

Приложение Г

Выбор силовых элементов систем электропривода включает в себя расчет требуемых номинальных данных для выбора как преобразователей, так и защитной и коммутационной аппаратуры (автоматических выключателей, контакторов, дросселей, добавочных сопротивлений).

Г1 Выбор силовых элементов системы ТП – Д

После выбора преобразователя (см. п.) по таблице Г1 выполняется расчет и выбор элементов защитной и коммутационной аппаратуры ТП. На рис. Г1 приведена схема подключения преобразователя «Mentor» с защитной (автоматические выключатели QF1 и MBS, контактор LC, дроссели LR, предохранители LF) и коммутационной аппаратурой (кнопки, реле, потенциометры), позволяющая понять принцип работы преобразователя и выбрать элементы силовой цепи.

Выбор трансформатора системы ТП – Д производится из условия обеспечения номинального напряжения на якоре двигателя при допустимых колебаниях напряжения сети (–10% +15 %) и номинальном токе якоря. Практически при номинальном напряжении на якоре двигателя $U_n = 220$ В применяют трансформатор, при $U_n = 440$ В – токоограничивающий реактор.

Для выбора трансформатора определяют линейное напряжение вентильной (вторичной) обмотки трансформатора по соотношению

$$U_{2л} = \sqrt{3} \frac{\kappa_R}{\kappa_u \kappa_c} U_{нтп}, \quad (\text{Г.1})$$

где κ_R – коэффициент, учитывающий падение напряжения за счет коммутации тиристоров, на активных сопротивлениях трансформатора, вентилях, сглаживающего реактора (предварительно $\kappa_R = 1,05$);

κ_u – коэффициент схемы выпрямления (для трехфазной мостовой схемы $\kappa_u = 2,34$);

κ_c – коэффициент, учитывающий допустимые колебания напряжения сети (для промышленных электрических сетей $\kappa_c = 0,85$).

Коэффициент трансформации трансформатора:

$$\kappa_T = U_{1л} / U_{2л}, \quad (\text{Г.2})$$

где $U_{1л}$ – номинальное линейное напряжение сетевой (первичной) обмотки трансформатора.

Значение тока фазы в цепи питания преобразователя (вторичной обмотки) при токе нагрузки I_n – номинальном токе двигателя

$$I_2 = \kappa_I \cdot I_n, \quad (\text{Г.3})$$

где κ_I – коэффициент схемы выпрямления по току (для трехфазной мостовой схемы $\kappa_I = 0,82$).

Таблица Г.1

Технические характеристики

Преобразователь Mentor II с микропроцессорным управлением, реверсивный, схема – трехфазная мостовая, управление группами – отдельное.

Максимально допустимое напряжение на входе преобразователя (через дроссели L_a, L_b, L_c) – $U_{пит} = 480 \text{ В} + 10\%$.

Максимальное рекомендуемое напряжение питания электродвигателя

– $U_{я} = 1,15 \cdot U_{пит}$;

Охлаждение – до $I_d = 105 \text{ А}$ – естественное, остальные – принудительное.

Класс изоляции IP00 .

Тип	Мощность двигателя при $U_{я}=400 \text{ В}$, кВт	Максимальный непрерывный ток		Потери кВт	Номинальный ток возбуждения А	Индуктивность дросселей L_a, L_b, L_c мкГн
		вход I_{\sim} А	выход I_d А			
M25R	7,5	21	25	0,038	8	200
M45R	15	38	45	0,075	8	200
M75R	30	60	75	0,15	8	100
M105R	37,5	88	105	0,19	8	100
M155R	56	130	155	0,28	8	75
M210R	75	175	210	0,38	8	75
M350R	125	292	350	0,63	10	35
M420R	150	350	420	0,75	10	27
M550R	200	460	550	1,0	10	25
M700R	250	585	700	1,3	10	23
M825R	300	690	825	1,5	10	19
M900R	340	750	900	1,7	20	17
M1200R	450	1000	1200	2,3	20	13
M1850R	750	1540	1850	3,8	20	8,6

