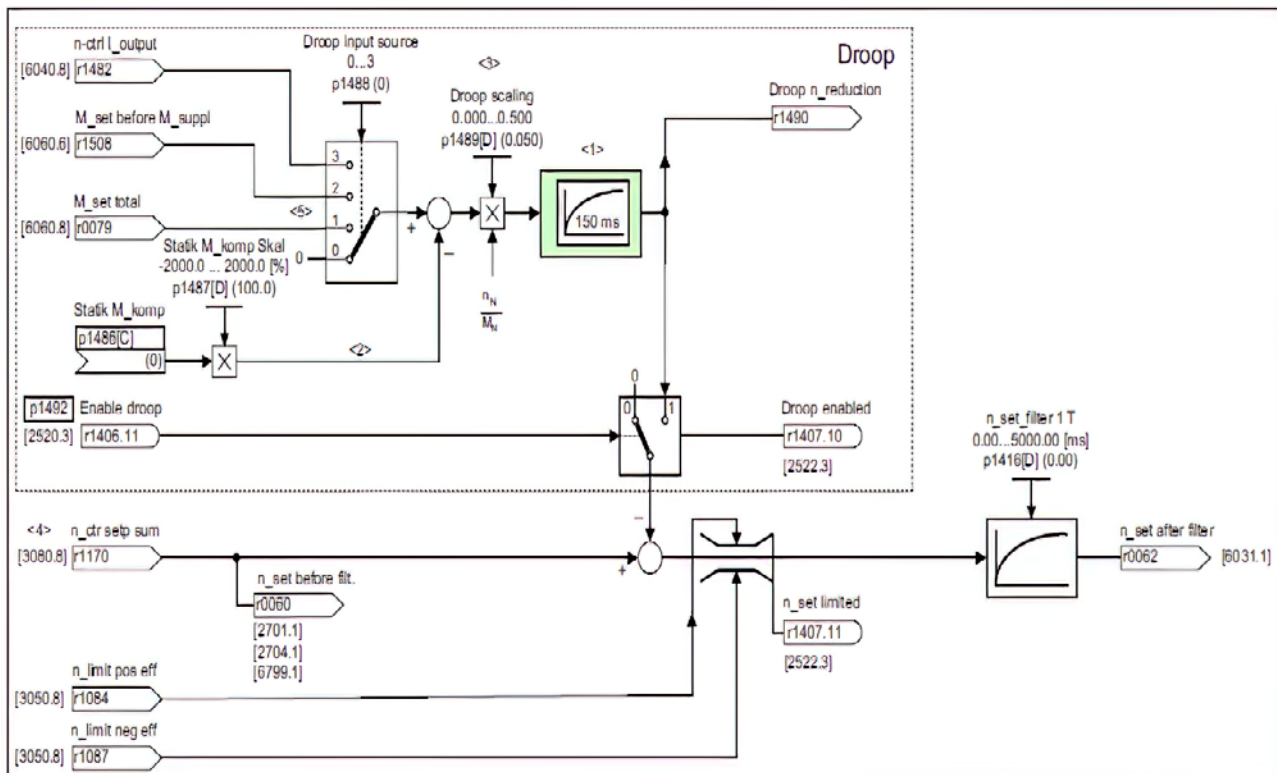


Рисунок 5.10. Функциональная диаграмма Droop-function в преобразователях SinamicsS120

Параметр **p1489** задает коэффициент статизма K ; выходной сигнал Droop-function (коннектор **r1490**) вычитается из задания ПИ-регулятора скорости **r1170**.

Как видно из рисунков 5.10 и 5.9, *a*, несмотря на отличия в некоторых структурных элементах, действие этой функции в преобразователях TPD32EV и SinamicsS120 одинаковое.

5.4. Компенсация момента сопротивления, момента инерции

Задание на формирование момента привода поступает, как правило, от регулятора скорости. Однако, при известном задании на скорость привода, можно рассчитать необходимый момент или некоторые составляющие момента и этот рассчитанную величину момента сразу задавать в контур регулирования момента. В приводах постоянного тока функции регулятора момента выполняет регулятор тока якоря; в частотно-регулируемых приводах с векторным управлением за формирование момента отвечает регулятор активной составляющей тока.

Блоки компенсации момента сопротивления задают в регулятор момента привода задание, пропорциональное величине статического момента; блоки компенсации момента инерции задают в регулятор момента привода задание, пропорциональное требуемому динамическому моменту. Как правило, блоки компенсации момента сопротивления и момента инерции являются цепями

предупреждения (pre-control), в которых расчет задания составляющих момента выполняется на основе информации, используемой регулятором скорости.

На рисунке 5.1 блок “Inertia/LossCompensation” получает информацию о заданном значении скорости; этот сигнал преобразуется в сигналы компенсации динамического момента и момента сопротивления. Такой же блок “Inertia/LossCompensation” присутствует в регуляторе скорости преобразователя PowerFlex DC drive компании RockwellAutomation. На рисунке 5.11 представлена функциональная диаграмма блока “Inertia/LossCompensation” в преобразователе PowerFlex DC drive.

При превышении заданной скорости установленного минимального значения блок “Inertia/LossCompensation” выдает в регулятор тока якоря постоянную добавку, пропорциональную моменту сопротивления. Дифференцирование заданной скорости позволяет сформировать сигнал, пропорциональный требуемому динамическому моменту.

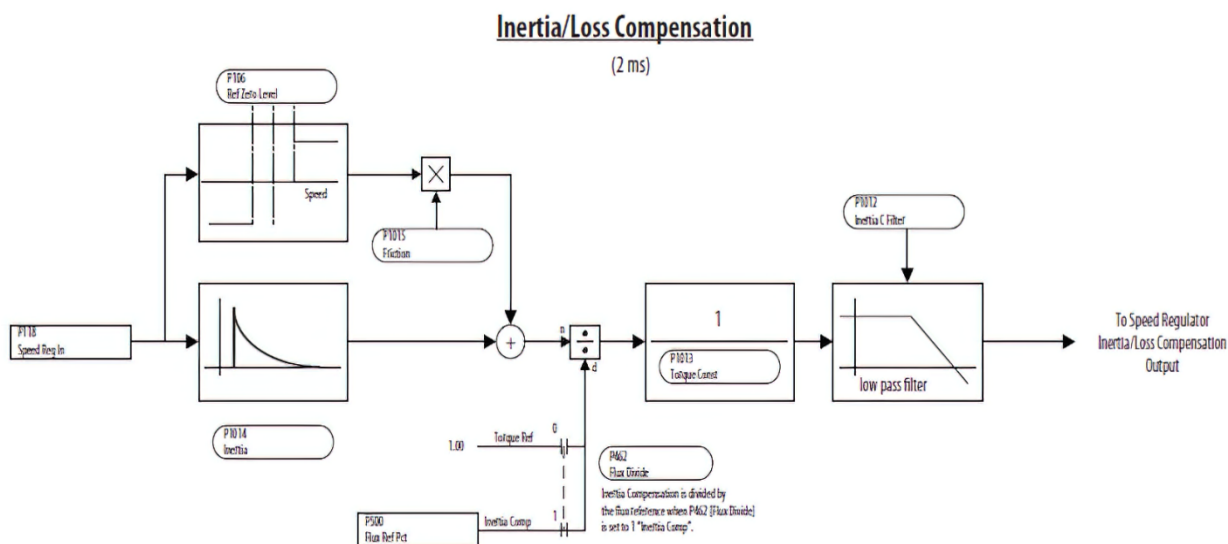


Рисунок 5.11. Функциональная диаграмма блока “Inertia/LossCompensation”

Аналогичные, но более гибкие функции компенсации момента инерции и момента сопротивления, реализованные в преобразователе SinamicsDCM, как показано на рисунке 5.12.

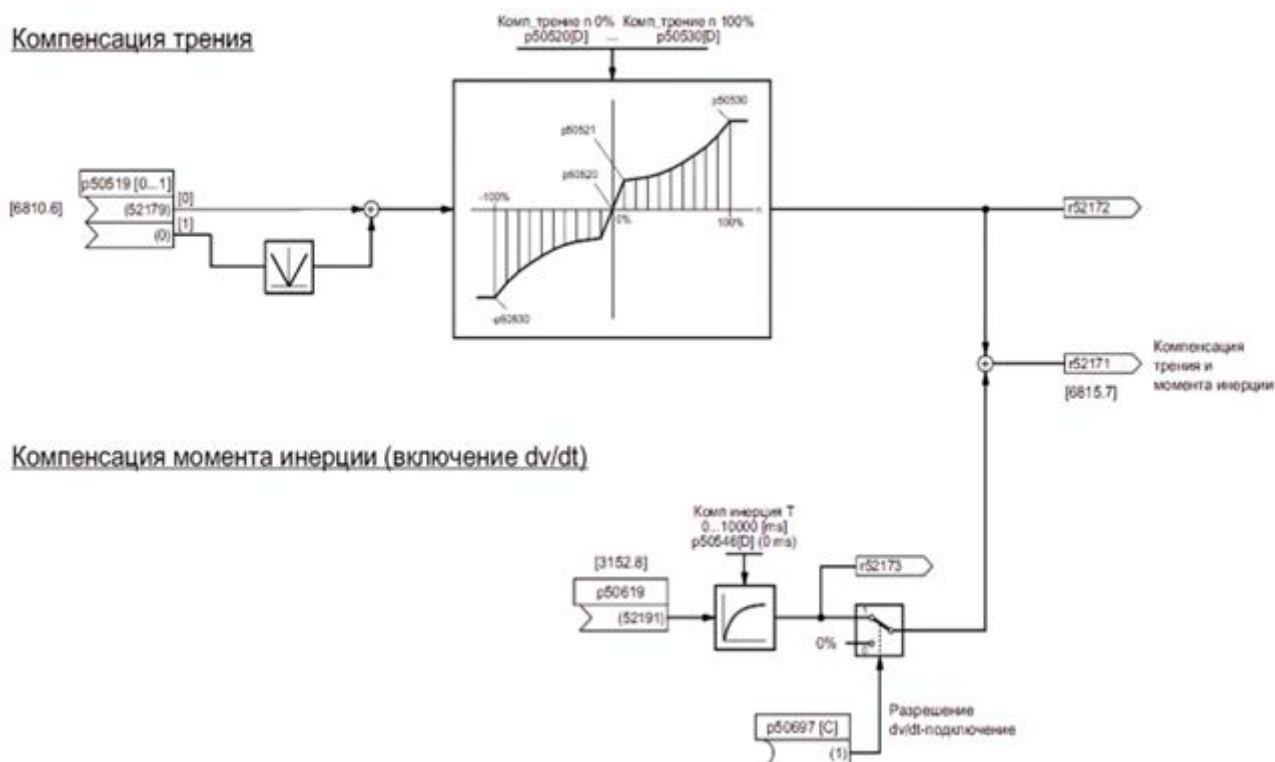


Рисунок 5.12. Компенсация момента трения и момента сопротивления в преобразователе SinamicsDCM

Момент двигателя $M_{дв}$ можно выразить через статическую $M_{ст}$ и динамическую $M_{дин}$, составляющие:

$$M_{дв} = M_{ст} + J \cdot d\omega/dt, \quad M_{дин} = J \cdot d\omega/dt, \quad (5.4)$$

где J – момент инерции механизма и двигателя, приведенный к валу двигателя; ω – скорость вращения ротора двигателя.

Момент двигателя определяется конструктивной постоянной C_m , потоком возбуждения Φ_v и током якоря I_a :

$$M_{дв} = C_m \cdot \Phi_v \cdot I_a. \quad (5.5)$$

В соответствии с (5.4) и (5.5) полное задание на регулятор тока можно представить:

$$I_{зад} = I_{ст} + I_{дин} \quad (5.6)$$

В преобразователе SinamicsDCM предусмотрена возможность как ручного, так и автоматического определения момента сопротивления $M_{ст}$ от фактической скорости двигателя; для этого выделен ряд параметров p50520,.. p50530.

Сигнал производной от заданной скорости для расчета динамического момента $M_{дин}$ может быть взят от специального выхода датчика интенсивности, как показано на рисунке 5.13, или от отдельного звена дифференцирования.

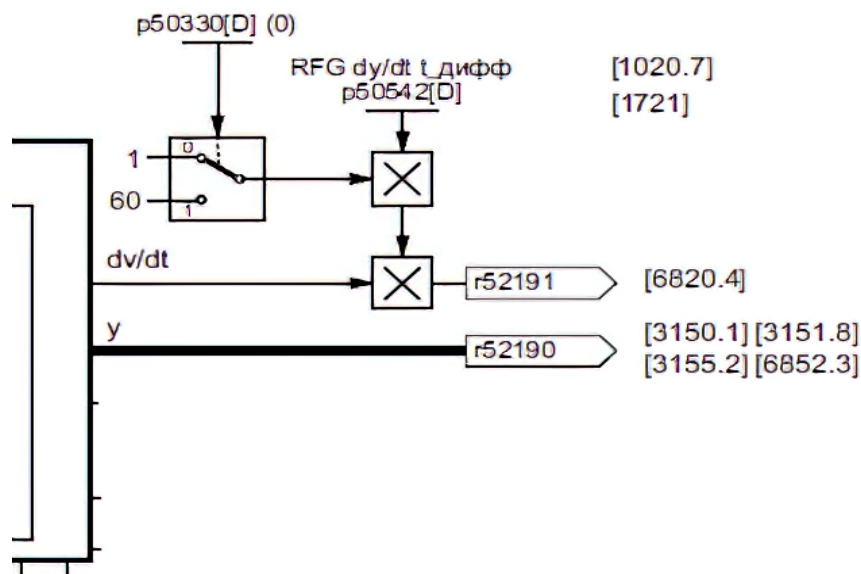


Рисунок 5.13. Функциональная диаграмма выхода датчика интенсивности преобразователя SinamicsDCM

Сигнал производной от задания скорости **r52191**, формируемый датчиком интенсивности, используется для формирования дополнительного задания на ток якоря. Параметры **p50330** и **p50542** определяют амплитуду сигнала компенсации момента инерции привода.

При полной компенсации момента сопротивления **Мст** и динамического момента **Мдин** составляющие задания тока **Iст** и **Iдин** поступают в регулятор тока не от регулятора скорости, а по цепи предупреждения.

При выполненной полной компенсации момента инерции и компенсации момента трения сигнал на выходе регулятора скорости будет близок к нулю как при постоянной скорости вращения, так и во время изменения скорости.

На рисунке 5.14 показаны полученные на приводе графики, соответствующие следующим коннекторам преобразователя SinamicsDCM:

r52167 – скорость привода;

r52160 – выход регулятора скорости;

r52171 – суммарный сигнал компенсации момента трения и момента сопротивления $I_{ст} + I_{дин}$;

r52148 – задание на момент $I_{зад}$.

