

Устройство Плавного Пуска.

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 исполняет 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).

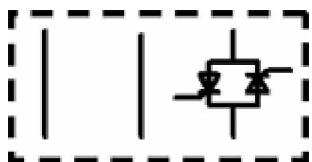


Рис.2. Симистор в одной фазе.



Рис.3. Симисторы в двух фазах.

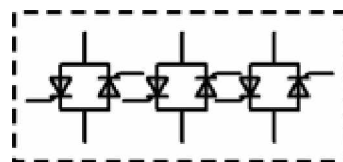


Рис.4. Симисторы в трёх фазах.

Не перегружая статью расчётами и формулами, кратко сравним важные потребительские технические характеристики одно-, двух- и трёхфазного регулирования.

| Число регулируемых фаз | Перекося 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 |

Табл.1.

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 снимаются 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 пойдёт 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.

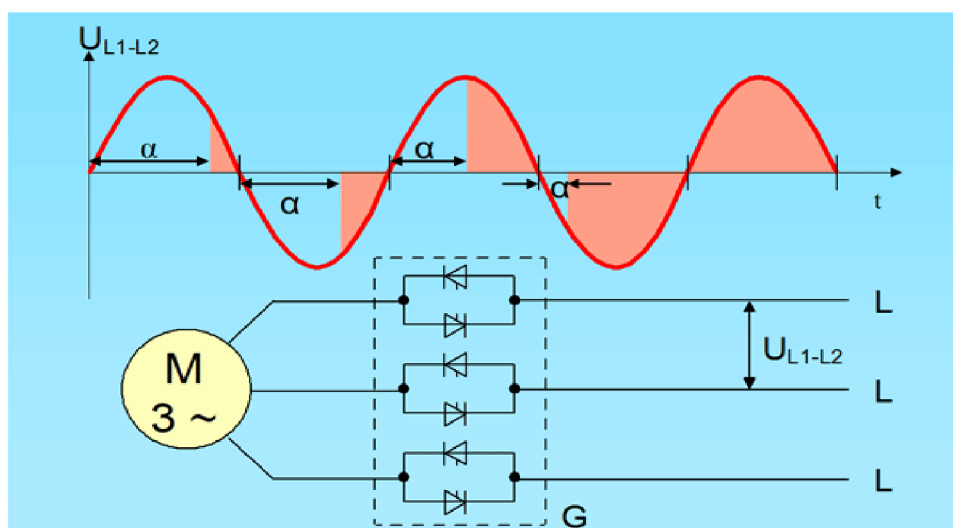


Рис.5.

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 α 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 увеличит 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.

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.

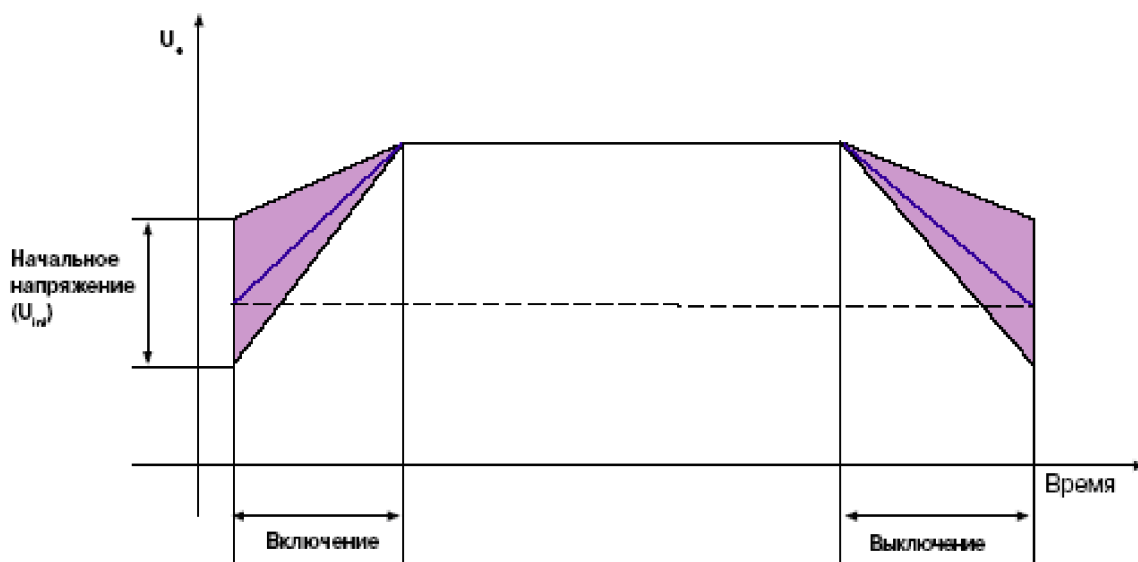
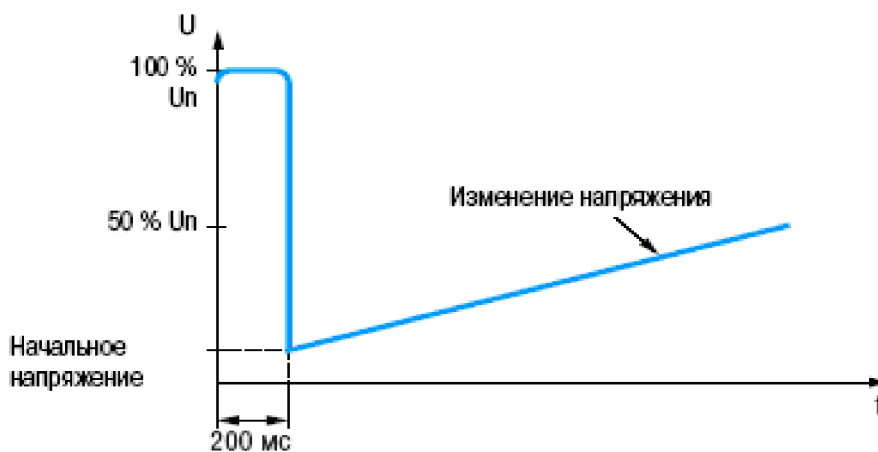