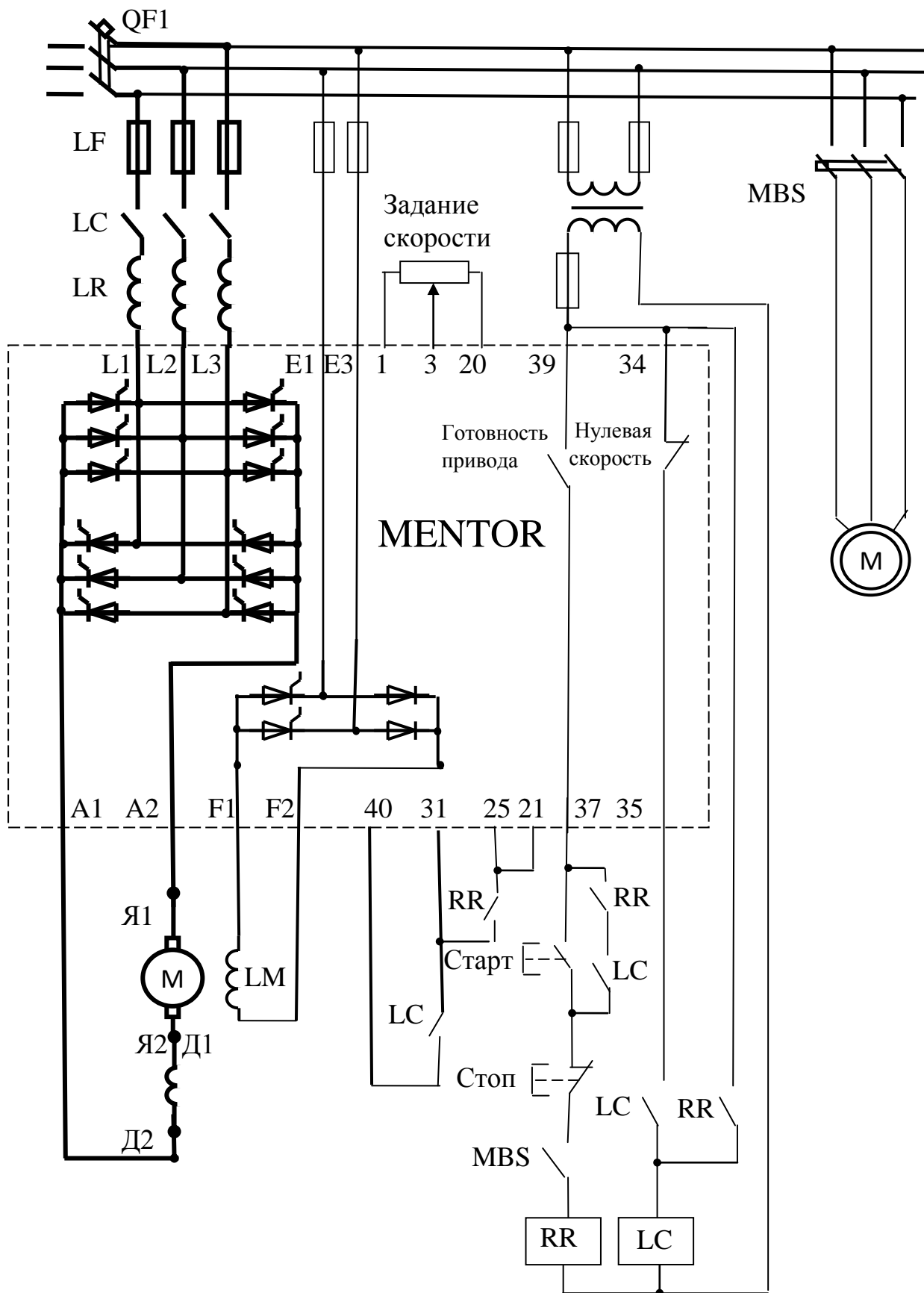


Рис. Г.1 Схема подключения преобразователя Mentor II

Значение тока первичной обмотки

$$I_1 = I_2 / k_T. \quad (\Gamma.4)$$

Расчетное значение типовой мощности трансформатора

$$S_m = \frac{\sqrt{3}(U_{1л} \cdot I_1 + U_{2л} \cdot I_2)}{2}. \quad (\Gamma.5)$$

Пользуясь полученными расчетными данными по справочникам или каталогам выбирают силовой трансформатор при $S_{mn} \geq S_m$. В тиристорных преобразователях на мощности от 10 до 400 кВА применяются трансформаторы типа ТСП (трансформатор сухой для полупроводниковых выпрямителей открытого исполнения) и ТСЗП (защищенного исполнения). Технические данные некоторых трансформаторов приведены в приложении В. Для дальнейших расчетов используются номинальные данные трансформатора: $S_{ТН}$, $U_{1лн}$, $U_{2лн}$, $I_{1н}$, $I_{2н}$, а также потери холостого хода $P_{хх}$ при $U_{1лн}$, потери короткого замыкания $P_{кз}$ при $I_{1н}$, напряжение короткого замыкания U_k %, ток холостого хода $I_{хх}$ %.

Выбор токоограничивающих реакторов, включаемых в цепь переменного тока мостовой схемы выпрямления тиристорного преобразователя (см. рис. Г1), производится по номинальному току, потребляемому из сети переменного тока, при номинальном напряжении. Для тиристорных преобразователей используют реакторы серии РТСТ (реактор трехфазный сухой токоограничивающий). Индуктивное сопротивление реакторов соответствует напряжению короткого замыкания (для номинального тока), равному 5,5%. Основные параметры некоторых реакторов приведены в Приложении В.

Сглаживающий реактор в цепи постоянного тока преобразователя сглаживает пульсации выпрямленного тока, уменьшает зону прерывистых токов и ограничивает скорость нарастания аварийного тока через тиристоры при коротком замыкании на стороне выпрямленного тока. За счет пульсаций тока якоря нагрев двигателя вырастает на 2...3% при коэффициенте пульсаций $g=0,15$, на 5...7 % – при $g=0,25$, на 15...22% – при $g=0,35$ [12].

Рост коэффициента пульсаций тока и напряжения ухудшает процесс коммутации двигателя, вынуждает снижать предельные значения тока якоря. При расчете индуктивности сглаживающего реактора исходят из допустимого уровня пульсаций выпрямленного тока в установившемся режиме при номинальном напряжении на якоре. Обычно действующие значения основной гармоники пульсаций выбираются в пределах $g\% = 2...15$ % номинального тока двигателя [5] в зависимости от мощности, диапазона регулирования скорости и условий коммутации двигателя. Рекомендуемая величина $g\% \leq 7\%$ [12].