Выход регулятора скорости (коннектор r52160) меняется в пределах $\pm 2,5\%$.

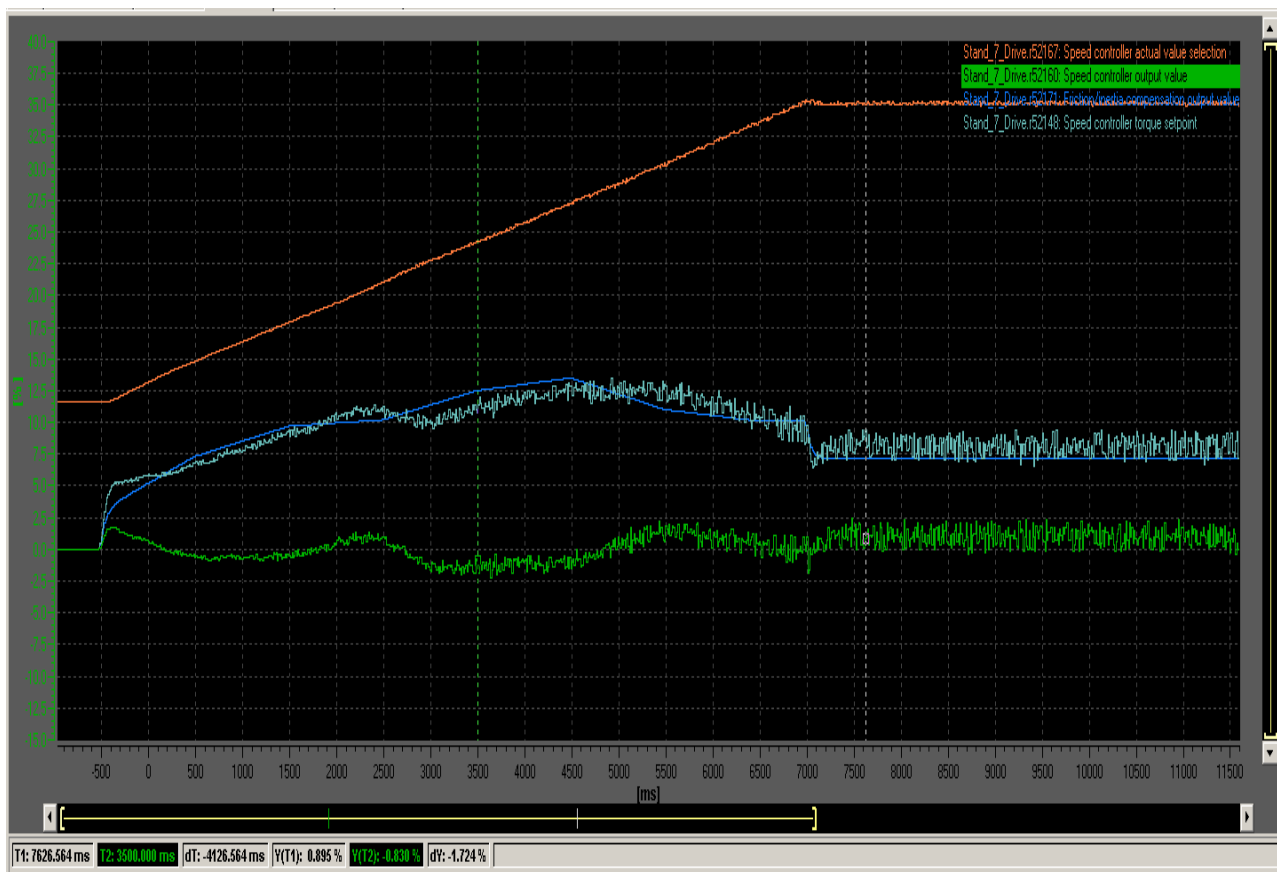


Рисунок 5.14. Пуск механизма без нагрузки. Включены компенсация момента трения и компенсация момента инерции

5.5. Форсировка сигнала обратной связи (SpeedUp функция)

Форсировка сигнала обратной связи по скорости предполагает подачу сигнала производной по фактической скорости в дополнение к самому сигналу фактической скорости привода. Такую форсировку называют также SpeedUp функцией.

Рассмотрим на простом примере влияние такого дополнения. Как известно, поведение привода с обратной связью по скорости можно достаточно достоверно описать динамическим звеном второго порядка с передаточной функцией $W_1(s)$:

$$W_1(s) = \frac{N_{\text{факт}}(s)}{N_{\text{задания}}(s)} = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (5.7)$$

где $N_{\text{факт}}$ – фактическая скорость привода; $N_{\text{задания}}$ – заданная скорость привода; T – постоянная времени; ξ – коэффициент затухания.

Добавим отрицательную обратную связь по производной от скорости:

$$W_{\text{oc}}(s) = \tau s. \quad (5.8)$$

Получим:

$$W_2(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_{\text{oc}}(s)} = \frac{1}{T^2 s^2 + (2\xi T + \tau)s + 1}. \quad (5.9)$$

Из последнего выражения (5.9) следует, что коэффициент при первой степени оператора s полинома знаменателя увеличился. Следовательно, увеличилось затухание колебательного звена, которым описывается поведение привода.

На рисунке 5.15 показана обобщенная блок-схема регулятора скорости преобразователя частоты Unidrive SP. Регулятор содержит пропорциональное (K_p) и интегральное (K_i) звенья прямой подачи, а также звено дифференциальной (K_d) обратной связи. Дифференциальное звено в цепи обратной связи регулятора скорости обеспечивает дополнительное демпфирование (затухание).

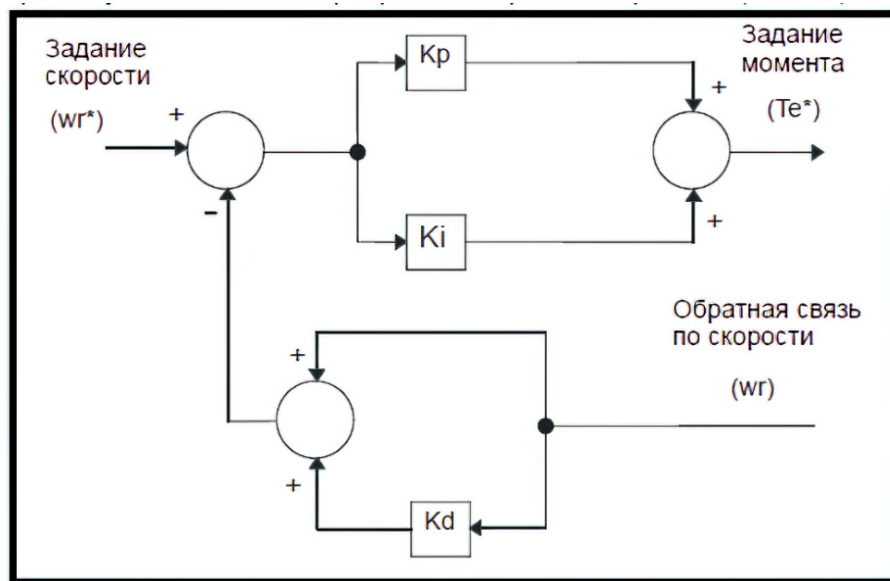


Рисунок 5.15. Блок-схема регулятора скорости

Чистое дифференцирование сигнала обратной связи, а также других сигналов не используется, поскольку приводит к увеличению уровня шума от сопутствующих высокочастотных помех. Обычно совместно со звеном дифференцирования применяется фильтр первого порядка. Для настройки цепи SpeedUp функции предусматриваются параметры настройки усиления звена дифференцирования и постоянной времени фильтра, например, как показано на рисунке 5.1.

С нагрузками, имеющими высокий момент инерции, можно контролировать скачки при изменении скорости. Их можно уменьшить с помощью функции SpeedUp. На рисунке 5.16 показано влияние этой функции.

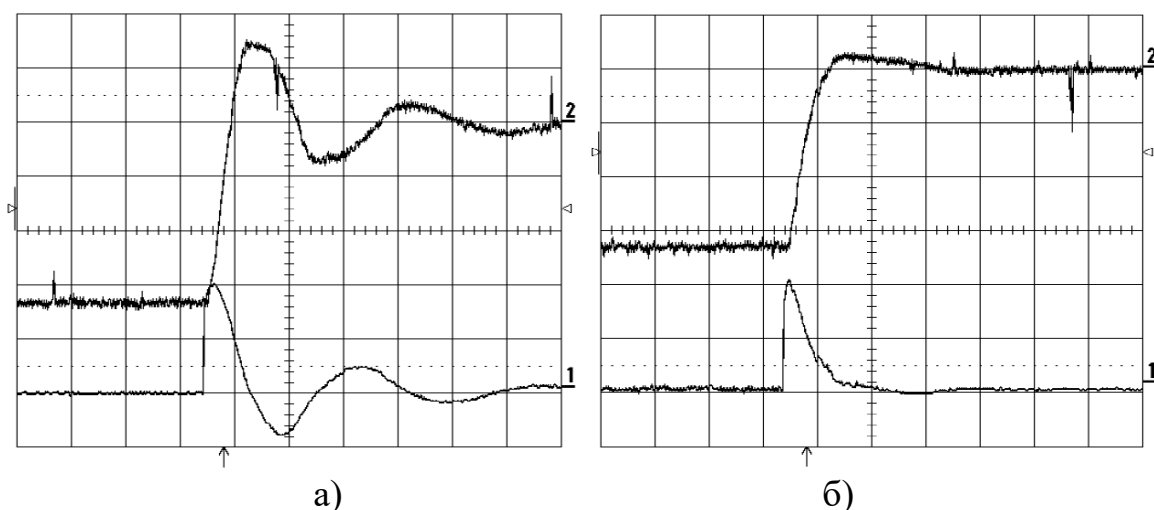


Рисунок 5.16. Влияние функции SpeedUp на колебания тока и скорости:
 а) сверху: фактическая скорость; внизу: скачки тока двигателя при изменении скорости из-за высокого момента инерции. Функция SpeedUp не активна;
 б) тот же привод с активной функцией SpeedUp; сверху: фактическая скорость; внизу: ток двигателя

6. РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА

Регулятор тока якоря в преобразователях постоянного тока является подчиненным по отношению к регулятору скорости; задание на момент, выдаваемое регулятором скорости, определяет задание на ток якоря. Фактически регулятор тока якоря выполняет функцию регулятора момента привода. Регулятор тока возбуждения в приводе постоянного тока может быть ведущим и стабилизировать заданный ток возбуждения или быть ведомым в подчинении регулятора ЭДС и обеспечивать работу привода при двухзонном регулировании скорости. На функциональной схеме представлены регуляторы тока якоря и тока возбуждения в структуре программного обеспечения преобразователя Sinamics DCM.

В частотно-регулируемых преобразователях в режимах векторного управления устанавливаются регуляторы активной и реактивной составляющих выходного тока преобразователя. Регулятор активной составляющей тока выполняет функцию регулятора момента; регулятор реактивной составляющей тока обеспечивает необходимое магнитное поле.

6.1. Регуляторы тока как регуляторы момента

Обычно в преобразователе задание на момент формирует регулятор скорости, однако в ряде приложений задание на момент привода может подаваться в обход регулятора скорости.

Выходной сигнал регулятора скорости, определяющий задание момента, может подвергаться дополнительной подготовке. К функциям такой подготовки выходного сигнала регулятора скорости относятся следующие:

- цепи ограничения момента;
- каналы дополнительного задания момента;
- цепи динамической коррекции;
- ограничение темпа задания момента.

Подготовленный сигнал задания подается в пропорционально-интегральный регулятор тока.

6.1.1. Цепи ограничения заданного момента

В преобразователях частоты Sinamics ограничение заданного момента предусматривает допустимые значения момента в генераторном и двигательном режимах, допустимые значения мощности в генераторном и двигательном режимах, допустимую величину тока. Эти величины определяют границы ограничения момента, как показано на рисунке 6.1.

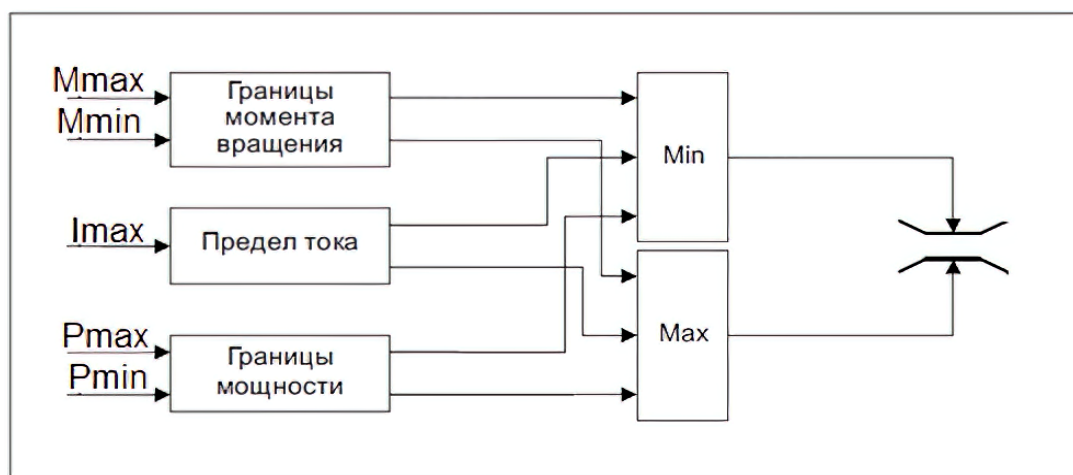


Рисунок 6.1. Ограничение момента вращения

На функциональной схеме (рис. 6.2) показан регулятор тока якоря преобразователя TPD32EV; задание, приходящее на регулятор тока от регулятора скорости, обрабатывается блоком ограничения тока якоря. Выходной сигнал регулятора тока подается в систему импульсно-фазового управления (СИФУ) для управления открытием тиристорного выпрямителя. Регулятор тока работает по пропорционально-интегральному закону. Заметим, что изменение режима функционирования СИФУ пользователем в этом преобразователе не предусмотрено.

Функциональная схема формирования ограничений выходного сигнала регулятора скорости **M_setfromspeedcontroller** в преобразователях частоты Sinamics представлена на рисунке 6.3. Ограничение задания момента может выполняться как в статически заданных границах, так и меняющимися сигналами, подключенными к соответствующим параметрам **BICO** системы. Также в общем сигнале задания момента **M_settotal** предусмотрены дополнительные составляющие **M_accelsmooth** и **M_suppltotal**, поступающие по цепи предупредования, минуя регулятор скорости.

