

**Устройства плавного пуска и торможения двигателей электроустановок:**  
**грамотное использование.**

**Что может УПП?**

Среднее по функциональности УПП позволяет решать следующие задачи:

- Ограничить пусковой ток (в большинстве случаев на уровне 3-4,5  $I_{НОМ}$ ) и просадки сетевого напряжения питания в зависимости от мощности силового трансформатора и характеристик подводящих шин питания;
- Оптимизировать пусковой и тормозной моменты для безударных разгонов и остановок приводимых механизмов, продлить срок использования подшипников, зубьев колёс редукторов, ремней и других деталей машин;
- Аварийно защитить питающую сеть от токовых перегрузок, заклинивания вала.

**Схожесть тиристорного пуска с классическими способами пуска электродвигателей.**

Тиристорный способ пуска похож на пуск при пониженном напряжении, который в прежние времена реализовывался как переключение «звезда-треугольник» или ступенчатый пуск от автотрансформатора. Благодаря тиристорам такой способ пуска не имеет недостатков ступенчатости двух последних способов, но, с точки зрения механических характеристик, не может сдвинуть «горб» области максимального момента к области нулевой скорости, и вынужден мириться с падением пускового момента при ограничении тока.

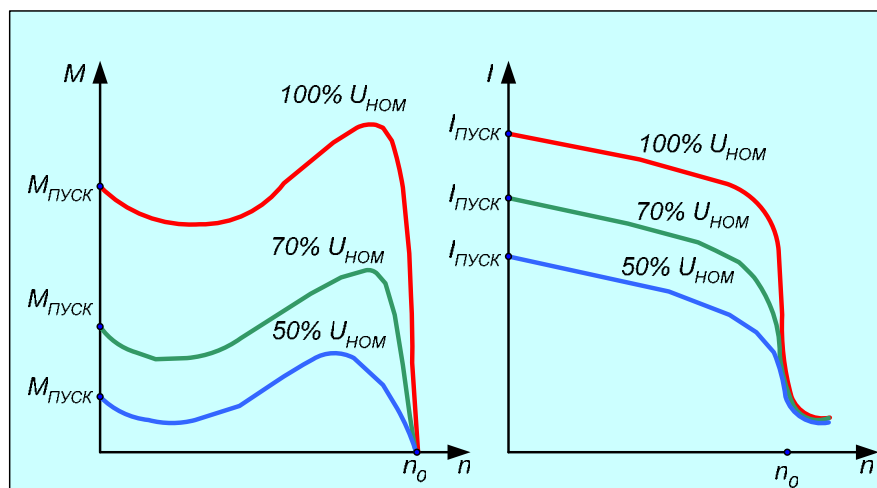
Тиристорный пуск не похож на пуск мотора с фазным ротором и тем более двигателя постоянного тока с последовательно включенной обмоткой возбуждения (см. выше). В большинстве реальных ситуаций, когда мы модернизируем уже имеющийся механизм с имеющимся двигателем (асинхронным с короткозамкнутым ротором и обмотками, соединёнными в звезду), условно есть только 3 практических способа «умягчения» пуска.

1. **Автотрансформатор** – на практике случаи применения автору не известны ни в советское, ни в настоящее время.
2. **Собственно УПП**, позволяющее, в отличие от первого способа, гибко настраивать условия пуска на конкретном механизме под его уникальные условия.
3. **Частотный преобразователь**. Снижая стартовую частоту до единиц герц, мы, будучи также зажатыми "горбатой" характеристикой зависимости момента от скольжения, можем снизить пусковой ток, потребляемый из сети питания, до значений не выше номинального, даже при пуске под нагрузкой. Подробности пусковых (и не только пусковых) свойств частотных преобразователей – тема отдельной статьи.

## Что не может УПП?

В свою очередь, УПП не может выполнить следующие функции:

- Регулировать частоту вращения двигателя в установившемся режиме;
- Реверсировать направление вращения;
- Увеличить пусковой момент относительно номинального;
- Снизить пусковой ток до значений меньших, чем требуется для вращения ротора в момент старта.