Необходимая **индуктивность цепи выпрямленного тока** L_d может быть определена [5] по амплитудному значению первой гармоники выпрямленного напряжения $U_{dm(1)}$ и заданному коэффициенту пульсаций g :

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{m \cdot \omega \cdot g \cdot I_H}, \quad (\Gamma.6)$$

где m – пульсность (для трехфазной мостовой схемы $m = 6$);
 $\omega = 2\pi f_1 = 314$ рад/с – угловая частота сетевого напряжения;
 I_H – номинальный ток двигателя, А.

Для трехфазной мостовой схемы:

$$U_{dm(1)} = \frac{2U_{d0} \cos \alpha}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}; \quad (\Gamma.7)$$

$$\cos \alpha = \frac{E_d}{E_{d0}} \cong \frac{U_H}{U_{d0}}; \quad (\Gamma.8)$$

$$U_{d0} = 1,35U_{2л}. \quad (\Gamma.9)$$

Величина L_d может быть также рассчитана по соотношению [12]

$$L_d = \frac{12}{g\%} \frac{U_H}{I_H}.$$

Практически выпрямленный ток протекает при трехфазной мостовой схеме выпрямления через обмотку якоря и две обмотки силового трансформатора (токоограничивающего реактора). Индуктивное сопротивление рассеяния этих обмоток участвует в сглаживании пульсаций и величина индуктивности этих обмоток ($L_d + 2L_T$) должна быть учтена при выборе сглаживающего реактора.

Индуктивность обмотки якоря рассчитывают по формуле [10]:

$$L_{я} = \frac{k \cdot U_H}{p_n \cdot \omega_n \cdot I_H}, \quad (\Gamma.10)$$

где U_H , I_H , ω_n – номинальные напряжение (В), ток (А) и частота вращения (рад/с) двигателя;

p_n – число пар полюсов;

k – коэффициент, который принимают равным $k = 0,6$ для двигателей без компенсационной обмотки, и $k = 0,25$ – для компенсированных машин.

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора рассчитывают по каталожным данным режима короткого замыкания $L_T = L_{K3}$ трансформатора:

$$z_{K3} = \frac{U_{2H} \cdot U_{\%}}{I_{2H} \cdot 100}; \quad (\Gamma.11)$$

$$r_{K3} = \frac{P_{K3}}{3 \cdot I_{2H}^2}; \quad (\Gamma.12)$$

$$x_{K3} = \sqrt{\left(z_{K3}^2 - r_{K3}^2\right)}; \quad (\text{Г.13})$$

$$L_{K3} = \frac{x_{K3}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}. \quad (\text{Г.14})$$

Индуктивность обмотки токоограничивающего реактора приводится в каталогах..

Если необходимая индуктивность $L_d > L_{я} + 2L_T$, то требуется установка сглаживающего реактора с индуктивностью

$$L_p = L_d - (L_{я} + 2L_m). \quad (\text{Г.15})$$

Сглаживающий реактор выбирается по каталогу или справочнику по номинальному току двигателя I_n и проверяется на допустимые перегрузки по максимуму тока перегрузки и времени действия перегрузки.

Двигатели постоянного тока серии Д (краново-металлургическая серия) допускают питание от преобразователей постоянного напряжения, соединенных по трехфазной мостовой схеме, без применения сглаживающих реакторов, при этом коэффициент пульсаций $g < 7\%$ [4].

Г2 Выбор силовых элементов системы ПЧ – АД

Г2.1 Общие положения при выборе электропривода переменного тока на базе асинхронного двигателя:

– **Выбор номинальной мощности преобразователя** $P_{прн} = P_{двн}$ – недостаточен, необходимо $I_{прн} > I_{двн}$, но и в этом случае необходима проверка способности преобразователя выдерживать ожидаемые перегрузки;

– **Учет требуемого диапазона регулирования скорости**

При $f_1 > f_{1H}$

– работа возможна при пониженном моменте двигателя $M < M_H$;

– максимальная скорость определяется параметрами механической части двигателя;

При $f_1 \ll f_{1H}$ и моменте, близком к номинальному, ухудшаются условия охлаждения. Возможно применение принудительной вентиляции.

– **Возможность работы в тормозном режиме** с отдачей энергии торможения через модуль инвертора на звено постоянного тока. Для механизмов, требующих быструю остановку или резкое снижение скорости, необходимо предусматривать тормозные резисторы или модули рекуперации энергии в питающую сеть (см. п. 7.3).

– **Учет длины силового кабеля для подключения двигателя.** При превышении длины необходим фильтр на выходе преобразователя и учет дополнительных потерь мощности в фильтре и питающем кабеле.

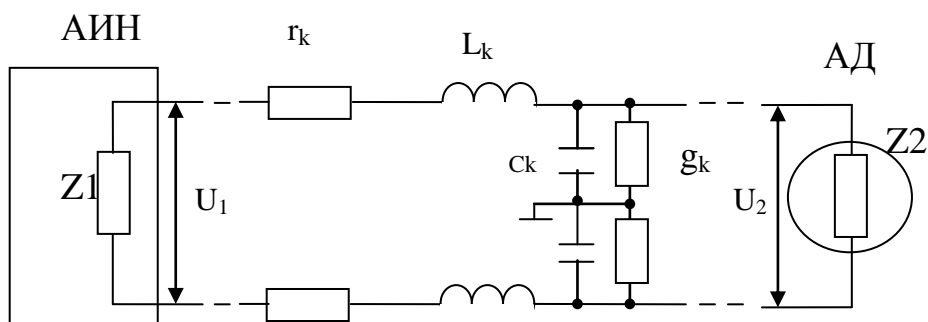


Рис. 2 Схема соединения АИН с АД
(эквивалентная схема элементарного участка кабеля)

Для широкого ассортимента монтажных проводов и кабелей усредненные значения сопротивлений составляют

$$L_k = 1 \text{ мкГн/м}, C_k = 50 \text{ пФ/м}, r_k = g_k = 0.$$

При этих параметрах длина волны составляет ≈ 30 м. Когда падающая волна суммируется с отраженной, напряжение на обмотках двигателя может увеличиться вдвое.