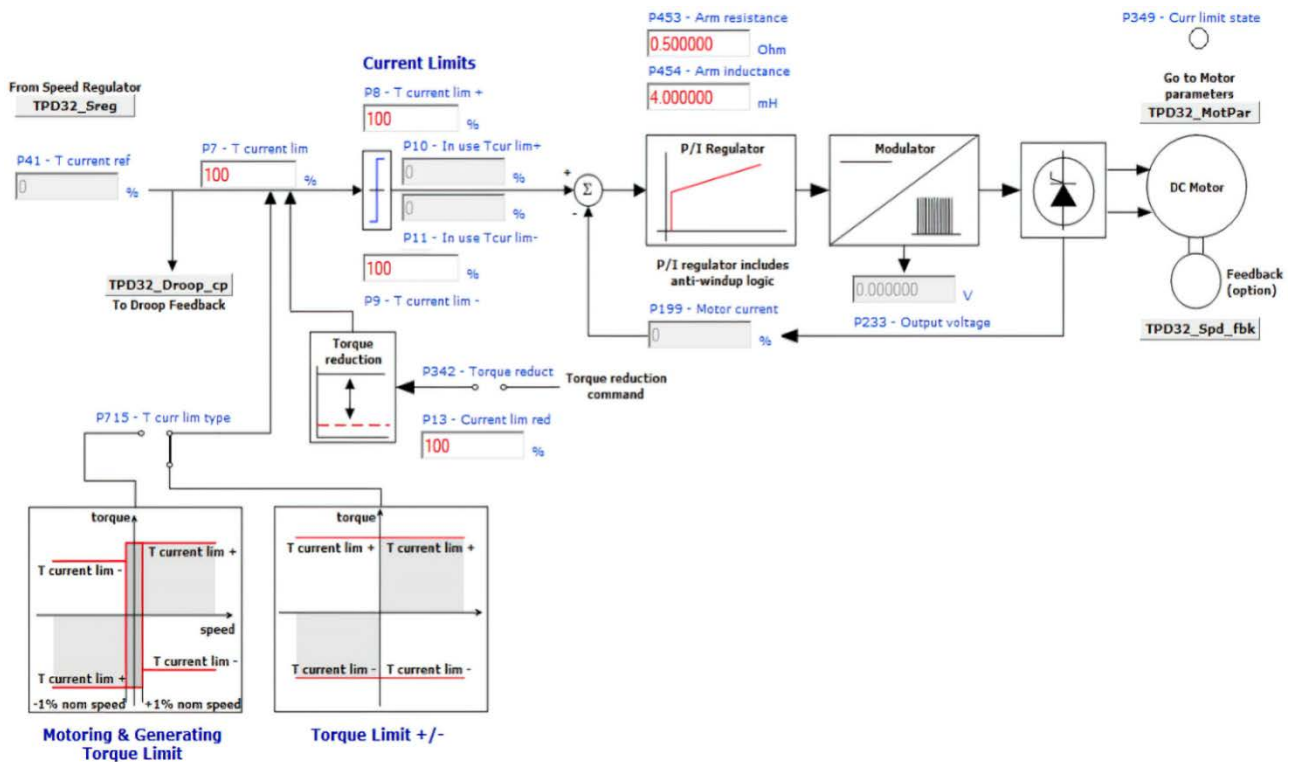


Рисунок 6.2. Регулятор тока якоря преобразователя TPD32EV

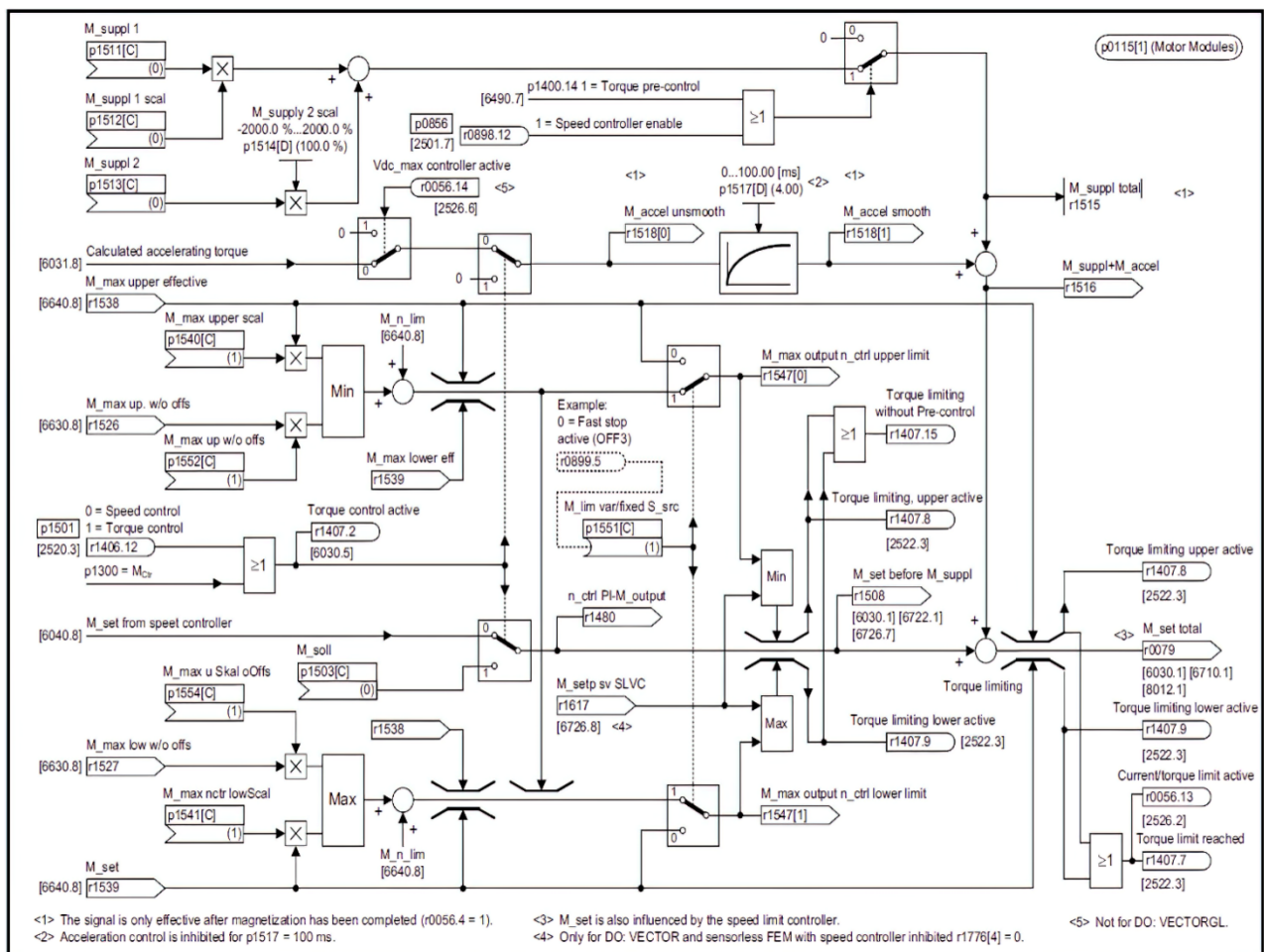


Рисунок 6.3. Функциональная схема подготовки сигнала задания момента

6.1.2. Настройка ограничений тока в зависимости от частоты вращения

В приводах постоянного тока приходится уменьшать допустимую величину тока якоря при работе на высоких скоростях; это связано с ухудшением условий коммутации для щеточно-коллекторного узла двигателя постоянного тока.

В преобразователях PowerFlexDigital DCDrive (Allen Braddly), TPD32 (Gefran) предусмотрена функция, позволяющая изменять пределы тока в зависимости от частоты вращения двигателя с помощью кривой, состоящей из шести заданных точек, как показано на рисунке 6.4. “I/nspeed” и “I/nlim 0,1,2,3,4” – это параметры, которые позволяют определить кривую. Параметр “I/nspeed” определяет диапазон скоростей, в котором текущие ограничения сохраняются на уровне “I/n lim 0”. Диапазон скоростей, включенный между “I/n speed” и 100 % от максимальной скорости, будет внутренне разделен на четыре равных сегмента, на концах которых связаны текущие ограничения “I/n lim 0,1,2,3,4”. Установленные значения должны уменьшаться, начиная с “I/n lim 0” до “I/n lim 4”.

В программном обеспечении преобразователя постоянного тока SinamicsDCM также предусмотрена подобная функция ограничения тока в зависимости от частоты вращения, защищающая коллектор и щетки двигателя постоянного тока при высокой частоте вращения. На рисунках 6.5 и 6.7 приведены варианты настройки ограничений тока в зависимости от частоты вращения на двигателях с коммутирующим изломом и без коммутирующего излома.

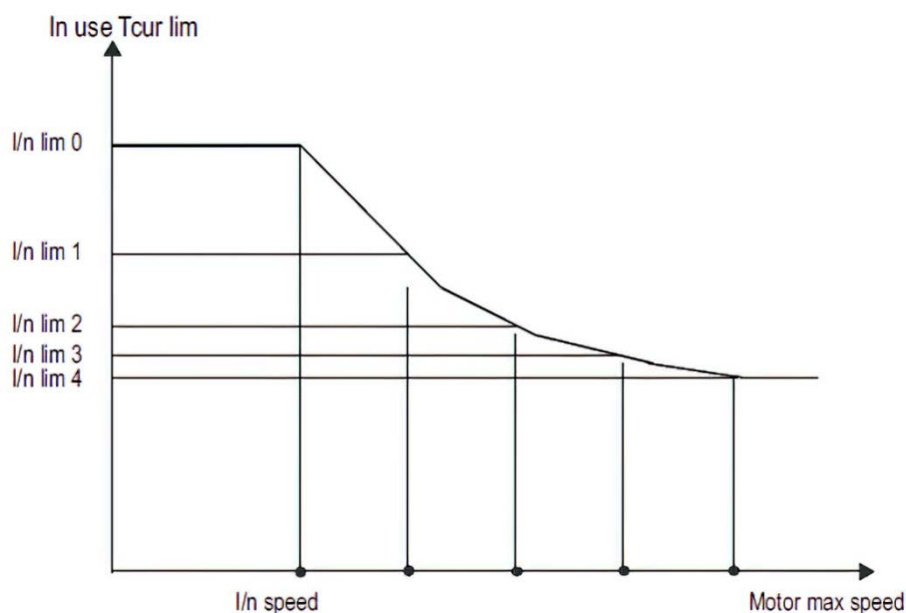


Рисунок 6.4. Ограничение тока в зависимости от скорости

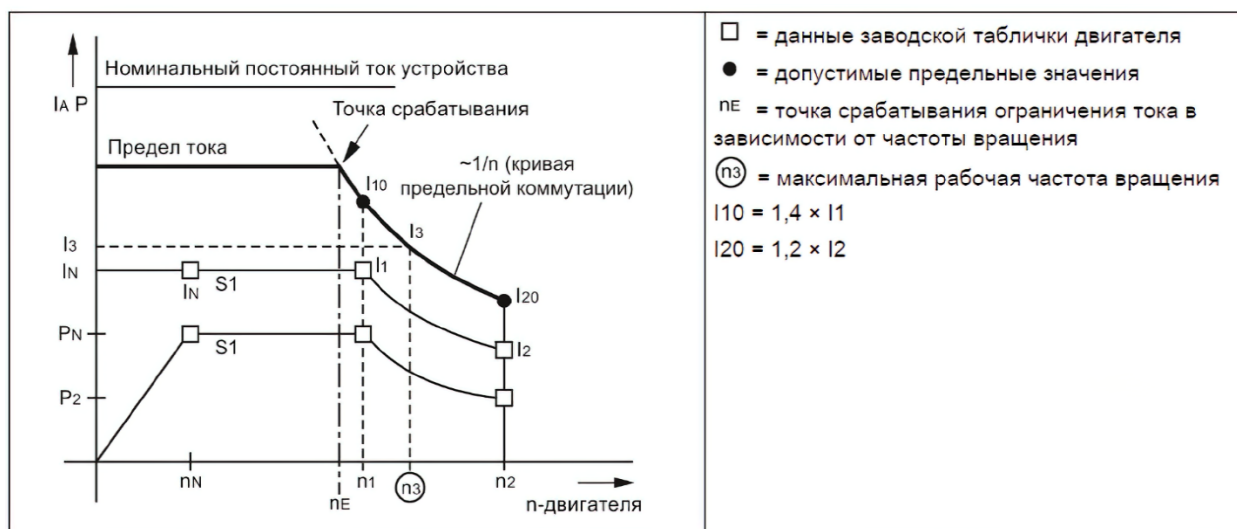


Рисунок 6.5. Настройка ограничений тока в зависимости от частоты вращения на двигателях с коммутирующим изломом в преобразователе SinamicsDCM

Кривая ограничения тока определяется значениями n_1 , I_{10} , n_2 и I_{20} . В преобразователе SinamicsDCM за эти значения отвечают следующие параметры: p50104 задает n_1 , p50105 – I_1 (на основании которого устройство рассчитывает I_{10}), p50106 – n_2 , p50107 – I_2 (на основании которого рассчитывается I_{20}), p50108 устанавливает n_3 для нормирования частоты вращения, а p50109 управляет самой функцией: при значении 0 ограничение тока в зависимости от частоты вращения выключено, при значении 1 – включено.

На рисунке 6.6 приведен пример заводской таблички двигателя, по которой определяются параметры функции ограничения тока якоря по варианту рисунка 6.5.

* S H U N T -MOT.		1GG5162-0GG4 . -6HU7-Z		EN 60034	
V		NRE		KW	
46-380	n1	1/MIN	n2	0.880-26.0	
380	3400	50-1490	4500	26.0 / 19.0	
ERR.	V		REG.	80.0/58.0	0MH 380V/ 50HZ
SEP.	310	2.85	THYR.: B6C LV=	IM B3	
	77/51	0.87/0.60	IP 23	I.C.L.F	
Z: A11 G18 K01 K20					
SEP. VENTIL.					