*Рис.1. Характеристики зависимости момента на валу и потребляемого тока от частоты вращения при разных допустимых значениях напряжения питания относительно номинального.*

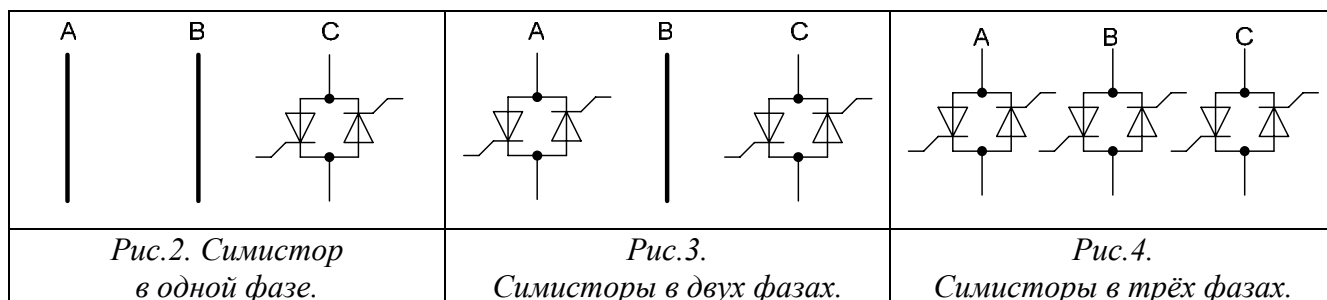
**Очень важно:** ток обмотки в конкретный момент времени при скорости вращения вала меньше синхронной зависит от текущей скорости, а не от механической нагрузки. От последней при пуске зависит, как быстро мы завершим процесс пуска.

## Устройство УПП.

### Силовая часть.

Сердцем силовой части УПП является классический симистор (два встречно-параллельно включенных тиристора с управляющим входом), включаемый последовательно между питающим проводником и обмоткой двигателя. Тиристор отпирается при условии приложения прямого напряжения анод-катод и одновременной подачи отпирающего потенциала или его импульса на управляющий электрод. Запирается тиристор только снижением тока в цепи "анод-катод-нагрузка" до значения, близкого к нулевому. В составе УПП тиристор выполняет роль быстродействующего полупроводникового контактора, включаемого напряжением, а выключаемого током. Отметим, что временной момент запираения при переходе через ноль тока тиристора, через который питается обмотка разгоняемого двигателя, всегда запаздывает относительно момента перехода синусоиды фазного напряжения через ноль из-за индуктивной составляющей. Готовые УПП содержат симисторы, включаемые в

одну, две или все три фазы, причём, при соединении обмоток треугольником, возможно включение симисторов не в фазу питания, а в разрыв обмотки. В этом случае ток через симистор снижается в 1,73 раза и позволяет выбрать менее мощное и более дешёвое УПП, но удваивает число необходимых кабелей (с допустимым током в те же 1,73 раза ниже).



Сравнительные технические характеристики одно-, двух- и трёхфазного регулирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Число регулируемых фаз	Перекоз I и U по фазам	Реализация плавного торможения	Ограничение пускового тока	Включение в разрыв обмоток в "треугольник"	Динамическое торможение	Обязательность входного контактора
1	да	нет	слабо	нет	нет	да
2	да	да	средне	нет	нет	нет
3	нет	да	Только по характеру нагрузки на валу при пуске и торможении	да	возможно	нет

Входной контактор не обязателен только при отсутствии требований к гальванической развязке.

В пользу выбора одно- или двухфазных УПП говорят только более низкая цена в сочетании с возможностью использования в конкретном механизме.