Критическая длина кабеля от 7 м до 20 м.

Для надежного функционирования электропривода необходимо обеспечить **соответствие параметров питающей сети** техническим характеристикам преобразователя. Необходимые пределы указывает изготовитель, **практически $\pm 15\%$** .

В некоторых случаях пределы могут быть завышены:

- на конечных участках длинных магистральных линий в вечерние часы и выходные дни, когда отключаются мощные потребители;
- при питании от локальных источников (дизель-генераторы) возможно значительное снижение напряжения.

Искажения в питающей сети:

- оборудование для коррекции коэффициента мощности (переключение ступеней конденсаторной установки) может вызвать большие броски напряжения;
- наличие мощного сварочного оборудования, особенно контактных и высокочастотных сварочных аппаратов;
- наличие других приводов, полупроводниковых преобразователей электротехнических систем, и т.п.

Современные ПЧ способны выдержать довольно интенсивные возмущения в сети, например, броски напряжения до 4 кВ. Однако перечисленное оборудование может вызвать более мощные искажения. При невозможности устранения искажений необходимо, как минимум, предусмотреть установку входных **сетевых дросселей** для ПЧ, а также ограничителей напряжения на базе **варисторов**.

Необходимо наличие защиты преобразователей от коротких замыканий в сети и устройства грозозащиты.

Ограничения со стороны двигателя. При длительной работе на пониженных скоростях охлаждение двигателя (обычно – с самовентиляцией) недостаточ-

ное, приходится снижать момент до $0,75 M_H$ или применять независимую вентиляцию.

Тип нагрузки механизма. Самым оптимальным видом является привод центробежных насосов и вентиляторов, у которых момент пропорционален квадрату скорости. У других механизмов проблемы с условиями пуска, когда необходимо обеспечивать заданное ускорение ($M_{дин}$), но и не допускать перегрев двигателя пусковыми токами. Приходится тщательно формировать механические характеристики таких механизмов.

Данные преобразователей частоты можно выбрать в Internet (см. Приложение Л). Для примера рассмотрим преобразователь АТ05.

Г2.2 Преобразователь частоты транзисторный АТ05 фирмы *Triol* – высокодинамичный низковольтный (0,4 кВ) электропривод, реализует 4–квadrантное управление приводным асинхронным двигателем, в том числе режим рекуперативного торможения с возвратом энергии в питающую сеть.

Электропривод выполнен на основе двухзвенного преобразователя частоты с транзисторным (*IGBT*) автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсным (ШИМ) управлением и многофункциональной микропроцессорной системой управления с развитым интерфейсом.

В электроприводе реализовано частотное управление асинхронным электродвигателем, заключающееся во взаимосвязанном регулировании частоты f и питающего напряжения U основной гармоники.

Принцип действия и устройство электропривода поясняет схема силовых цепей АТ и функциональная схема цепей управления, представленная на рис. Г2.

Технические данные преобразователей АТО приведены в таблице Г2.

Обозначение элементов в схеме:

- В – силовой блок выпрямления/рекуперации;
- ФС – силовой С-фильтр звена постоянного напряжения;
- ТК – транзисторный ключ инверторного торможения;
- БТР – тормозной резистор;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- ДТ – датчики тока;
- М – асинхронный электродвигатель;
- ИП – источник питания (конвертор);
- ДН – датчик напряжения;
- ФИ – формирователь управляющих сигналов транзисторов (драйвер);
- УВВ – устройство ввода / вывода (внешний интерфейс);
- МК – микропроцессорный контроллер;
- ПУ – пульт управления.

Силовой канал осуществляет двухступенчатое преобразование электрической энергии – выпрямление сетевого напряжения с помощью диодного выпрямителя В, работающего в двигательном режиме, и последующее инвертирование выпрямленного постоянного по величине напряжения посредством АИН. В режиме рекуперативного торможения двигатель переводится в генераторный режим, АИН обеспечивает подачу на статор реактивного тока заданной частоты, а