Рисунок 6.6. Пример заводской таблички

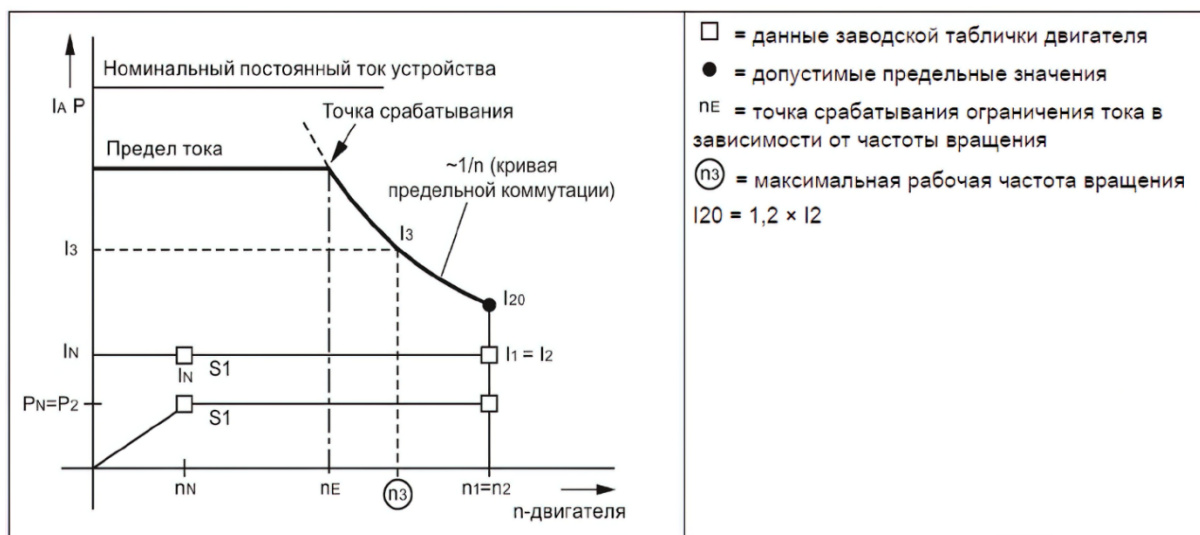


Рисунок 6.7. Настройка ограничений тока в зависимости от частоты вращения на двигателях без коммутирующего излома в преобразователе SinamicsDCM

На рисунке 6.8 приведен пример заводской таблички двигателя, по которой определяются параметры функции ограничения тока якоря по варианту рисунка 6.7.

* S H U N T -MOT. 1GG5116-0FH40-6HU7-Z			
NRE		EN 60034	
V	n ₂ = n ₁ 1/MIN	A	KW
46-380	50-2300	36,0-37,5	0.265-12.0
380	6000 REG.	38,5 I ₂ = I ₁	12.0
ERR.	V A	THYR.: B6C LV=	0MH 380V/ 50HZ
SEP.	310 1.45	IP 23	IM B3
	54 0.32		I.CL.F
Z: A11 G18 K01 K20			
SEP. VENTIL.			

Рисунок 6.8. Пример заводской таблички

6.1.3. Динамическая коррекция в цепи заданного момента

В обвязке регулятора скорости и в цепи задания момента могут быть включены звенья динамической коррекции для обеспечения требуемого качества переходных процессов. Цепи динамической коррекции, представляющие собой фильтры первого и второго порядков, позволяют оптимизировать амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики системы управления приводом. На рисунке 6.9 представлены звенья динамической коррекции, предусмотренные в базовом программном обеспечении преобразователя SinamicsDCM. Включение звеньев в структуру системы управления выполняется с помощью параметров BICO системы.

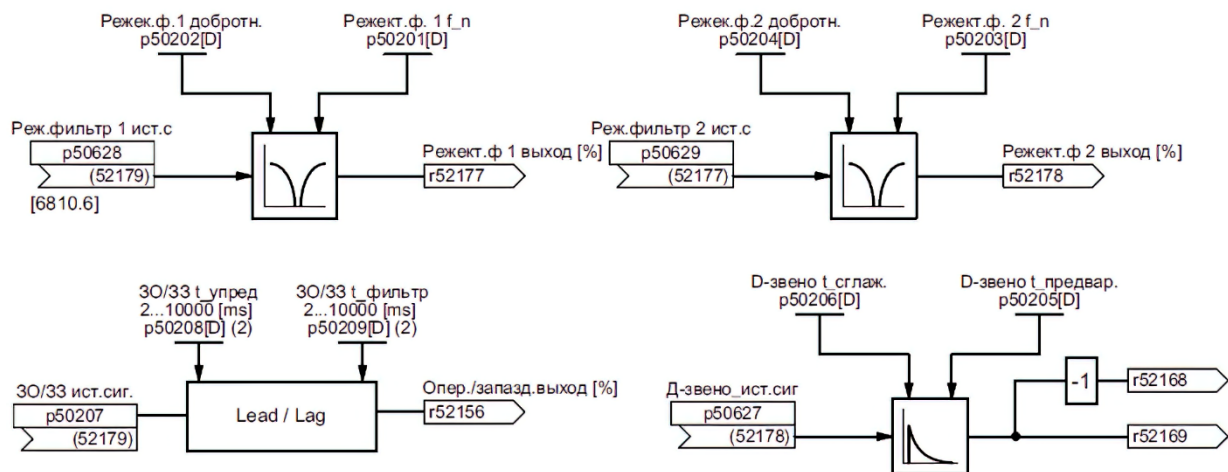


Рисунок 6.9. Звенья динамической коррекции в преобразователе SinamicsDCM

В преобразователях частоты с сервоуправлением и с векторным управлением сигнал задания момента **M_settotal** используется как сигнал задания активной составляющей тока. На рисунке 6.10 приведена функциональная схема динамической коррекции с фильтрами заданного значения активной составляющей тока **Iq_set** в преобразователях частоты Sinamics S120/S150/G130/G150.

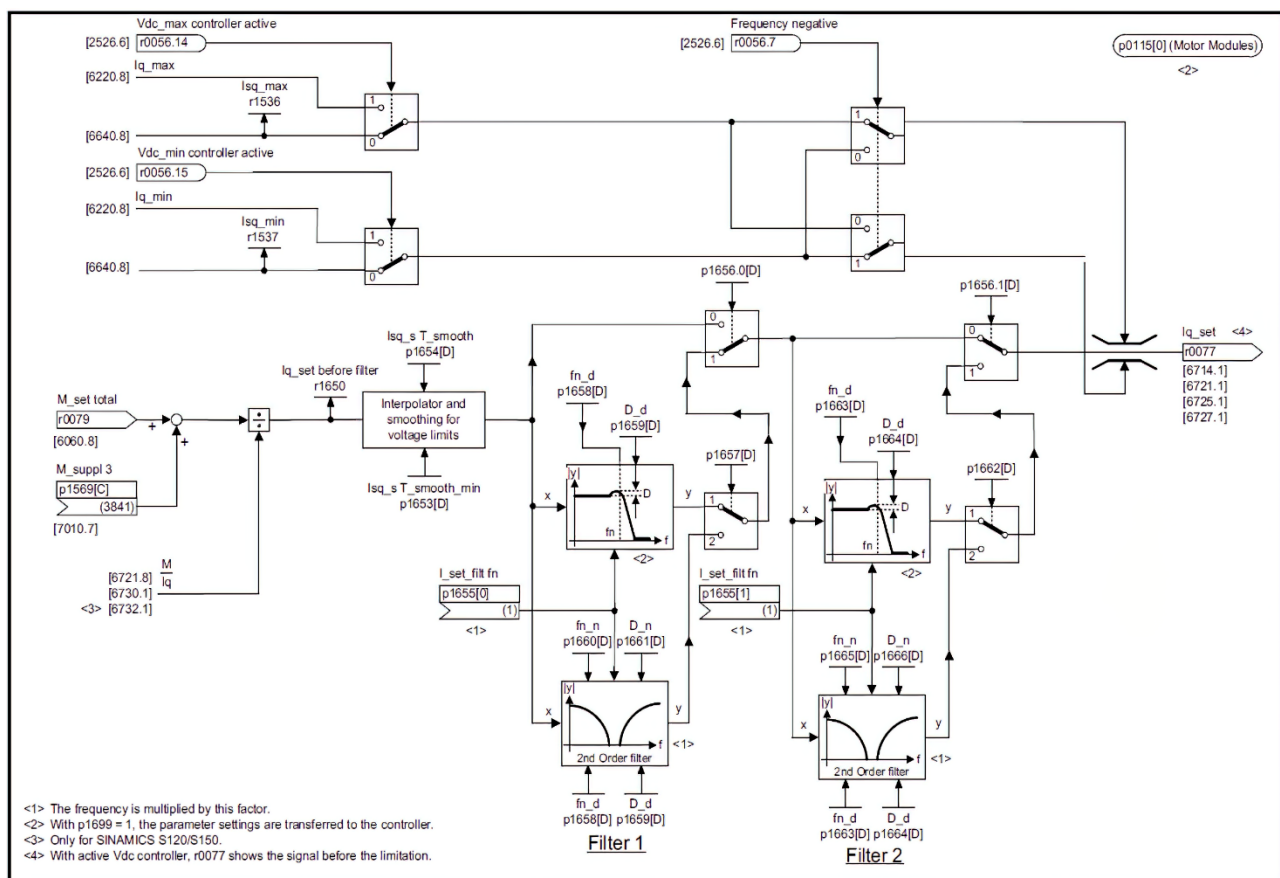


Рисунок 6.10. Фильтры и ограничение заданного тока **Iq_set**

Подготовленный сигнал задания момента **M_settotal** (формирование этого сигнала показано на функциональной схеме, см. рис. 6.3) пересчитывается в сигнал задания активного тока **Iq_setbeforefilter** и далее пропускается через цепи фильтров **Filter 1** и **Filter 2**. После прохождения фильтров предусмотрен также блок ограничения активной составляющей тока.

Для определения параметров цепей динамической коррекции применяются методы частотного анализа системы управления приводом; например, в приложении Starter для преобразователей Sinamics доступны такие методы, как быстрое преобразование Фурье, получение логарифмических амплитудно-частотных характеристик (диаграмма Боде).

6.1.4. Ограничение темпа нарастания тока

В преобразователях также часто применяется блок ограничения нарастания заданного тока, создающего момент привода. Например, в преобразователе TPD32EV, как показано на рисунке 5.1, в цепи сигнала задания момента установлен задатчик интенсивности; установка величины параметра **P1520 – di/dtdeltatime** определяет темп нарастания задания в регулятор тока якоря.

На рисунке 6.11 показана цепь выбора и изменения уставки крутящего момента в преобразователе частоты ACS880.

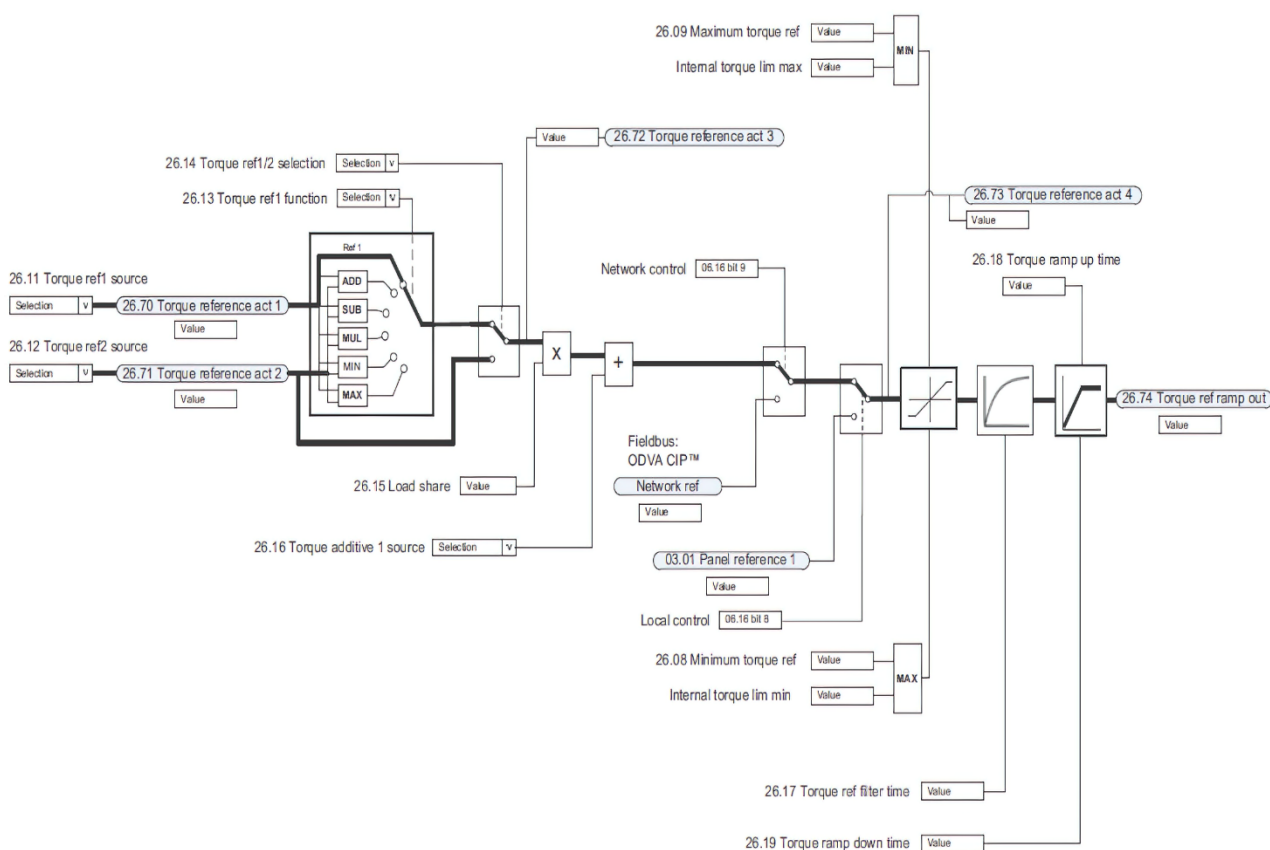


Рисунок 6.11. Выбор и изменение источника уставки крутящего момента

Сигнал заданного момента **26.73 Torquereferenceact 4** пропускается через блок ограничения, через фильтр; после фильтра темп изменения задания момента ограничивается задатчиком интенсивности, который настраивается с помощью параметров **26.18 Torquerampuptime** и **26.19 Torquerampdowntime**.

Аналогичную структуру с ограничением темпа нарастания сигнала задания тока якоря видим в преобразователе постоянного тока SinamicsDCM, как показано на рисунке 6.12.