**Однофазное регулирование.** Через нерегулируемые фазы при разгоне двигателя протекает ток, соответствующий скольжению и моменту в конкретный момент времени. Поскольку время разгона больше вследствие плавности характера процесса пуска, тепловой режим нерегулируемой обмотки может оказаться даже хуже, чем при прямом пуске. Следует также отметить, что само по себе однофазное УПП не может аварийно остановить трёхфазный двигатель, максимум, что он может – выдать аварийный сигнал. Таким образом, схема применяется только там, где требуется смягчить пусковые удары в механической нагрузке в диапазоне мощностей до 11 кВт, а плавное торможение, длительный пуск и ограничение пускового тока не требуются. В связи с удешевлением тиристоров однофазные УПП снима-

ются с производства, замещаясь двухфазными, поэтому в настоящей статье более не рассматриваются.

**Двухфазное регулирование.** Есть ограничение пускового тока, но несимметричность его ограничения в момент запуска и торможения также присутствует, так как управление отпиранием тиристора только в двух фазах не позволяет питать все три фазы абсолютно одинаково. Двухфазные УПП выпускаются для двигателей мощностью до 250 кВт и более, применяются в случаях, когда узким местом при запуске является не ограничение тока до гарантированной величины, а, как и для однофазных УПП, смягчение механических ударов. Многие модели снабжены внутренними байпасными контакторами, что удешевляет стоимость решения по запуску одного двигателя или нескольких параллельно подключенных. О роли байпасного контактора речь пойдет ниже.

**Трёхфазное регулирование.** Самое технически совершенное решение, так как позволяет получить симметричное по фазам ограничение тока и силы магнитного поля, поэтому, в сравнении с двухфазным, при том же крутящем моменте силы в момент разгона двигателя, токовый режим максимально благоприятен и для двигателя, и для сети. Технически область применения универсальна, есть возможность применить динамическое торможение и подхват обратного хода мотора, хотя эта функция реализована не во всех моделях УПП. Мощность и напряжение питания двигателя ограничены только тепловой и электрической прочностью самих тиристоров.

#### **Система управления и выставляемые параметры.**

Генерация управляющего сигнала для отпирания симисторов происходит в системе управления, которая в законченном виде (аппаратная + программная части) представляют собой ноу-хау производителя.

На рис.5 схематически показано изменение напряжения в обмотке двигателя при изменении временного промежутка, или, что то же самое, фазового сдвига между прохождением синусоиды входного напряжения через ноль и моментом подачи управляющего сигнала в процессе пуска двигателя. Величина  $\alpha$  называется углом отпирания тиристора и изменяется от значения менее 180 градусов или 10 мс при частоте 50 Гц в начале до нуля в момент выхода на номинальные обороты. При плавном торможении угол отпирания изменяется в обратном порядке.

**Время процесса включения** – это время, за которое система плавного пуска увеличивает напряжение на выходе от начального до полного.

**Время выключения** – это время, за которое напряжение на выходе системы снизится от полного до напряжения остановки (начального напряжения). Если время остановки равно нулю, это будет эквивалентно прямой остановке. Используется, когда необходима плавная остановка мотора, например, при работе с насосами или ленточными конвейерами.