Рис. 6. Полный рабочий цикл двигателя, управляемого УПП.

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.



Приложение начального напряжения BOOST, равного 100 % номинального напряжения двигателя

Рис. 7.

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.

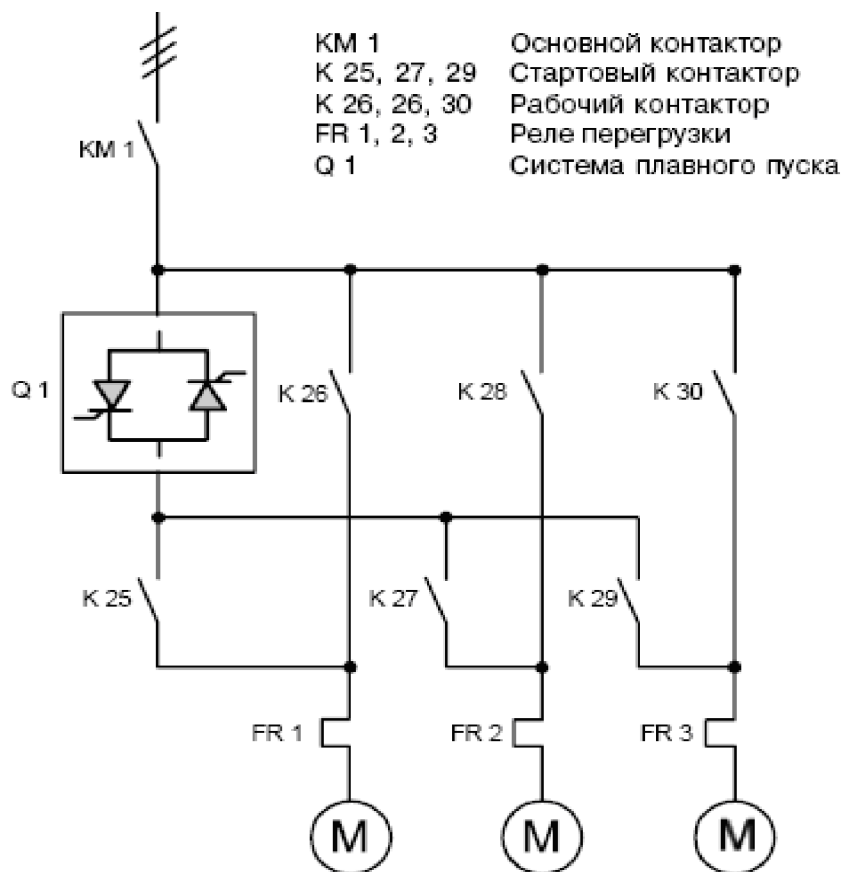
Электромагнитная совместимость.

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.



Последовательный пуск моторов с помощью системы плавного пуска

Рис. 8.

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 - KM1 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.

| Состояние двигателей | | | Замкнутость контакторов | | | | | |
|----------------------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| M1 | M2 | M3 | K25 | K26 | K27 | K28 | K29 | K30 |
| 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 | - | - | - | - | - | - |

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".

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 БК выполняют рабочие контакторы.

Параметры настройки систем плавного пуска при использовании функции ограничения тока

| Вид нагрузки | Время процесса старта (сек.) | Время процесса остановки (сек.) | Нач. напряжение U_{ini} | Огранич. тока ($\times I_e$) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Поворотный механизм | 10 | 0 | 30 % | 3 |
| Центр. вентилятор | 10 | 0 | 30 % | 4 |
| Центробежный насос | 10 | 20 | 30 % | 3,5 |
| Центрифуга | 10 | 0 | 40 % | 4,5 |
| Ленточный конвейер | 10 | 0 ¹⁾ | 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 |
| Подъемники | 10 | 10 | 60 % | 4 |
| Мельница | 10 | 0 | 60 % | 5 |
| Поршн. компрессор | 10 | 0 | 30 % | 4 |
| Вращ. 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 |

1) При работе с хрупкими материалами, задавайте равным 10 секундам.

Табл. 9.

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.**

**Корпорация «СКИФ»
58009, Украина, г.Черновцы ул.Череповецкая 17
тел. +38 (03722) 6-19-67; 6-19-68
тел/факс +38 (03722) 6-19-66
E-mail: skif@sacura.net
www.skifcorp.com.ua**