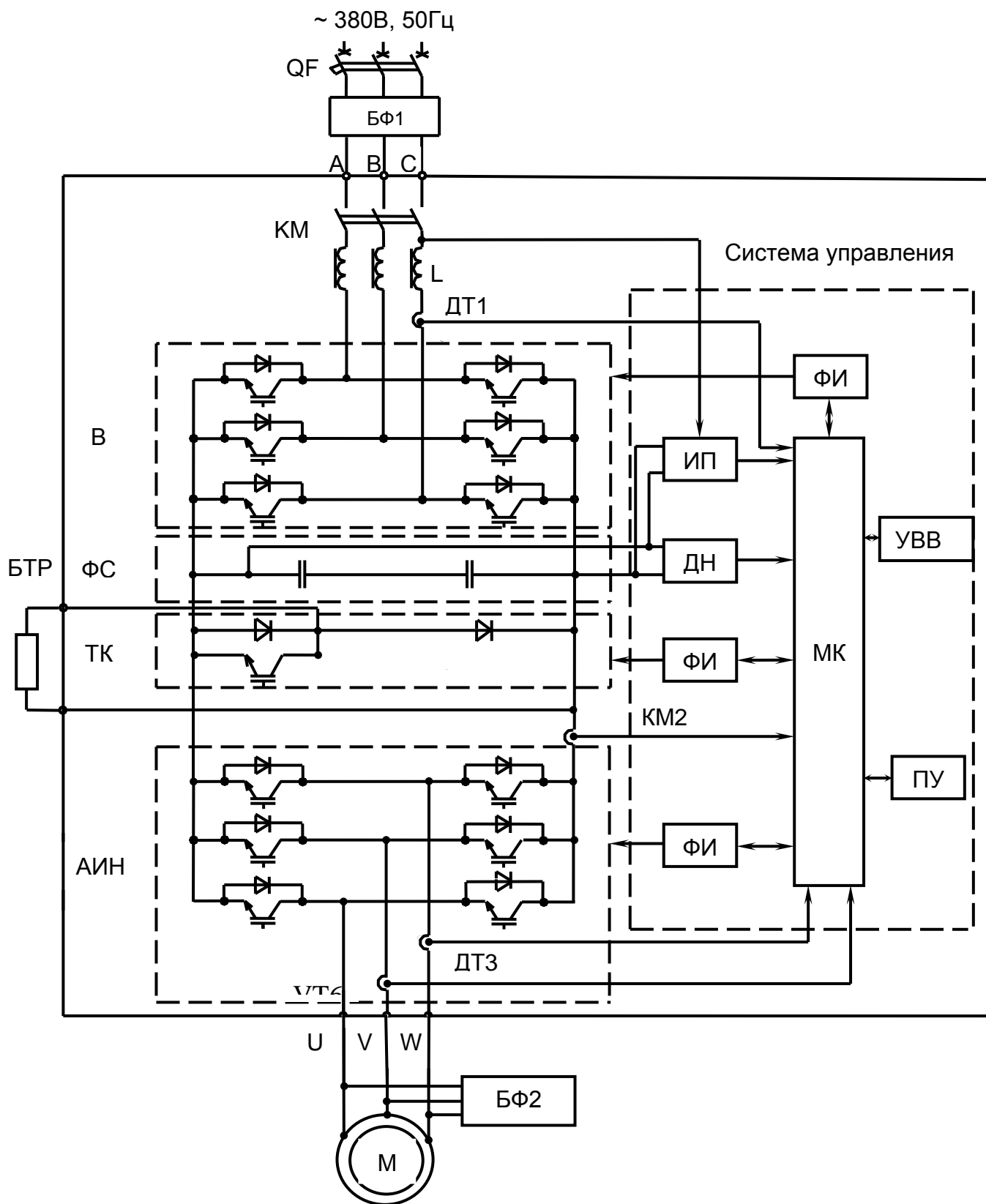


Рис. Г.2 Схема силовых цепей и функциональная схема управления электропривода АТО5.

диодный мост АИН осуществляет выпрямление тока статора, заряжая емкость фильтра ФС. При изменении направления тока в звене постоянного тока

Технические данные преобразователя АТО5

Питающая сеть	3x220 В (+10%, -15%), 50 Гц ($\pm 2\%$)
Выходное напряжение	3x (0...220 В $\pm 2\%$)
Выходная частота	0...400 Гц $\pm 0,05\%$
Ток перегрузки	1,5 I _н в течение 60 с
КПД (без двигателя)	0,95
Коэффициент мощности (сети)	0,95

Номинальный ток и мощность типов электроприводов

Тип электропривода АТО4, АТО5, АТО6	Полная мощность, кВа	Номинальная мощность двигателя, кВт	Номинальный ток нагрузки I _н , А
- 005	7,5	5,5	11
- 007	10	7,5	15
- 011	15	11	22
- 015	18	15	30
- 022	28	17;18.5;22	45
- 037	45	30;37	75
- 055	72	55	110
- 075	100	75	150
- 090	120	90	180
- 110	145	110	220
- 132	175	132	264
- 160	210	160	320
- 200	260	200	400
- 250	330	250	500
- 315	400	315	630

В приводах АТО4 и АТО6 в силовой цепи устанавливаются неуправляемые выпрямители В, а АТО6 выпускается для приводов мощностью до 37 кВт.

включается в работу транзисторный (IGBT) мост выпрямителя В, обеспечивая передачу в сеть избыточной электрической энергии.

Алгоритм ШИМ обеспечивает взаимосвязанное регулирование частоты f и величины U выходного напряжения по заданному закону, а также формирует синусоидальную форму кривой тока приводного АД.

Датчики тока ДТ и напряжения ДН в силовом канале электропривода служат для контроля, регулирования и измерения электрических параметров электропривода, в том числе для защиты от токов перегрузки и короткого замыкания, недопустимых отклонений напряжения.

Система управления предусматривает настройку привода в полном объеме с местного ПУ, дистанционного пульта или АСУТП как при наладке, так и при работе на производственном объекте. Настройка привода осуществляется с помощью редактирования соответствующих параметров, сведенных в функциональные группы

Электропривод АТО5 обеспечен защитой от аварийных и нештатных режимов:

- от токов недопустимой перегрузки и короткого замыкания, в том числе от замыкания на «землю»;
- от недопустимых перенапряжений на силовых элементах;
- от недопустимых отклонений и исчезновения напряжения питающей сети;
- от неполнофазного режима работы сети и электродвигателя;
- от недопустимых отклонений технологического параметра;
- от неисправности в узлах и блоках электропривода и др.