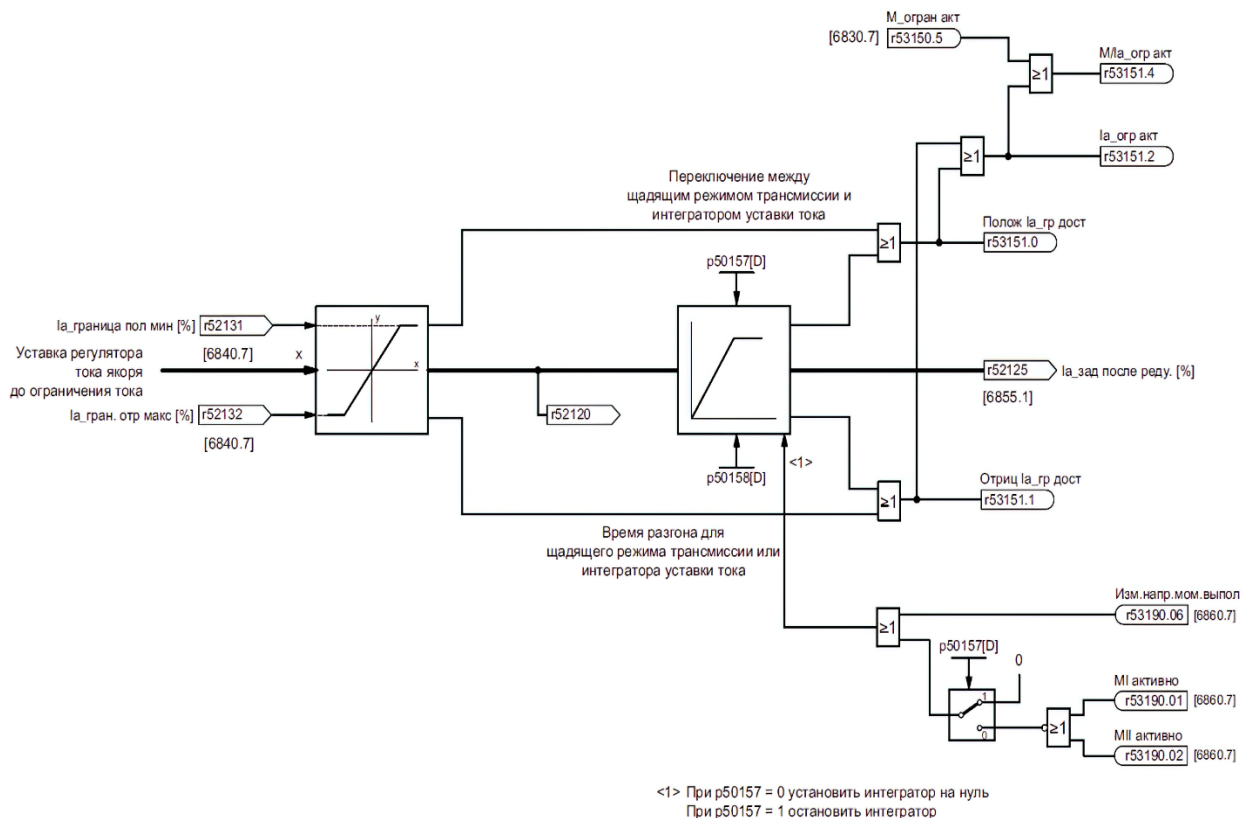


Рисунок 6.12. Ограничения тока якоря и темпа нарастания тока якоря

В приведенной функциональной схеме после блока ограничения задания тока установлен блок задатчика интенсивности.

Параметр **p50157** определяет выбор режима этого блока.

По значению = 0: Задатчик интенсивности действует только после смены направления моментов (действует как задатчик интенсивности для заданного значения тока, до достижения выходом в первый раз после смены направления моментов заданного значения на входе блока).

По значению = 1: Задатчик интенсивности действует всегда.

Параметр **p50158** определяет темп нарастания задания тока якоря.

6.1.5. Предупреждение в контуре регулирования якорного тока

При реализации контура регулирования якорного тока в преобразователях фирмы Siemens применяется техническое решение, в котором параллельно

регулятору тока включен блок предупредования (см. функциональную схему на рис. 6.13). В зависимости от величины заданного якорного тока (сигнал, приходящий в параметр BICO **p50601**) на основании известных параметров привода: сопротивления якоря двигателя (R_a), индуктивности якорной цепи (L_a), информации о напряжении на якоре и ЭДС двигателя вычисляется управляющее задание для достижения требуемого тока (коннектор **r52121**), поступающее на сумматор. На второй вход сумматора подается выходной сигнал ПИ-регулятора тока (коннектор **r52110**), входным сигналом для которого является ошибка регулирования якорного тока (коннектор **r52113**), которую регулятор тока сводит к нулю.

На выходе сумматора формируется результирующий сигнал задания угла управления тиристоров (коннектор **r52102**), поступающий в систему импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорным мостом.

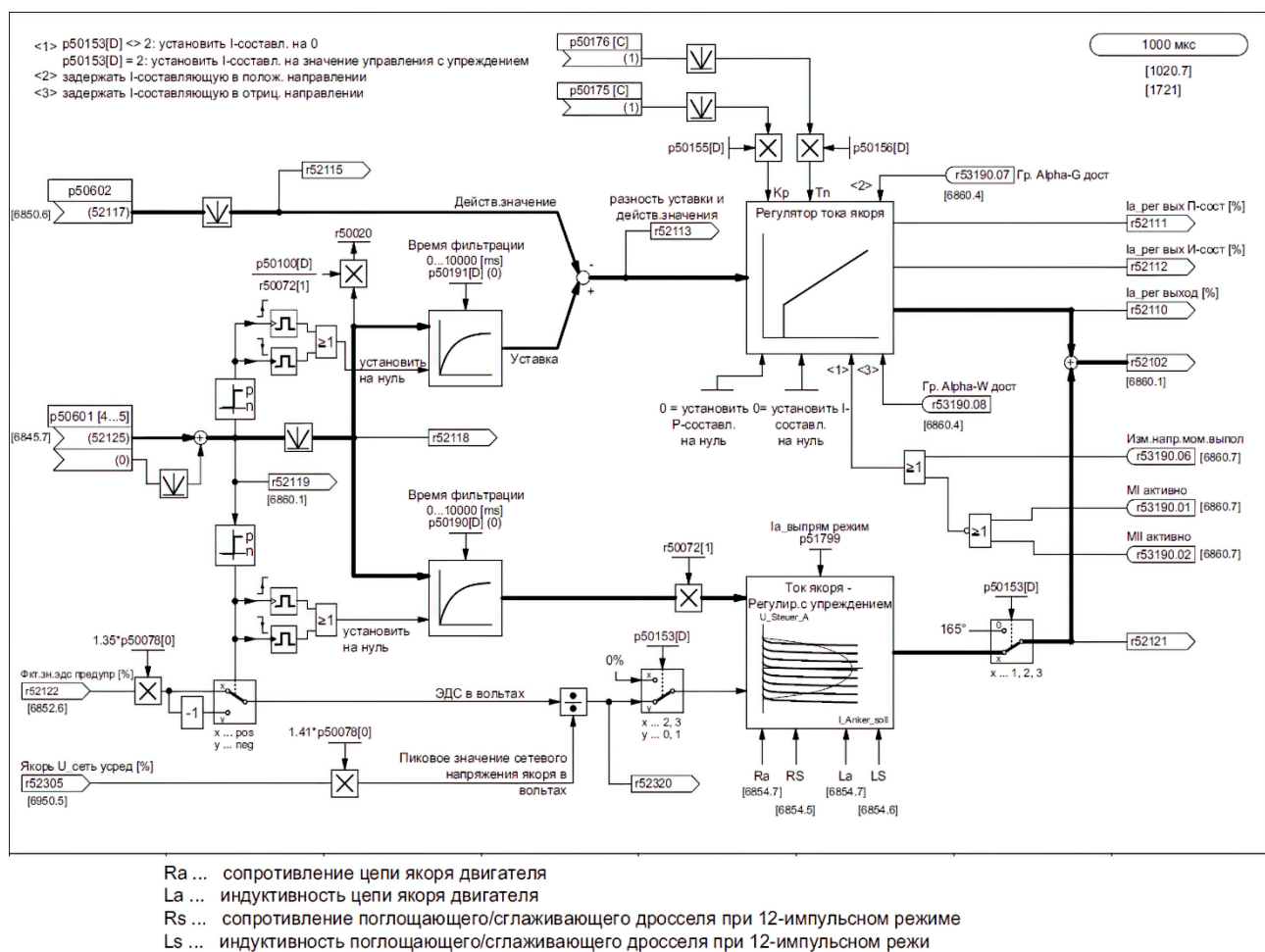


Рисунок 6.13. Регулятор тока якоря в преобразователе SinamicsDCM

На блок предупредования возложена функция формирования необходимой величины якорного тока во всех режимах работы электропривода, а на регулятор тока возложена функция обеспечения динамических свойств токового контура и обеспечение нулевой ошибки регулирования тока. Заметим, что такой же принцип предупредования реализуется в регуляторах скорости при компенсации

момента сопротивления и момента инерции (см. п. 5.4. Компенсация момента сопротивления, момента инерции).

Блок предупредования устраняет влияние ЭДС двигателя на работу токового контура и обеспечивает оптимальную настройку контура тока во всех режимах работы электропривода, сохраняя одинаковое быстродействие как в режиме непрерывного тока, так и в режиме прерывистых токов.

6.1.6. Адаптация регулятора тока

В преобразователях частоты Sinamics с помощью адаптации регулятора тока возможна адаптация П-усиления регулятора $K_p I$ в зависимости от заданной величины $I_q \text{ set}$. Функциональная схема модуля адаптации подобна схемам модулей адаптации коэффициентов регулятора скорости SinamicsDCM, показанным на рисунке 5.3. Модуль адаптации П-усиления выделен на функциональной схеме регуляторов тока I_q и I_d преобразователя SinamicsS120, приведенной на рисунке 6.14.

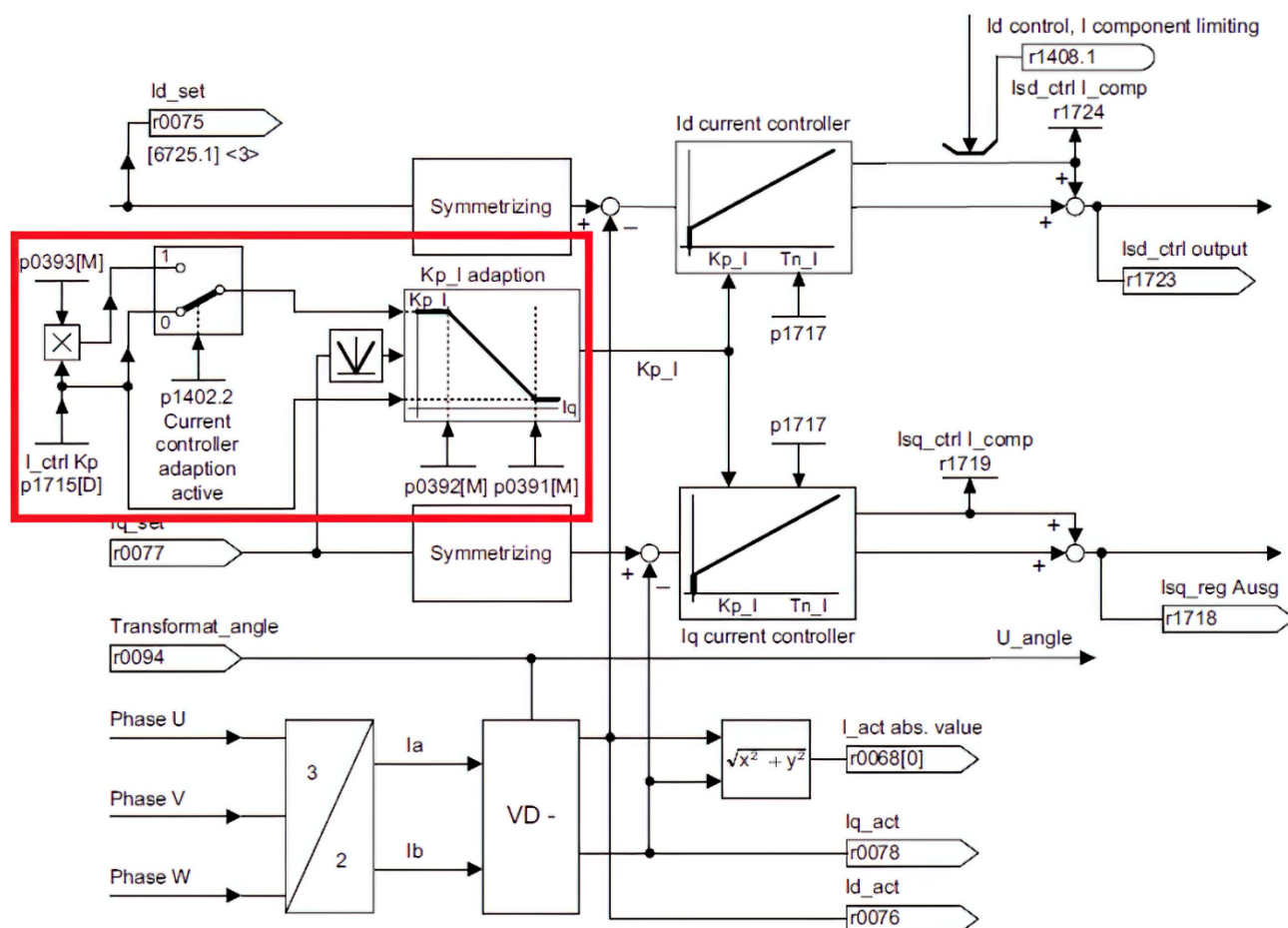


Рисунок 6.14. Регуляторы тока I_q и I_d преобразователей SinamicsS120/S150/G130/G150

В преобразователях постоянного тока SinamicsDCM предусмотрена возможность адаптации регуляторов тока якоря и тока возбуждения, поскольку эти регуляторы работают на сильно нелинейный объект управления.

Существуют два типа нелинейности в контурах регулирования тока якоря и тока возбуждения.

1. Нелинейность системы управления

В цепи якоря существует значительная разница в усилении объекта регулирования между прерывистым и не прерывистым током, как показано на рисунке 6.15.

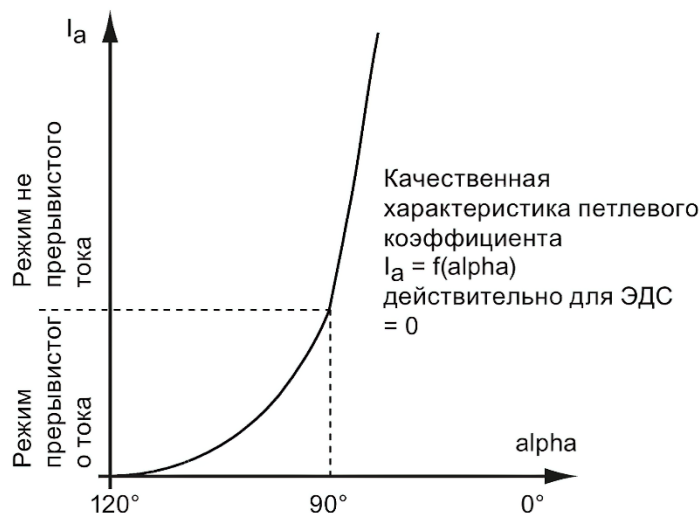


Рисунок 6.15. Зависимость тока I_a от угла управления α в трехфазном мостовом тиристорном выпрямителе якорной цепи

В цепи возбуждения характеристика управления однофазного моста демонстрирует ясную нелинейность, как показано на рисунке 6.16.

