

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В данном документе проводится сопоставление различных вариантов оборудования для целей пуска. На основе сопоставления этих вариантов показано, что только использование частотно-регулируемого электропривода радикально решает проблемы пуска.

Сопоставление проводится по общим соображениям и по результатам моделирования процессов при конкретных параметрах синхронного электропривода турбокомпрессора.

Приняты данные синхронного двигателя СТД-3150-2УХЛ4, 3.15 МВт, 3000 об/мин, 50 Гц, 6 кВ, 354 А, возбуждение 89 В, 262 А, кратность пускового тока 6.5, кратность пускового момента 1.85, момент инерции ротора 65 кг*м². Суммарный момент инерции агрегата принят $J = 90 \text{ кг*м}^2$.

Все переменные и параметры, кроме времени и постоянных времени, рассматриваются далее как относительные величины при базовых значениях указанного двигателя. При таком представлении результаты имеют достаточно универсальный характер и применимы вообще для синхронных турбоприводов большой мощности.

1. ПРОБЛЕМЫ ПРИ ПРЯМОМ АСИНХРОННОМ ПУСКЕ

Результаты моделирования представлены на рис. 1. На рис. 2 показано самое начало процессов – первый период напряжения питающей сети.

Показаны следующие переменные: v - скорость, M – электромагнитный момент двигателя, i_s - модуль изображающего вектора токов статора (огибающая фазных токов), i_f – ток возбуждения, i_{sA} – ток одной из фаз статора, $h_{sA} = \omega_L * pi_{sA}$ – переменная, пропорциональная производной тока по времени (эта переменная определяет отклонение напряжения в узле нагрузки, от которого питается электропривод).

Важно отметить количественные показатели процессов:

- Амплитуда знакопеременной составляющей момента в начале пуска достигает значения $M_{p,max} \approx 3$, - примерно 4-кратного значения по отношению к номинальному моменту; частота для этой составляющей - 50 гц;
- Темп изменения момента достигает значения $dM/dt \approx 750 \text{ 1/с}$;
- Модуль изображающего вектора токов статора и фазный ток статора в самом начале процесса достигают значения $I_{s,max} \approx 12.5$, и только затем происходит снижение до установившегося пускового тока $I_{s,dst} \approx 6.5$.
- В процессе пуска имеют место значительные колебания момента, особенно значительные при приближении к синхронной скорости; амплитуда колебаний момента достигает $M_{pm} \approx 1$ (120 % номинального момента); частота колебаний снижается по мере приближения к синхронной скорости.
- Переменная, определяющая отклонение напряжения в узле нагрузки, достигает значения $H_{max} \approx 8$.