Г2.3 Выбор фильтров, автоматических выключателей, тормозного резистора выполняется по рекомендациям изготовителя, который поставляет необходимые комплектующие (за отдельную плату).

На рис. Г3 приведена схема подключения коммутационной и защитной аппаратуры преобразователя частоты. Коммутационная и защитная аппаратура, дроссели и фильтры предназначены для устранения нежелательного влияния преобразователя частоты на двигатель и питающую сеть, защиты преобразователя и питающих кабелей, аварийного отключения преобразователя и двигателя от силового питания.

Выбор аппаратов защиты для преобразователей частоты определяется их номинальным входным током, указанным в каталоге.

Подключение преобразователя к сети осуществляется **автоматическим выключателем QF**, выбор которого определяется максимально возможной перегрузкой преобразователя ($1,5 \cdot I_H$ в течение 60 с). Данные по автоматическим выключателям приведены в Приложении В.

Сетевой контактор КМ1 во входной цепи ПЧ обеспечивает функцию аварийного останова электропривода и может использоваться для безопасного его отключения.

На объектах эксплуатации с использованием чувствительных к радиопомехам устройств автоматики, телеметрии, связи для снижения уровня радиопомех, генерируемых силовым преобразователем АТО, устанавливают блок БФ1 входного фильтра из дросселя L1 и помехоподавляющего фильтра Z1.

Сетевой коммутационный дроссель L1 снижает гармоники тока, которые вырабатывает в преобразователе блок выпрямления/рекуперации. Эффект применения дросселя зависит от отношения мощности короткого замыкания питающей сети к мощности привода. Рекомендуемое значение этого отношения более 33:1,

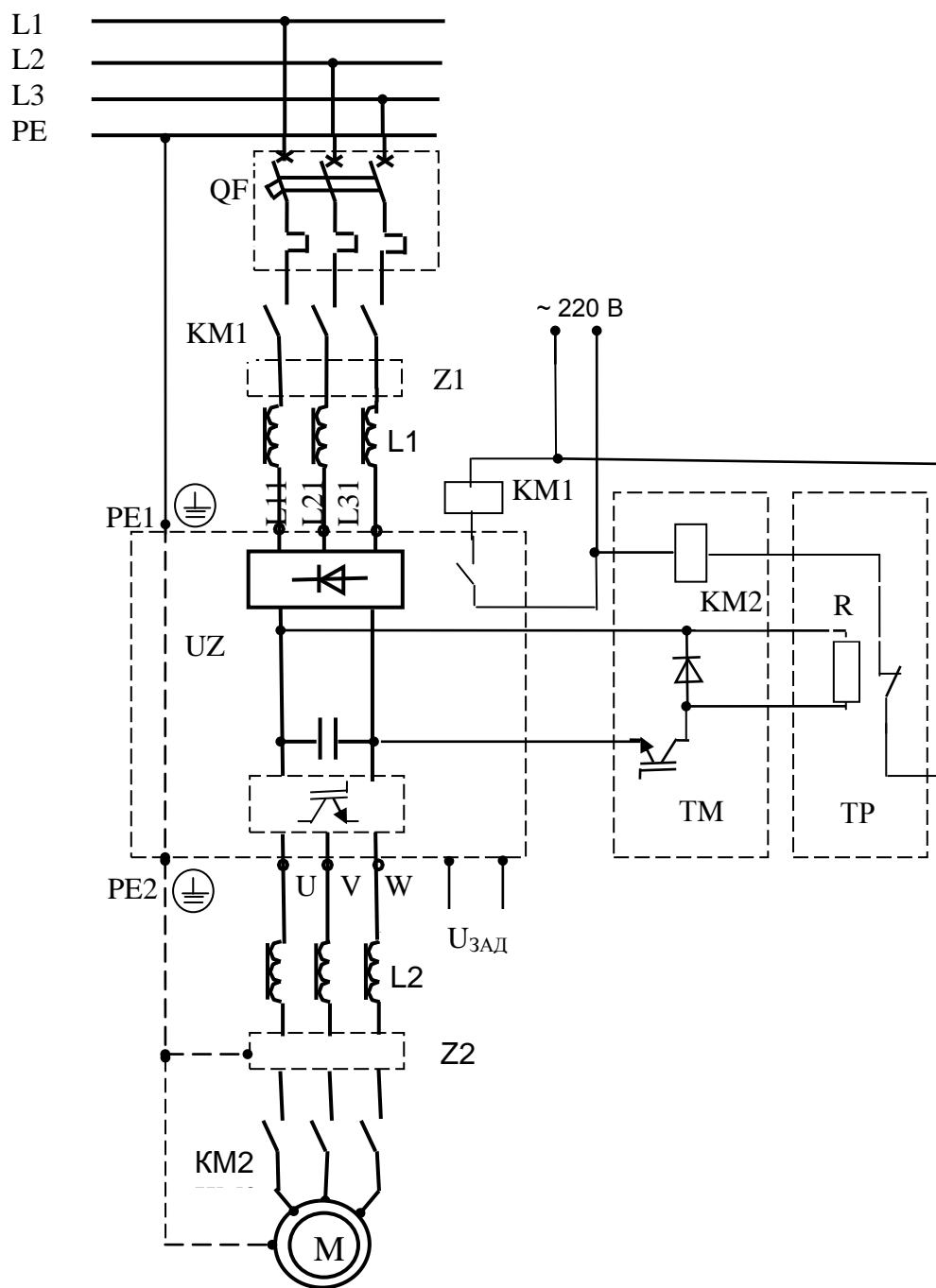


Рис. Г3 Схема подключения защитной и коммутационной аппаратуры ПЧ

используются 2...4% - ные дроссели (2...4% – падение напряжения при номинальном токе). Сетевой коммутационный дроссель L1 также снижает выбросы тока, вызванные скачками напряжения в сети (при работе компенсирующих устройств или переключениями на подстанции).