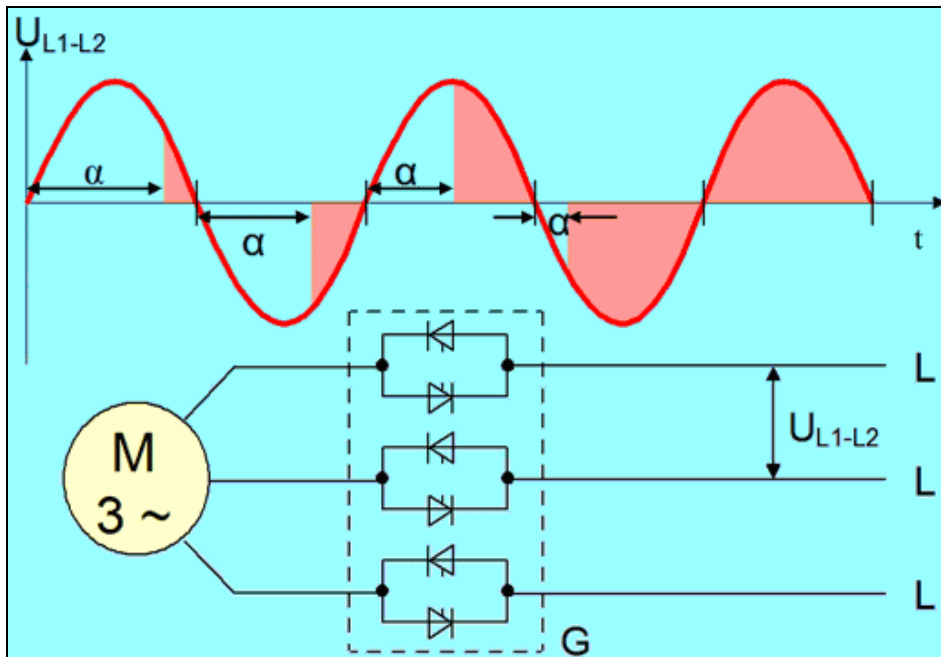


Рис.5. Изменение фазового сдвига входного напряжения.

**Начальное напряжение.** Иногда называется напряжением или крутящим моментом подставки. Это точка, в которой система мягкого пуска начинает или завершает процесс включения или выключения. Применяется для гарантированного трогания вала с места. При начальном напряжении 50% от номинального  $\alpha = 90$  градусов.

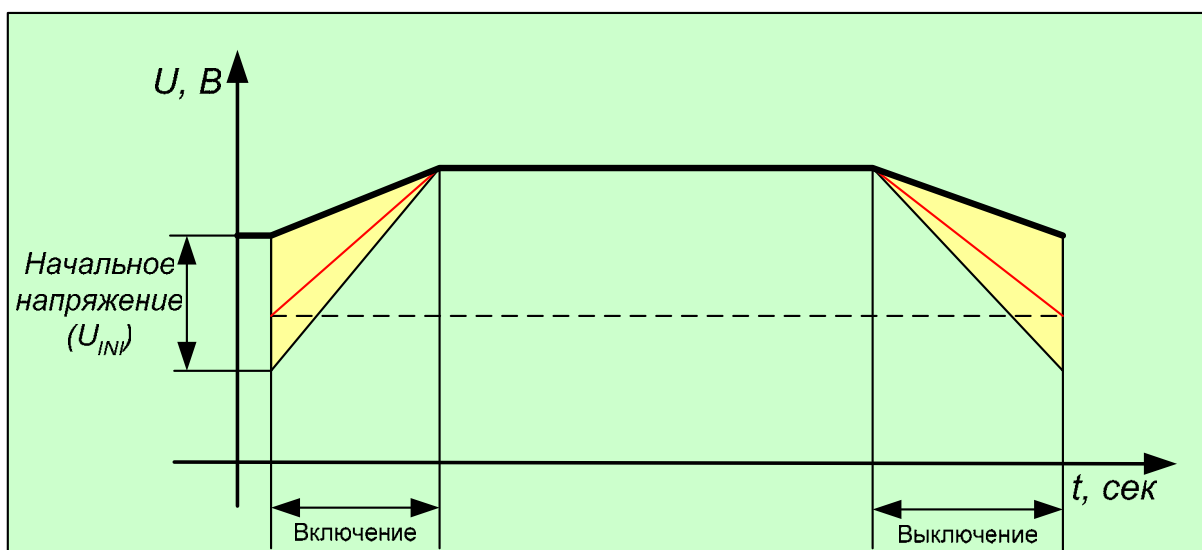


Рис. 6. Полный рабочий цикл двигателя, управляемого УПП.

**Ограничение тока** может использоваться в тех случаях, когда требуется ограничение пускового тока или при пуске под большой нагрузкой, когда трудно обеспечить хороший старт заданием только начального напряжения и времени включения. При достижении предела ограничения тока система плавного пуска временно прекратит увеличение напряжения, пока ток не снизится ниже заданного предела, после чего процесс увеличения напряжения возобновится до достижения полного напряжения. Эта функция имеется не во всех УПП.