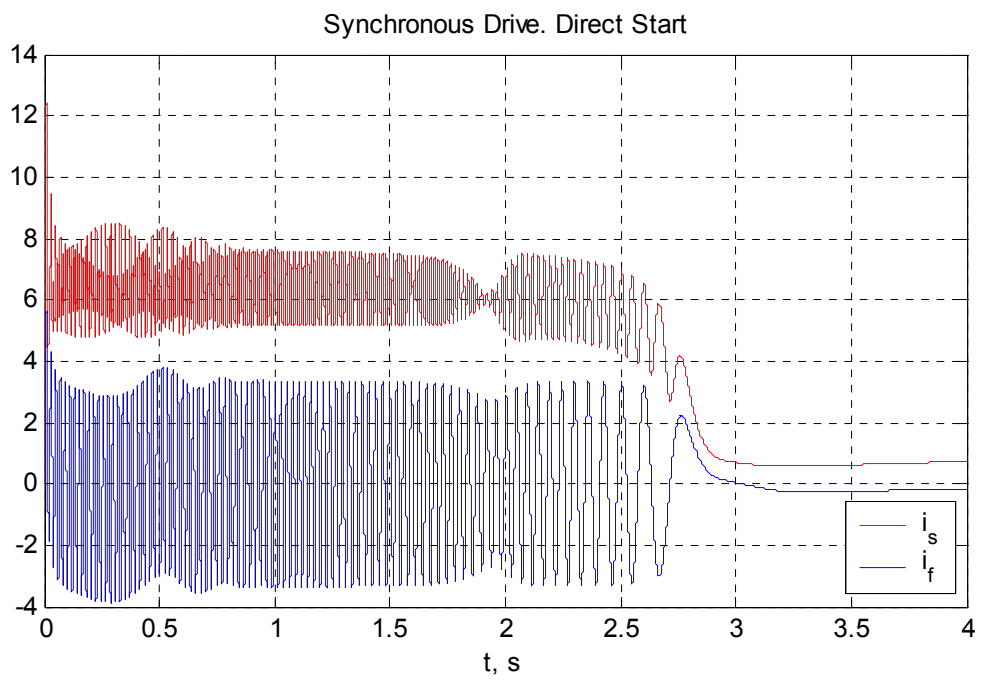
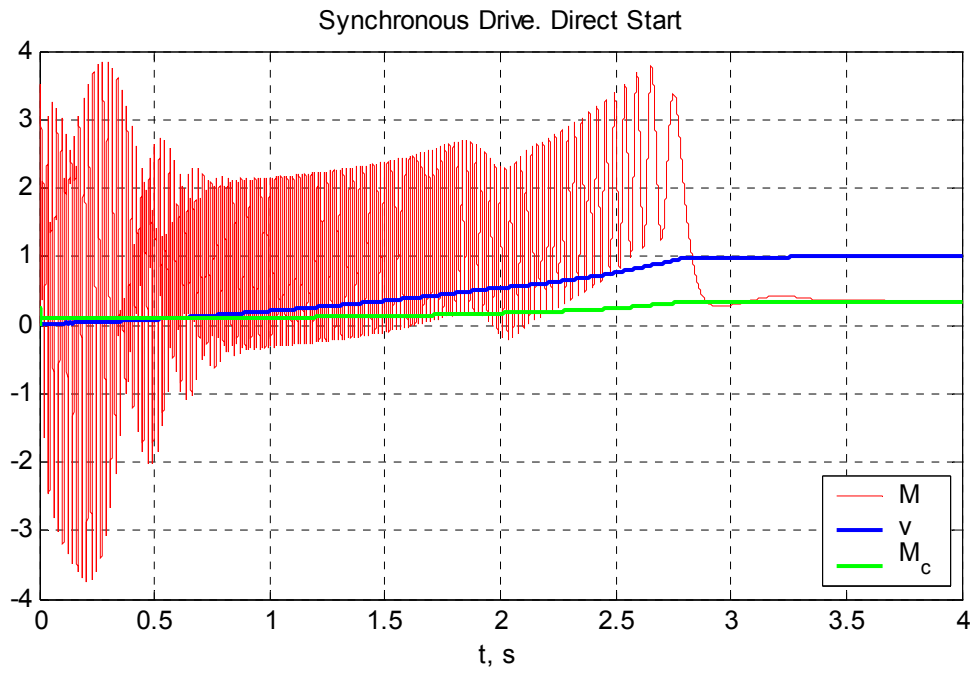