Следует учитывать следующие условия:

– номинальный длительный ток дросселя был равен или больше, чем максимальный длительный ток, потребляемый ПЧ от сети;

- при рабочих и аварийных режимах магнитопровод дросселя не должен входить в насыщение;
 - на обмотках дросселя падает напряжение и при неправильном выборе дросселя (слишком высокое сопротивление на частоте 50Гц) напряжение на входе ПЧ может быть меньше допустимого для его нормальной работы. А при маленькой индуктивности дросселя его полезные свойства могут быть сведены до нуля;
 - дроссель должен быть рассчитан на соответствующее напряжение сети.
- Выбор сетевого дросселя L1 типа ED3N в зависимости от мощности двигателя – в Приложении В.

Для ограничения перенапряжений на зажимах приводного двигателя и защиты изоляции его обмоток от пробоя, если длина силового кабеля превышает 10...15 м, в непосредственной близости от двигателя рекомендуется подключать выходной du/dt - фильтр Z2 и дроссель L2.

Выходные **моторные дроссели L2** устанавливаются на выходе ПЧ и обеспечивают:

- **подавление высокочастотных гармоник** в токе двигателя. Формирование синусоидального тока в обмотках двигателя осуществляется ПЧ с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения по синусоидальному закону. При низких частотах ШИМ высокочастотные пульсации моторного тока могут достигать до 5-10%. Высокочастотные гармоники тока вызывают дополнительный нагрев двигателя.
- **ограничение амплитуды тока короткого замыкания**. При внезапном коротком замыкании на выходе ПЧ ток короткого замыкания увеличивается не внезапно, так как в контуре тока к.з. есть индуктивности (L моторного дросселя + паразитные индуктивности моторного кабеля). При достижении током к.з. порога срабатывания защиты ПЧ двигатель обесточивается. Так как время срабатывания защиты отлично от нуля, то максимальное значение тока к.з. при использовании моторного дросселя реально намного меньше максимального значения тока без дросселя. Без моторного дросселя многие ПЧ не способны защитить транзисторы ПЧ от одного или нескольких внезапных К.З на выходе ПЧ.
- **снижают скорость нарастания аварийных токов** короткого замыкания и задерживают момент достижения максимума тока короткого замыкания, тем самым обеспечивают необходимое время для срабатывания цепей электронной защиты ПЧ;
- **компенсируют емкостные токи длинных моторных кабелей**, то есть не дают развиваться большим емкостным токам и соответственно препятствуют ложным срабатываниям защиты ПЧ от сверхтоков;
- **снижают выбросы напряжения на обмотках двигателя**. При питании асинхронного двигателя от преобразователя частоты к обмоткам двигателя прикладывается импульсное напряжение со значительными пиками перенапряжений, суммарная величина которых превышает амплитуду номинального напряжения питания асинхронного двигателя. Это может вызвать пробой изоляции обмоток двига-

теля, особенно при его длительной эксплуатации, когда изоляция обмоточных проводов и обмоток теряет свои первоначальные изоляционные свойства.

Выходные моторные дроссели компенсируют емкостные токи в длинных кабелях, и совместно с емкостью кабеля ограничивают производную напряжения на обмотке статора на уровне $du/dt \cong 500$ В/мкс.

Выбор моторного дросселя L2 типа ED3S в зависимости от мощности двигателя – в Приложении В.

Радиочастотные фильтры РЧ Z1, Z2 используются для снижения уровня радиочастотных помех, излучаемых преобразователем в питающую сеть.

Для выполнения требований стандарта электромагнитной совместимости, описанных в европейских директивах EMC, для преобразователей частоты разработаны специальные фильтры. Однако для полного удовлетворения требований EMC установка данных фильтров должна сопровождаться соответствующим правильным монтажом и подключением преобразователя частоты. При использовании внешнего РЧ фильтра класса В совместно с преобразователем достигается снижение помех до уровня, соответствующего категории непромышленных помещений.

Для обеспечения правильного и надежного функционирования необходимо при выборе защитных устройств учитывать токи утечки и обеспечить надежное заземление фильтра.

Рекомендации по выбору (размеры РЧ) фильтров для конкретных моделей ПЧ даны в руководствах по эксплуатации на преобразователи.

Выбор **радиочастотных фильтров** Z1, Z2 в зависимости от мощности двигателя – в Приложении В.

Г2.4 Выбор блоков тормозных резисторов ПЧ–АД

При переводе двигателя в генераторный режим энергия возвращается в звено постоянного тока преобразователя через обратные диоды транзисторного инвертора, заряжая конденсаторы силового фильтра до напряжения, запирающего диоды силового выпрямителя.

Преобразователь пытается уменьшить напряжение, увеличивая выходную частоту, тем самым, уменьшая скольжение двигателя. Интенсивность замедления (торможения) в этом случае зависит от потерь мощности в преобразователе и двигателе.