**Функция BOOST поддержки напряжения** позволяет получить пусковой момент для преодоления механического трения. Применяется, когда крутящий момент при пониженном

стартовом напряжении недостаточен для трогания вала с места, но основной разгон уже стартовавшего двигателя можно выполнить и от пониженного напряжения. Кривая изменения напряжения на старте показана на рис. 7.

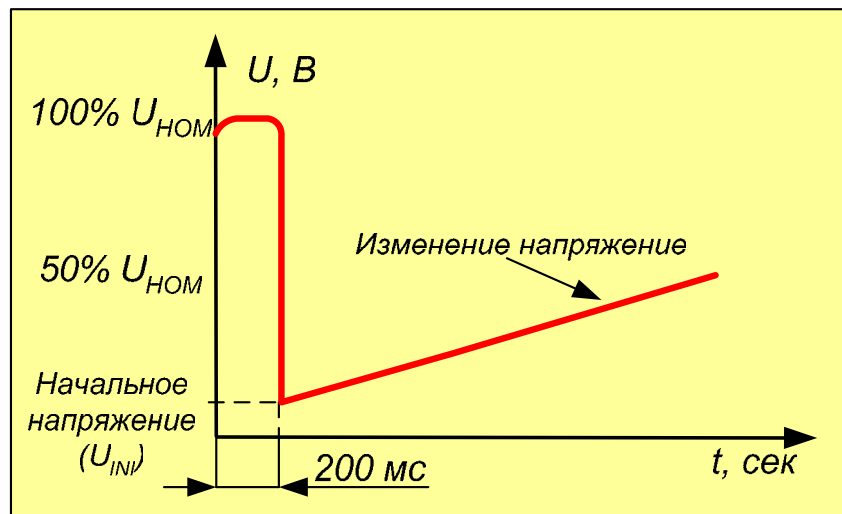


Рис. 7. Приложение начального напряжения BOOST, равного 100% номинального напряжения двигателя.

Возможные применения функции BOOST-дробилки, тестомесы, мясорубки. Первые 0,2 с (10 полных периодов) тиристоры полностью открыты, и двигатель ведёт себя, как и при прямом пуске, и нагружает сеть соответствующим образом. Такая короткая по времени просадка в сети обычно не вызывает аварийных остановок других механизмов. Эта функция также имеется не во всех УПП.

Простейшие двухфазные УПП с плавным торможением на токи до 32 А собираются в пластиковом корпусе с креплением на 35 мм DIN-рейку. На передней панели находятся регулировки времени пуска, времени торможения и начального напряжения, винты клемм питания, выхода на двигатель, логических входов для подключения кнопок "Пуск" и "Стоп" и, при наличии, BOOST, и выходы сигналов ошибки и завершения процесса разгона. Более функционально продвинутые УПП позволяют устанавливать настройки и управлять процессом с интерактивной передней панели или по сетевому протоколу, реализуя, например, смену режимов пуска или последовательный запуск двигателей разной мощности.

#### **Электромагнитная совместимость.**

Хотя процесс отпирания тиристора происходит лавинообразно, индуктивная составляющая сопротивления обмотки ограничивает скорость нарастания тока при включении, а выключение происходит в момент снижения тока до нуля. Специальные дроссели и фильтры ЭМС на практике не применяются. Уровень помех во всём спектре частот на порядки ниже, чем у частотного преобразователя той же мощности без дросселей и фильтров ЭМС.

## Байпасный контактор.

Байпасный (обходной) контактор (БК) служит для питания двигателя в установившемся режиме, минуя тиристоры и, таким образом, облегчая их тепловой режим. Выбирается по категории АС-1, так как пусковые токи стандартного прямого включения через него не протекают. Многие двухфазные УПП имеют встроенный БК.