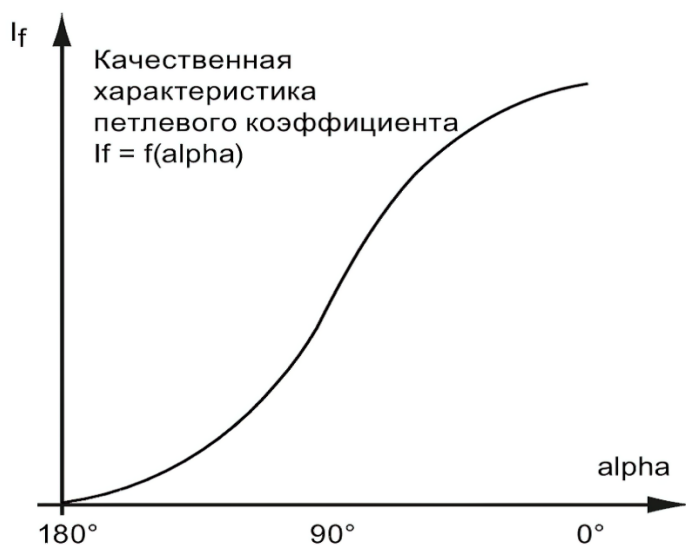


Рисунок 6.16. Зависимость тока I_f от угла управления α в однофазном мостовом тиристорном выпрямителе цепи возбуждения

2. Нелинейность индуктивности цепи якоря и цепи возбуждения двигателя

Как обмотка якоря, так и обмотка возбуждения или в любом случае имеющийся в цепи якоря сглаживающий дроссель при высоких токах могут попасть в область магнитного насыщения и поэтому иметь значительно меньшую индуктивность, чем при малых токах. На рисунке 6.17 показана зависимость индуктивности от тока, на основании которой настраиваются модули адаптации регуляторов тока якоря и тока возбуждения.

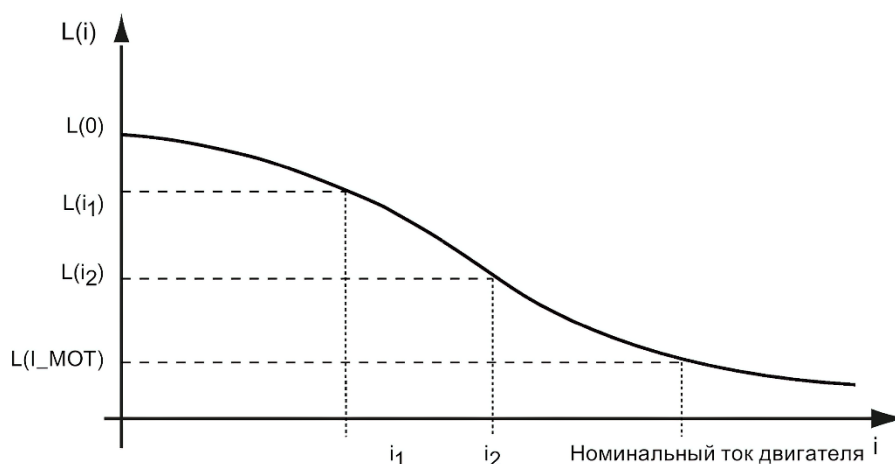


Рисунок 6.17. Зависимость индуктивности от тока для определения параметров адаптации регуляторов тока якоря и возбуждения

Для настройки адаптации используются следующие параметры:

Индуктивность при очень низком токе: $L(0) = p50111 (L_a)$ или $p50116 (L_f)$

Индуктивность при ном. токе двигателя: $L(I_{Mot}) = p50111 \times p51591 (L_a \times \lambda_a)$ или $p50116 \times p51597 (L_f \times \lambda_f)$

Компенсация нелинейностей системы управления:

Коэффициент усиления регулятора обычно настраивается таким образом, что в области наибольшего петлевого коэффициента (т. е. для якоря в области не прерывистого тока или для возбуждения при управляющем угле в 90°) получается требуемая характеристика регулятора. При других токах регулятор тока соответственно становится более инертным. При активации адаптации регулятора тока усиление регулятора тока увеличивается обратно пропорционально петлевому коэффициенту. Тем самым достигается приблизительно равномерная характеристика регулятора при любом токе.

Компенсация нелинейных индуктивностей:

Коэффициент усиления регулятора обычно устанавливается таким образом, чтобы при высоком токе получалась бы требуемая характеристика регулятора. При низких токах регулятор тока соответственно становится более инертным. При активации адаптации регулятора тока усиление регулятора тока

увеличивается пропорционально индуктивности. Тем самым достигается приблизительно равномерная характеристика регулятора при любом токе.

Функциональная схема программного обеспечения адаптации регулятора тока якоря в SinamicsDCM представлена на рисунке 6.18. Значение тока якоря для расчета адаптации выбирается параметром **p50570** из фактического значения **I_фкт** или из заданного значения тока якоря **I_зад**. Адаптация к нелинейным индуктивностям может быть активирована посредством **p50571**, адаптация прерывистого тока посредством **p50572**. Коэффициент адаптации может быть ограничен посредством **p50573**. Для запуска адаптации на регуляторе тока якоря, выходной коннектор **r52350** должен быть подключен к входному параметру **p50175** (см. функциональную схему регулятора тока якоря на рис. 6.13). Благодаря этому воздействию теперь усиление регулятора тока якоря будет увеличиваться или ослабевать в зависимости от фактического значения тока якоря или заданного значения (выбор через **p50570**). Расчеты адаптации предназначены только для изменения коэффициента усиления K_p .

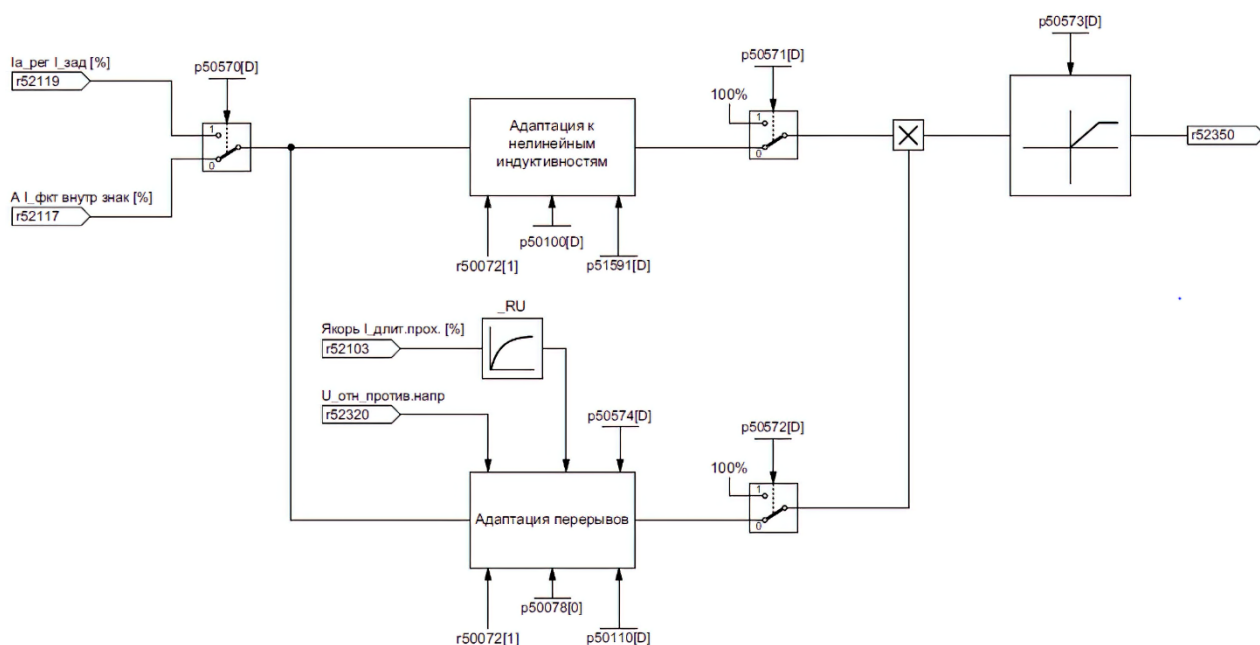


Рисунок 6.18. Адаптация регулятора тока якоря в SinamicsDCM

Аналогичная функциональная схема программного обеспечения адаптации регулятора тока возбуждения в SinamicsDCM представлена на рисунке 6.19. Значение тока якоря для расчета адаптации выбирается параметром **p50575** из фактического значения **I_возбфкт.зн** или из заданного значения **If_регзад.зн** тока возбуждения. Адаптация к нелинейным индуктивностям может быть активирована посредством **p50576**, адаптация к нелинейности системы управления посредством **p50577**. Коэффициент адаптации может быть ограничен посредством **p50578**. Для запуска адаптации на регуляторе тока возбуждения, выходной коннектор **r52355** должен быть

подключен к входному коннектору **p50267** (адаптация K_p). Благодаря этому воздействию теперь усиление регулятора тока возбуждения будет увеличиваться или ослабевать в зависимости от фактического значения тока возбуждения или заданного значения (выбор через **p50570**). Расчеты адаптации предназначены только для изменения коэффициента усиления K_p .

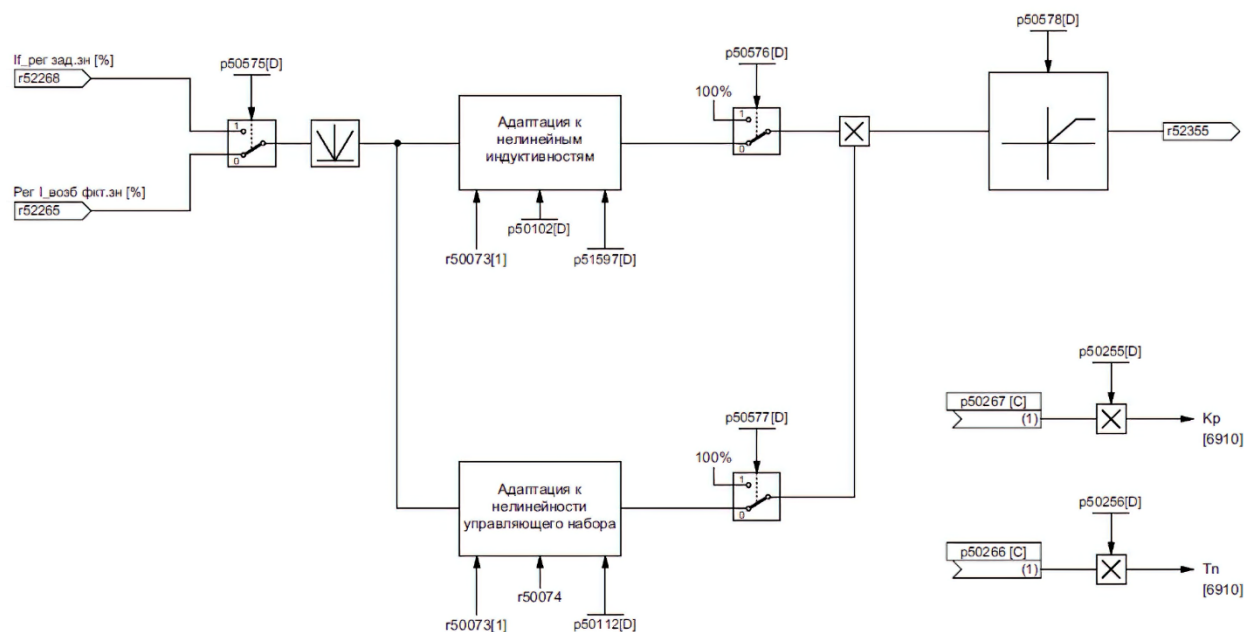


Рисунок 6.19. Адаптация регулятора тока возбуждения в SinamicsDCM

6.2. Регуляторы тока как регуляторы магнитного потока

В преобразователях постоянного тока питание обмоток возбуждения двигателей обеспечивает регулятор тока возбуждения. В преобразователях частоты с векторным управлением регуляторы реактивной составляющей тока **Id** отвечают за создание магнитного потока.

В двигателях постоянного тока изменение тока возбуждения приводит к изменению момента; нелинейная зависимость магнитного потока возбуждения **Φ** от тока обмотки возбуждения **If** может быть учтена введением нелинейного звена, связывающего зависимость тока возбуждения и магнитного потока. Например, в преобразователях TPD32 EV и PowerFlex DC drive заданная величина потока возбуждения с помощью зависимости, обратной кривой намагничивания $\Phi(I_f)$, преобразуется в задание тока возбуждения; это задание отрабатывается регулятором тока возбуждения. Функциональная схема задания магнитного потока двигателя в преобразователе TPD32 EV показана на рисунке 6.20.

Обратная зависимость кривой намагничивания $\Phi(I_f)$ **Ifieldcurve** настраивается с помощью параметров **P916-Ifieldcnst40**, **P917-Ifieldcnst70** и **P918-Ifieldcnst90**, определяющих величину тока возбуждения в процентах для значений магнитного потока в 40 %, 70 % и 90 % от номинального значения.

Параметры **P280-Motornomflux** и **P374-Nomfluxcurr** предназначены для нормирования заданного тока возбуждения. Регулятор тока возбуждения работает по пропорционально-интегральному закону, для его настройки предусмотрены параметры пропорционального **P91-FluxP** и интегрального **P92-FluxI** коэффициентов.