АД можно тормозить с мощностью около 20% от номинальной за счет собственных потерь двигателя и преобразователя. Этого обычно достаточно для небольших неинерционных нагрузок, т.е. там, где кинетическая энергия невелика или время торможения не критично.

Если требуется произвести быстрое торможение, необходимо использовать тормозной прерыватель и резистор.

При включении тормозного ключа тормозной резистор разряжает конденсаторы фильтра и рассеивают избыточную энергию торможения. Блоки торможения используются при редких и кратковременных торможениях механизма, например при аварийном торможении.

Выделяемая мощность, определяющаяся изменением кинетической энергии приводного механизма при уменьшении скорости двигателя, зависит от интенсивности этого изменения. Выражение для мощности, обусловленное уменьшением кинетической энергии механизма и возвращаемой в звено постоянного тока, имеет вид [6]:

$$P_{\Sigma} = W_{\text{КИН}}/t_1 - P_C = J_{\Sigma} \cdot \omega^2 / (2 \cdot t_1) - P_C,$$

где P_C – мощность на выполнение полезной работы, преодоление сил трения в механизме и потерь в двигателе и инверторе, Вт;

ω – угловая скорость двигателя, 1/с;

t_1 – интенсивность торможения, с.

Сопротивление R и рассеиваемая мощность P тормозного резистора выбирается из соотношений

$$P = P_{T\text{МАКС}} = J_{\Sigma} \cdot \omega^2 / (2 \cdot t_1).$$

Максимальный ток, коммутируемый ключом тормозного резистора,

$$I_{D\text{МАКС}} = U_d / R,$$

где U_d – порог срабатывания тормозного прерывателя преобразователя частоты.

Тормозные резисторы поставляются производителями преобразовательной техники и выбираются исходя из конкретных режимов торможения по каталожным данным. Как правило, табличные данные:

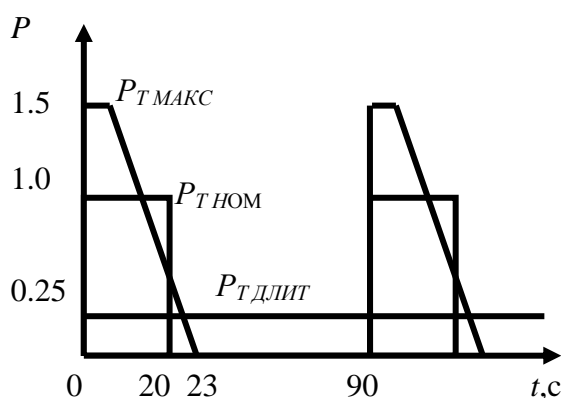


Рис. Г3 Нагрузочная диаграмма для выбора тормозного резистора

- номинальное сопротивление R ;
- продолжительность включения в процентах от общего времени цикла;
- пиковой мощности торможения $P_{T\text{МАКС}}$ в течение определенного времени;
- мощности торможения в продолжительном режиме $P_{T\text{ДЛИТ}}$.

указываются производителями для конкретных преобразователей частоты с учетом порога срабатывания тормозного прерывателя, настроенного по умолчанию. Однако в некоторых случаях значение порога срабатывания может настраиваться пользователем.

Например, параметры тормозных резисторов для приводов серии *Simovert VS* указываются из расчета цикличности торможения 90 с (рис. Г3). Величина $P_{T\text{НОМ}}$ характеризует номинальную мощность торможения в течение 20 с с цикличностью 90 с, $P_{T\text{МАКС}}$ – максимальную (пиковую) мощность торможения в течение 3 с с последующим ее снижением в течение 20 с, а $P_{T\text{ДЛИТ}}$ – это максимально допустимая длительная мощность торможения. При этом

$$P_{T\text{НОМ}} = 4 \cdot P_{T\text{ДЛИТ}}; P_{T\text{МАКС}} = 6 \cdot P_{T\text{ДЛИТ}}.$$

При выборе тормозного резистора необходимо учитывать цикличность и параметры режима торможения привода.

Порядок выбора:

1. Построить диаграмму изменения мощности торможения в течение рабочего цикла электропривода $P_T = f(t)$.
2. Рассчитать среднее значение мощности торможения $P_{T\text{ ср}}$ в течение рабочего цикла.
3. Выбрать тормозное сопротивление из условия $P_{T\text{ ном}} > P_{T\text{ ср}}$.
4. Определить максимальную мощность торможения и проверить выполнение условия $P_{T\text{ макс}} > 1,5 \cdot P_{T\text{ ном}}$. Если это условие не выполняется, необходимо выбрать тормозной резистор большей мощности.

Если реальное время цикла не равно 90 с и если торможение привода происходит нерегулярно, процедура выбора тормозного резистора сводится к выбору на диаграмме мощности торможения отрезка времени $t = 90$ с, где значение $P_{T\text{ ср}}$ максимально

Дальнейшие действия в соответствии с п. 3 и 4 описанной методики.

Тормозные модули и тормозные резисторы. Преобразователи до **11...15 кВт** имеют **встроенные тормозные ключи**. При необходимости принудительного торможения двигателя для преобразователей от 15 кВт и выше требуются внешний тормозной модуль и тормозные резисторы.

Рекомендуемые тормозные модули и резисторы при 10% цикле торможения (максимальное время торможения в цикле – 10 сек) приведены в таблице.

При предельной температуре тормозного сопротивления контактор КМ2 отключает двигатель.

Выбор тормозных модулей и тормозных резисторов по рекомендации производителя в зависимости от мощности двигателя – в Приложении В.