### Каскадное включение при пуске и торможении нескольких двигателей.

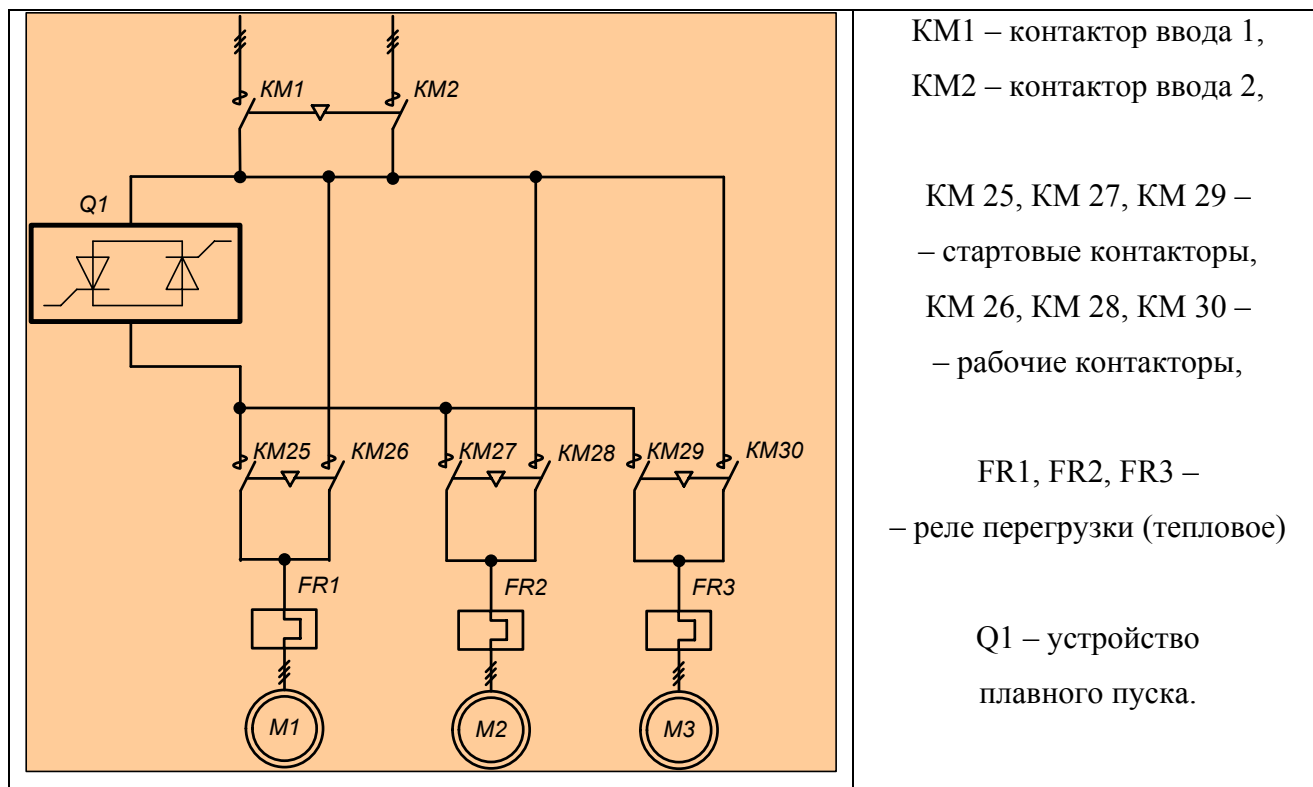


Рис. 8. Последовательный пуск электродвигателей с помощью системы плавного пуска.

Все двигатели одной мощности, УПП выбирается из соображений мощность/продолжительность включения/температура в месте установки.