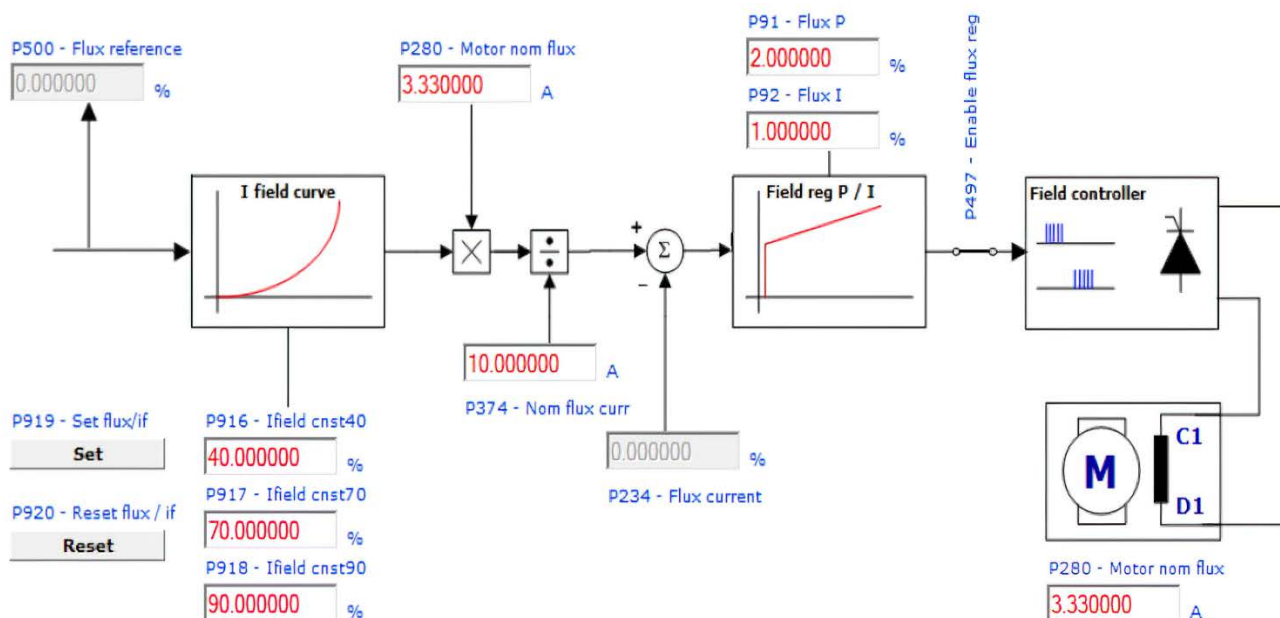


Рисунок 6.20. Задание магнитного потока возбуждения в TPD32EV

Регулятор тока возбуждения в преобразователе SinamicsDCM имеет более совершенную структуру, приведенную на рисунке 6.21. Как и в регуляторе тока якоря предусмотрена цепь предуправления, которая в зависимости от заданного тока возбуждения, величины сетевого напряжения питания, величин сопротивления и индуктивности цепи возбуждения двигателя рассчитывает величину угла управления **alpha** в однофазном мостовом тиристорном выпрямителе цепи возбуждения. Коннектор **r52271** представляет выходной сигнал цепи предуправления; в коннектор **r52260** выкладывается выходной сигнал ПИ-регулятора, результирующий сигнал задания угла управления **alpha** коннектором **r52252** подается на вход модуля формирования импульсов управления тиристорами.

Так же как и в регуляторе тока в регуляторе возбуждения привода SinamicsDCM предусмотрена возможность адаптации пропорционального коэффициента ПИ-регулятора к нелинейной индуктивности обмотки возбуждения и к нелинейности системы управления тиристорным выпрямителем (см. п. 6.1.6 и рис. 6.19).

В преобразователе предусмотрена возможность определения автоматически или вручную кривой намагничивания двигателя $\Phi(I_f)$. В параметрах от **p50120** до **p20139** хранятся значения тока возбуждения в

Рисунок 6.21. Регулятор тока возбуждения преобразователя SinamicsDCM

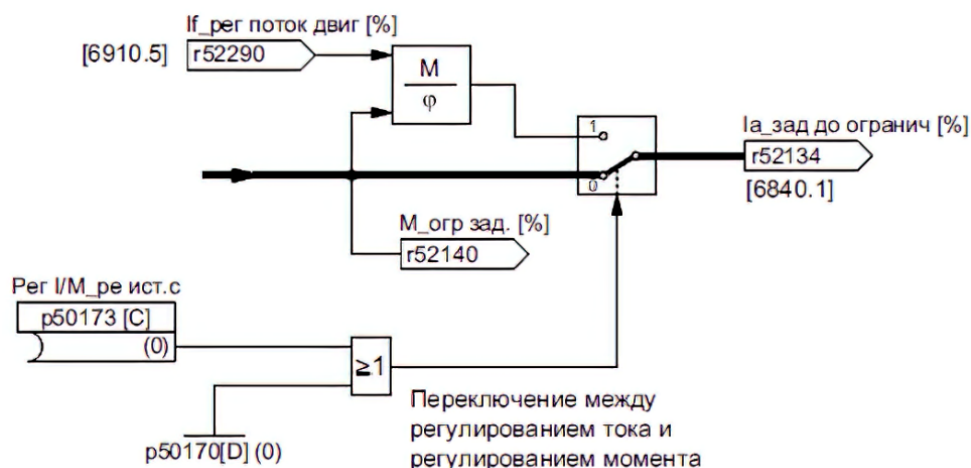


Рисунок 6.22. Учет изменения потока возбуждения при формировании задания тока якоря в SinamicsDCM

Во многих приводах постоянного тока предусмотрена функция **“Fieldeconomy”** – функция уменьшения тока возбуждения при неработающем двигателе. Во время стоянки двигателя ток возбуждения уменьшается до заданной минимальной величины **If_min**; при пуске двигателя ток возбуждения восстанавливается до рабочего значения. Функция **“Fieldeconomy”** предотвращает перегрев двигателя номинальным током возбуждения в неподвижном состоянии; в то же время нагрев обмотки возбуждения током **If_min** предотвращает образование конденсата на обмотках двигателя, установленного в неотапливаемом помещении или на улице.

7. РЕГУЛЯТОР ЭДС

Регуляторы ЭДС позволяют регулировать ток возбуждения I_f таким образом, чтобы ЭДС E_a двигателя постоянного тока соответствовала заданному значению при любых величинах скорости n :

$$E_a = C_E \cdot n \cdot \Phi(I_f), \quad (7.1)$$

где C_E – конструктивная постоянная двигателя; $\Phi(I_f)$ – поток возбуждения, зависящий от тока возбуждения.

В приводах с двигателями постоянного тока независимого возбуждения для расширения диапазона регулирования применяется так называемое двухзонное регулирование скорости. В первой зоне регулирование скорости двигателя выполняется за счет регулирования напряжения якоря при номинальном потоке возбуждения; во второй зоне используют режим ослабления потока возбуждения двигателя при номинальном напряжении на обмотке якоря или при номинальной ЭДС якоря. Регулятор ЭДС позволяет автоматически регулировать ток возбуждения двигателя при работе во второй

зоне. Нужно отметить, что для работы во второй зоне источником сигнала обратной связи для регулятора скорости не может использоваться сигнал ЭДС.

На рисунке 7.1 показана функциональная схема регулятора в приводе TPD32 EV. **Voltageregulator** фактически выполняет функции регулятора ЭДС, поскольку, как следует из выражения (5.3), пренебрегая падением напряжения в цепи якоря, ЭДС двигателя и напряжение якорной цепи близки по величине.

Выход регулятора **Voltageregulator** представляет собой задание на поток возбуждения **P500-Fluxreference**, которое преобразуется в задание тока возбуждения (на рис. 6.20 показана функциональная схема задания магнитного потока возбуждения) при разрешенном режиме ослабления потока возбуждения (разрешение задается параметром **P469-Fluxregmode**). Блок ограничения тока возбуждения **Fieldcurrentlimits** задает диапазон возможного изменения задания **P500-Fluxreference**.

На вход регулятора **Voltageregulator** поступает разность заданного выходного напряжения якоря **P175-Max. Outvoltage**, масштабируемого коэффициентом **P921-Outvltlevel**, и фактическим выходным напряжением **P233-Outputvoltage**. Как правило, величину **Max. Outvoltage** устанавливают равной номинальному напряжению якоря.

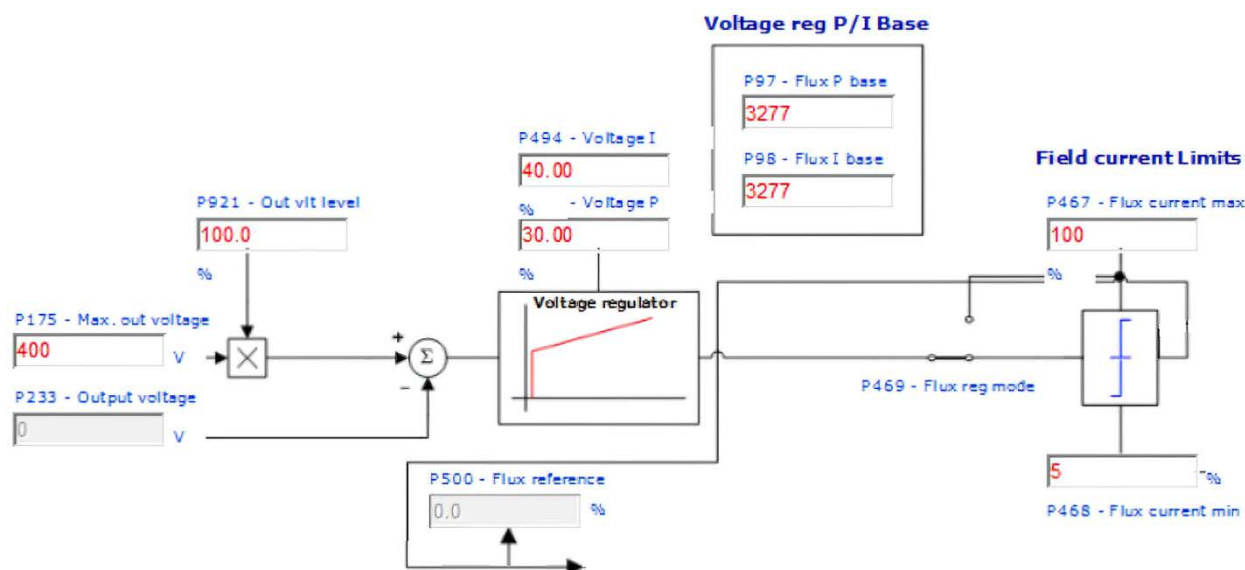


Рисунок 7.1. Регулятор напряжения и задание потока возбуждения

Аналогичную структуру регулятора ЭДС можно увидеть в приводе постоянного тока MentorMP (разработка ControlTechniques), показанную на рисунке 7.2.

На вход регулятора поступает разность между заданным значением ЭДС **Backemfsetpoint** и фактической ЭДС, вычисленной по значениям напряжения якоря **Armaturevoltage** и падения напряжения на сопротивлении цепи якоря **IRdroop**. Выходной сигнал регулятора ЭДС отдается в регулятор тока возбуждения. Регулятор выполнен по ПИ закону; для настройки регулятора предусмотрены параметры **Pgain**, **Igain**. Выходной сигнал регулятора

ограничивается сверху и снизу параметрами **Maximumflux**, **Minimumflux**. Значение фактической ЭДС может быть использовано для определения скорости двигателя **Estimatedspeed**.

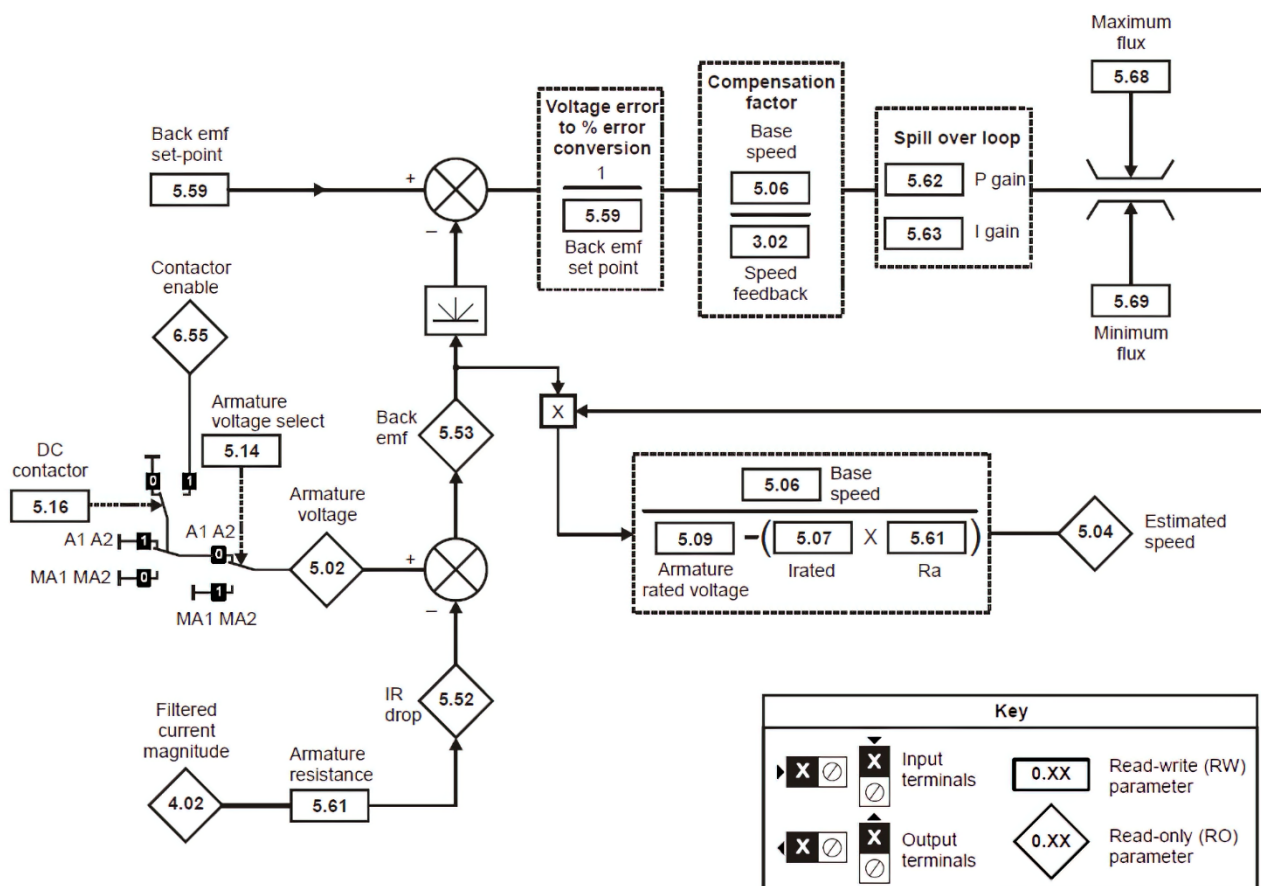


Рисунок 7.2. Регулятор ЭДС привода постоянного тока MentorMP

Рассмотрим порядок работы регуляторов скорости, тока якоря, тока возбуждения и ЭДС при двухзонном регулировании скорости.