Рассмотрим рабочий цикл привода каскадного механизма. Привод готов к пуску – КМ1 замкнут (остальные разомкнуты). Все контакторы в штатных режимах работают по категории АС-1 при условии гарантированной краткой выдержки времени между окончанием процесса замыкания стартовых контакторов и началом подачи импульсов отпирания на тиристоры. Для реализации аварийной защиты, например, от теплового пробоя тиристоров во время затянувшегося пуска, стартовые контакторы всё же целесообразно выбирать по АС-3, а для резервирования возможности прямого пуска в случае выхода из строя УПП – и рабочие контакторы тоже.

При использовании в управлении приводом простейшего микроконтроллера или программируемого реле с часами и счётчиками можно следить за моторесурсом каждого двигателя и, например, автоматически подключать в первую очередь самый «свежий» и выключать самый «уставший».

Таблица 2

Состояние двигателей			Замкнутость контакторов					
M1	M2	M3	KM25	KM26	KM27	KM28	KM29	KM30
запуск	остановлен	остановлен	+	-	-	-	-	-
работа	остановлен	остановлен	-	+	-	-	-	-
работа	запуск	остановлен	-	+	+	-	-	-
работа	работа	остановлен	-	+	-	+	-	-
работа	работа	запуск	-	+	-	+	+	-
работа	работа	работа	-	+	-	+	-	+
работа	работа	торможение	-	+	-	+	+	-
работа	торможение	остановлен	-	+	+	-	-	-
торможение	остановлен	остановлен	+	-	-	-	-	-
остановлен	остановлен	остановлен	-	-	-	-	-	-

Плавное торможение в насосных агрегатах необходимо, поскольку остановка одного из насосов на выбеге двигателя приводит примерно к такому же резкому перепаду давления, как и прямой пуск.

В каскадной системе, как это видно из схемы, роль байпасного контактора выполняют рабочие контакторы.

#### **Типовые проблемы эксплуатации УПП и способы их решения.**

Наиболее дорогие в плане восстановления устройства, потенциально подверженные поломкам вследствие ошибок (см. [1]):

- Силовой трансформатор питания сети с УПП;
- Собственно УПП;
- Двигатели;
- Механические части нагрузки (редукторы и исполнительные органы).

#### **Проектирование: выбор УПП, схема включения.**

Ведущие мировые производители предлагают компьютерные программные средства, помогающие выбрать и УПП, и сопутствующие элементы схемы привода.

В идеальном случае, ограниченном только физическими принципами работы силовой части, УПП должно создавать плавно возрастающее по значению, начиная от стартового, круговое по форме магнитное поле, вращающееся со скоростью, заданной частотой питающей сети. Для этого тиристоры должны стоять во всех трёх фазах.

При эксплуатации привода в установившемся режиме без БК ток в обмотки продолжает поступать через тиристоры УПП. Последствия включения без БК для двигателей и



трансформаторов подробно описаны в [1, 2]. Последствия для УПП – только более тяжёлый тепловой режим. Корень всех минусов – в физических свойствах реальных тиристоров и погрешностях работы генератора отпирающих импульсов. Постоянная составляющая как следствие несимметричности полуволн тока, протекающего по цепи "вторичная обмотка трансформатора – тиристоры УПП – обмотка двигателя" возникает как совокупность следующих факторов: запираение тиристора происходит при некотором остаточном значении тока:

- между моментом подачи отпирающего импульса на управляющий электрод и моментом начала
- протекания тока проходит время, называемое временем включения тиристора;
- не существует ни двух, ни тем более шести тиристоров, у которых эти 2 параметра точно совпадают;
- при появлении в сети мощной помехи могут происходить сбои в синхронизации тактового генератора.

Как показывают элементарные расчёты, в случае, описанном в [1], уровень постоянной составляющей тока по фазам при  $U = 0,4$  кВ составил не более 2% номинального для двигателя и менее 1% номинального для трансформатора. При всей кажущейся незначительности относительных величин, результаты не врут. Дешевле добавить в схему один контактор, чем ремонтировать двигатель, менять трансформатор мощностью в сотни и тысячи кВА и терпеть убытки от простоя оборудования.

### Пусконаладочное параметрирование УПП.

Как уже было отмечено ранее, простейшее УПП в настройке ненамного сложнее, чем тепловое реле защиты двигателя. Ниже приведены ориентировочные настройки УПП для различных механизмов.

Таблица 3

Параметры настройки систем плавного пуска при использовании функции ограничения тока

Вид нагрузки	Время процесса старта (сек)	Время процесса старта (сек)	Нач. напряжение $U_{INI}$	Ограничение тока ( $\times I_C$ )
Поворотный механизм	10	0	30%	3
Центробежный вентилятор	10	0	30%	4
Центробежный насос	10	20	30%	3,5
Центрифуга	10	0	40%	4,5
Ленточный конвейер	10	0	40%	4
Дробилка	10	0	60%	5
Эскалатор	10	0	30%	3,5
Тепловой насос	10	20	30%	3,5
Гидронасос	10	0	30%	3,5
Подъемник	10	10	60%	4
Мельница	10	0	60%	5
Поршневой компрессор	10	0	30%	4

Вид нагрузки	Время процесса старта (сек)	Время процесса старта (сек)	Нач. напряжение $U_{INI}$	Ограничения тока ( $\times I_C$ )
Вращающийся конвертер	10	0	30%	3
Скрепер	10	10	40%	4,5
Турбинный компрессор	10	0	40%	4
Шнековый конвейер	10	10	40%	4
Смеситель, миксер	10	0	60%	5
Ненагруженный мотор	10	0	30%	2,5

В таблице не учтена возможность включения функции *BOOST*.

Крутящий момент мотора будет уменьшаться пропорционально квадрату напряжения и, если начальное напряжение задано слишком малым, например 20%, стартовый крутящий момент будет равен только  $0,2^2 = 0,04 = 4\%$ , и мотор не начнет вращаться в самом начале процесса включения.

Поэтому очень важно находить такой уровень, при котором мотор начнет сразу работать, чтобы избежать ненужного перегрева. При завышенном начальном уровне пусковой ток и момент будут слишком мало отличаться от значений при прямом пуске.

Время включения не должно быть слишком большим, поскольку это приведет только к ненужному перегреву мотора и срабатыванию защитного реле. Если мотор не нагружен, время пуска мотора окажется меньше заданного, а если мотор сильно нагружен, то больше.

#### **Выводы.**

Тиристорный УПП, если мы жёстко завязаны на имеющийся асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, не дающий возможности переключать обмотки со звезды на треугольник на ходу, является самым массовым устройством для решения многих проблем, возникающих при прямом пуске.

При выборе решений по плавному пуску и торможению в механизмах, приводимых двигателями мощностью от десятков кВт и выше, необходимо стартовать от следующего:

- УПП должно иметь 3-фазное регулирование;
- При подключении к одному или параллельно соединённым нескольким двигателям, запускаемым синхронно, БК обязателен;
- При многодвигательном приводе на общую механическую нагрузку с отдельным пуском каждого двигателя (например, насосные станции) разумно использовать каскадный последовательный запуск/торможение;
- Имеющиеся механические охлостители нагрузки (например, байпасные трубопроводы в насосах и компрессорах) целесообразно оставить.

## Литература

1. Петухов В.С., Соколов В.А. Повреждения трансформаторов и электродвигателей. Причина - в системе плавного пуска // Новости ЭлектроТехники. - 2005. - № 2(32).
2. Соркин М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы// Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 2(32).
3. Schneider Electric. Устройства плавного пуска и торможения Altistart 48. Каталог 2002. ART. 011237RU.
4. ABB. Системы плавного пуска. Учебное пособие. Февраль 2003.
5. Siemens. SIRIUS 3RW. Устройства плавного пуска. Презентация. Февраль 2005.
6. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. М., Энергия, 1980. – 360 с., ил.
7. Лотоцкий К. В. Электрические машины и основы электропривода. М., Колос, 1964. – 495 с., ил.

*Автор: Юрий Бобылев*

*Редакция: Дмитрий Парфентьев*