Зона 1. В этой зоне скорость двигателя меньше номинальной скорости и, соответственно, напряжение якорной цепи и ЭДС ниже номинального напряжения. На вход регулятора ЭДС приходит положительная величина разности номинального и фактического напряжения якоря; выходной сигнал ПИ-регулятора будет стремиться к увеличению. Однако блок ограничения выходного сигнала регулятора ограничивает задание потока возбуждения номинальной величиной. В этой зоне регулирования регулятор тока якоря получает задание на ток якоря, соответствующий заданному от регулятора скорости заданию момента при номинальном потоке возбуждения.

Зона 2. Изменение задания скорости, например, увеличение задания при постоянном моменте сопротивления $M_{ст}$, приведет на выходе регулятора скорости к увеличению задания на ток якоря. Примем во внимание соотношения (5.3), (5.4), (5.5). Увеличение тока якоря I_a увеличит момент двигателя $M_{дв}$,

скорость двигателя ω будет увеличиваться и начнется увеличение ЭДС E_a . Увеличение фактической ЭДС двигателя выше заданного значения (обычно это номинальная величина ЭДС) приведет к тому, что выходной сигнал регулятора ЭДС уменьшится и уменьшится задание на регулятор тока возбуждения. После окончания переходного процесса ЭДС двигателя E_a установится равной заданному значению, поток двигателя $\Phi_{дв}$ уменьшится, ток якоря I_a увеличится.

Из последних рассуждений следует, что нагрузочная способность двигателя при ослаблении магнитного потока уменьшается.

8. ТИПОВЫЕ ФУНКЦИИ

В предыдущих разделах рассмотрены типовые задачи системы управления приводами, относящиеся к обеспечению требуемых скоростей и моментов. Помимо рассмотренных задач в программном обеспечении большинства цифровых систем управления предусмотрены функции, реализующие также специальные режимы работы. Реализация таких функций может выполняться в виде свободно конфигурируемых программных модулей, в виде предварительно настроенных прикладных макросов, с помощью опционально встраиваемых плат контроллера и т. п. Некоторые из этих функций рассмотрены ниже.

Полную информацию обо всех функциях следует получать из руководств по программированию соответствующих преобразователей.

8.1. ПИД-регулятор

Преобразователи постоянного и переменного тока часто выступают в роли подчиненного звена сложной системы управления. Например, в системе водоснабжения преобразователь частоты используется для регулирования скорости центробежного насоса; цель регулирования – поддержание постоянного давления в линии водоснабжения при изменении расхода. В такой системе задание на преобразователь частоты формируется регулятором давления.

В программном обеспечении многих приводов постоянного и переменного тока предусматривается дополнительный модуль регулятора, включающего пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие. Кроме того, в этот модуль обычно включают такие блоки, как фильтры, ограничения и т. п. Такие регуляторы часто называют технологическими. При активации регулятора надо определить источники сигналов задания и обратной связи, а также точку подключения выходного сигнала регулятора.

На рисунке 8.1 приведена функциональная схема технологического ПИД-регулятора в преобразователях частоты Sinamics G130/G150. Задание на регулятор может быть составлено из двух входных сигналов, подключаемых к параметрам **p2253** и **p2254**; для каждого из входных сигналов предусмотрено масштабирование параметрами **p2255** и **p2256**. Сигнал задания пропускается через задатчик интенсивности; в цепи задания также предусмотрен блок фильтра

с постоянной времени, выставляемой в параметре **p2261**. Сигнал обратной связи регулятора подключается к параметру **p2264**; параметры **p2266** и **p2267** задают максимальную и минимальную границы изменения сигнала обратной связи; дискретным параметром **p2254.3** обнуляется канал обратной связи. В структуре регулятора предусмотрен блок дифференцирования **p2274**, добавляющий во входной сигнал модуля ПИ-регулятора производную от сигнала обратной связи или от ошибки (**Tec_ctrsetaft.flt–Tec_regIstw.skali**). Параметры K_p и T_n ПИ-регулятора, входящего в состав технологического регулятора, задаются параметрами **p2280** и **p2285**. Предусмотрено прохождение сигналов пределов ограничения выходного сигнала ПИ-регулятора через задатчики интенсивности, настраиваемые параметром **p2293**.

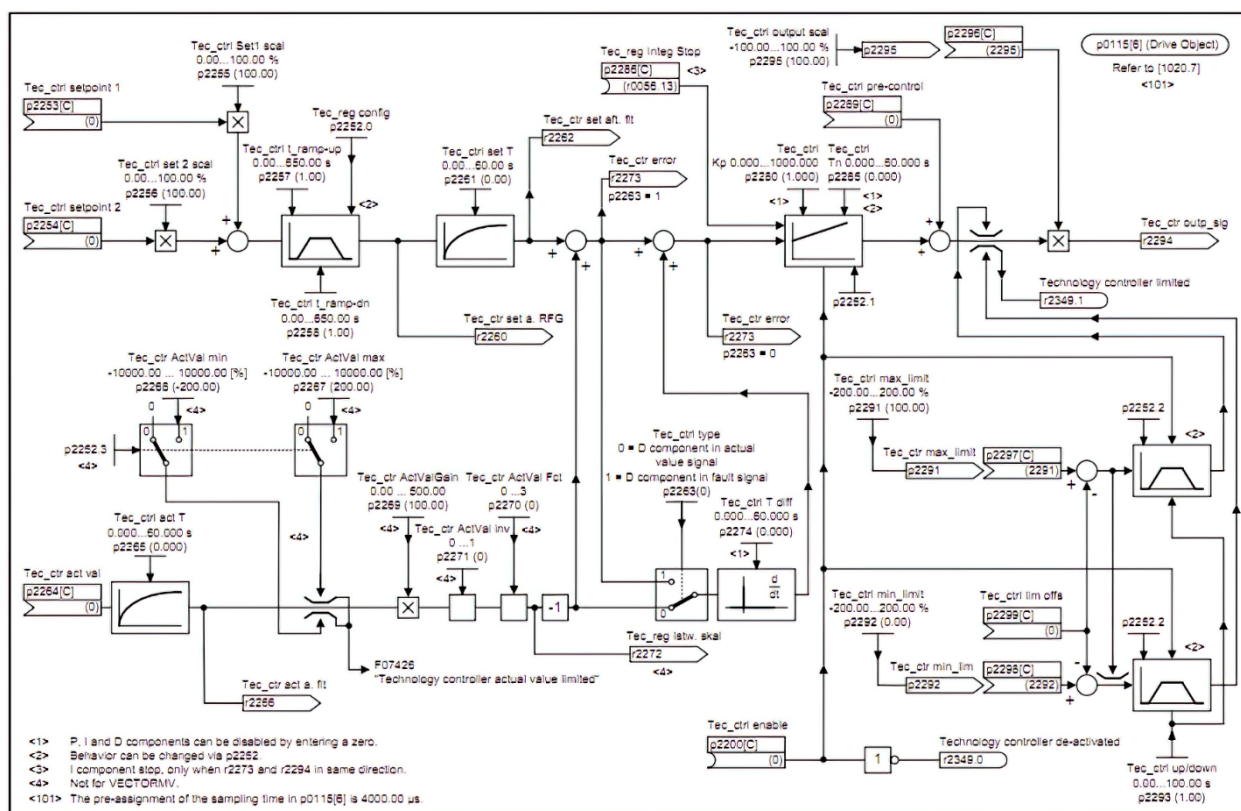


Рисунок 8.1. Функциональная схема технологического регулятора в Sinamics G130/G150

Например, для регулирования давления воды в системе водоснабжения посредством частотно-регулируемого привода насоса можно выполнить следующую конфигурацию преобразователя Sinamics G130/G150:

1. К аналоговому входу преобразователя подключить датчик давления в системе водоснабжения, коннектор с сигналом этого аналогового входа подключить к параметру входа обратной связи **p2264**.
2. К параметру входа задания подключить коннектор с сигналом задания, например, получаемого по шине управления Profibus.

3. Выходной коннектор технологического регулятора **r2294** подключить к параметру входного задания **p1070**.

8.2. Функции автонастройки регуляторов

В системах управления преобразователями присутствуют регуляторы тока, регуляторы скорости, входящие в структуру подчиненного регулирования; как правило, эти регуляторы работают по пропорционально-интегральному закону. В преобразователях обычно предусматриваются функции автоматической настройки этих регуляторов.

Для настройки регуляторов тока (токов якоря и возбуждения машин постоянного тока, активных и реактивных составляющих токов статора машин переменного тока) предусматриваются функции автоматического измерения активных и индуктивных сопротивлений цепи соответствующего тока. Отметим, что алгоритмы функций автоматического измерения сопротивлений обмоток электродвигателей повторяют алгоритмы типовых испытаний электрических машин. Измеренные значения этих сопротивлений используются для автоматического расчета параметров ПИ-регулятора тока.

При автоматической настройке регулятора скорости выполняется определение момента инерции двигателя и связанного с ним механизма; результаты измерений используются для расчета параметров ПИ-регулятора скорости. Определить момент инерции **J** можно при разгоне без нагрузки двигателя с механизмом; для этого задается постоянный момент двигателя **M₀** и определяется время Δt при увеличении скорости на величину $\Delta\omega$:

$$J = M_0 \cdot \Delta t / \Delta\omega \quad (8.1)$$

В деталях процедуры автоматической настройки регуляторов тока, регуляторов скорости и других регуляторов у различных производителей отличаются.

8.3. Функции для повышения устойчивости электрооборудования к нарушениям электроснабжения

Как правило, при возникновении таких неполадок, как пропадание питающего напряжения, при кратковременном избыточном или недостаточном напряжении и т. п., преобразователь фиксирует ошибку, переходит в состояние аварии и привод останавливается. В ряде технологических процессов аварийная остановка привода может приводить к тяжелым последствиям.

В программном обеспечении цифровых приводов предусматриваются специальные функции, повышающие устойчивость привода к кратковременным нарушениям электроснабжения. Приводные функции преобразователей позволяют удерживать в рабочем состоянии привод при возникновении

кратковременных нарушений электроснабжения, а также выполнить автоматический перезапуск. Выбор параметров этих функций определяется:

- запасом кинетической энергии механизма и тормозящим моментом со стороны нагрузки, что характеризует время свободного выбега при отключении питания привода;
- допустимым временем реализации приводных функций со стороны системы противоаварийной защиты;
- допустимым временем останова или допустимым уровнем снижения скорости привода по условиям технологии.

8.3.1. Автоматика повторного включения

Автоматика повторного включения предназначена для автоматического повторного включения установленного устройства, отключившегося из-за минимального напряжения в сети или сбоя в сети. При этом автоматически подтверждаются имеющиеся предупреждения, и привод вновь автоматически запускается.

Возможны два случая повторного пуска привода:

Нормальный пуск привода, начинающийся из состояния останова.

Пуск двигателя с помощью функции «улавливания».

Для приводов с малыми моментами инерции и нагрузки, позволяющие приводу останавливаться в пределах секунд (например, приводы насосов с водяным столбом), рекомендуется пуск из состояния останова.

Для приводов с большими моментами инерции (например, приводы вентиляторов) можно дополнительно активировать функцию «улавливания», которая позволяет подключаться к еще вращающемуся двигателю.

При конфигурации функции повторного включения задаются такие параметры, как количество попыток включения, временные интервалы задержек включения.

8.3.2. Подхват на лету (улавливание)

Возможны два случая:

1. Привод вращается в результате внешних воздействий, например, поток воды в приводах насосов при отсутствии или неисправности обратных клапанов, или тяга воздуха в приводах вентиляторов. Причем привод может также вращаться против направления вращения (например, при отсутствии или неисправности обратных клапанов после насосов).

2. Привод вращается в результате произошедшего до этого отключения, например, OFF2 или сбоя в сети. Из-за накопленной в ветви привода кинетической энергии привод медленно выбегает. (Пример: вытяжной вентилятор с высоким моментом инерции и резко идущей вниз характеристикой нагрузки в нижнем диапазоне частоты вращения).

Пуск улавливания осуществляется в следующих случаях:

- после восстановления напряжения в сети при активированной автоматике повторного включения;
- после отключения с помощью команды ВЫКЛ2 (импульсная блокировка) при активированной автоматике повторного включения;
- при поданной команде включения.

Функцию «Улавливание» необходимо использовать в тех случаях, когда двигатель по возможности еще работает или приводится в движение нагрузкой. В противном случае происходят отключения из-за тока перегрузки.

8.3.3. Регулирование напряжения V_{dc} , кинетическое буферирование

С помощью функции «Регулирование V_{dc} » возможны ответные реакции на перенапряжение или минимальное напряжение в звене постоянного тока преобразователя частоты в виде соответствующих мер.

Минимальное напряжение в промежуточном контуре. Типичная причина: исчезновение сетевого напряжения или питания для промежуточного контура.

Способ устранения:

Имеющиеся потери компенсируются путем ввода момента генераторного режима для вращающегося привода, в результате чего стабилизируется напряжение в промежуточном контуре. Привод сохраняет полную работоспособность до тех пор, пока двигатель вращается и вырабатывает энергию для питания привода. Если главный контактор остается в замкнутом состоянии, привод может продолжить работу после восстановления питания.

Данный метод называется кинетической буферизацией. Кинетическая буферизация может поддерживаться до тех пор, пока движущийся привод вырабатывает энергию.

Благодаря этой функции во время кратковременного сбоя в сети используется кинетическая энергия двигателя для буферизации напряжения промежуточного контура и при этом привод тормозит.

Недостаток этой функции: электродвигатель и приводимый технологический механизм, продолжающие инерционное вращение (с постепенной потерей производительности), ускоренно замедляют вращение и при восстановлении электроснабжения начинают разгон с меньшей скорости. Кроме того, следствием ускоренного замедления вращения приводимого механизма является повышение вероятности срабатывания технологической защиты оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бекишев, Р. Ф. Общий курс электропривода: учебное пособие / Р. Ф. Бекишев, Ю. Н. Дементьев; Томский политехнический университет. – 2-е изд. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 302 с.
2. TPD32-EV: instruction manual / GEFTRAN S.P.A. – Provaglio, Italy, 2016.
3. Sinamics DCM: справочник по параметрированию / Siemens AG, Process Industries and Drives, Large Drives. – Nurnberg, 2015.
4. Поддержание положения в сервоприводе: подчиненное регулирование vs шаговый режим [Электронный ресурс] // Habr. – 2016. – 11 апреля. – Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/npf_vektor/artic-les/392837/ (дата обращения: 15.06.2026).
5. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А. А. Усольцев. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.