Рис. 1

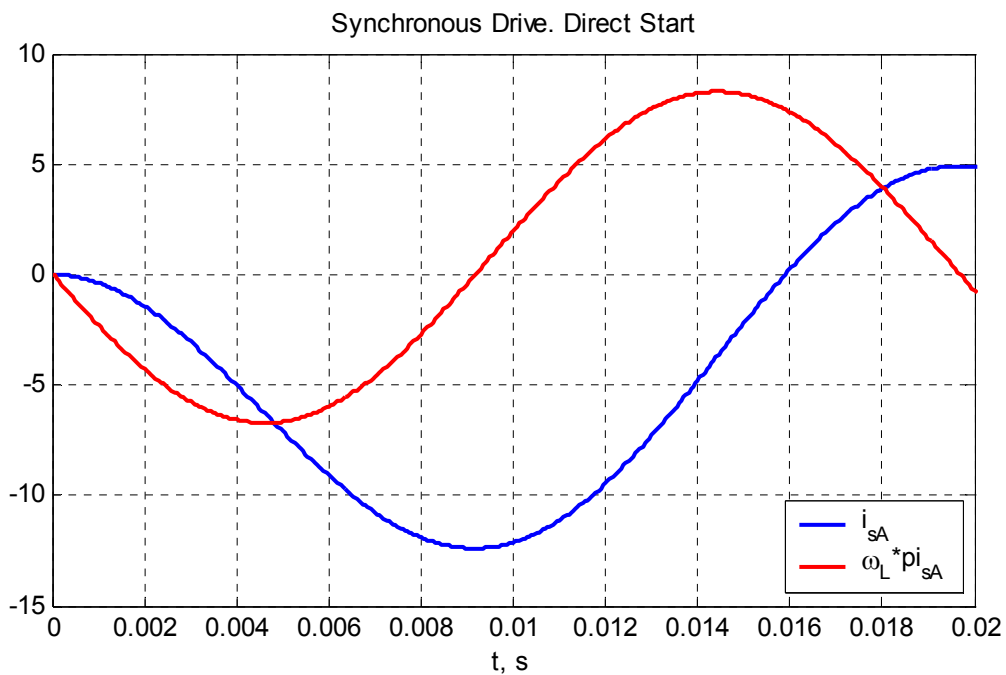
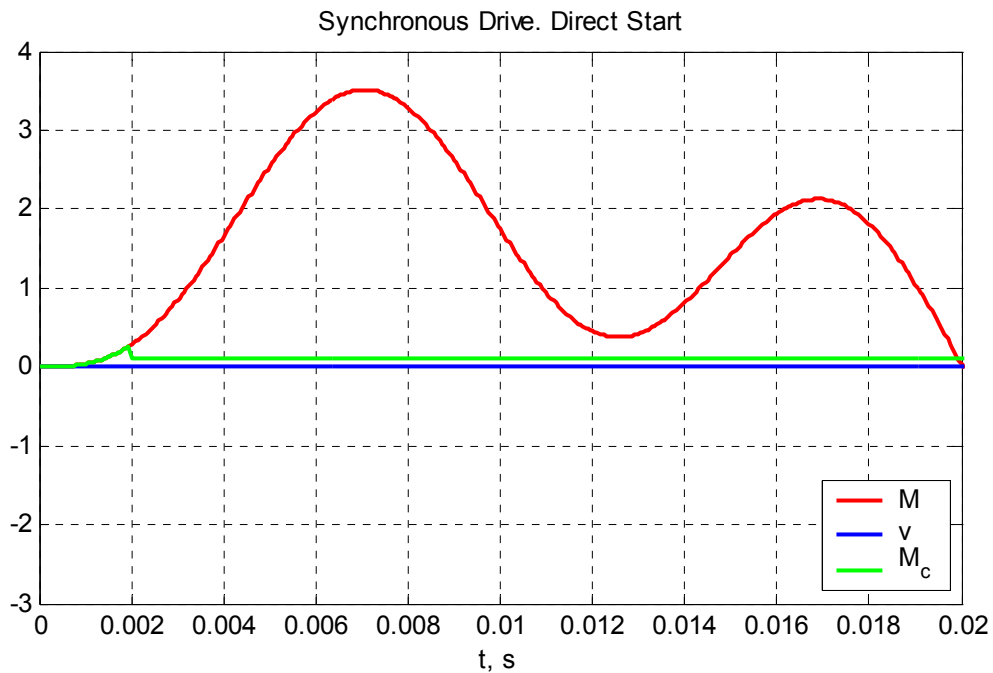


Рис.2

Очень значительный ударный момент и, особенно, высокий темп изменения момента являются важнейшими факторами, влияющими на прочность и надёжность двигателя и механизма. Дополнительное разрушающее воздействие на механическую часть оказывают низкочастотные колебания момента на завершающей стадии пуска.

Ударный ток определяет огромное усилие, вдавливающее проводники статора в пазы; он является важнейшим фактором, влияющим на срок службы обмоток двигателя.

Высокое максимальное значение H_{\max} определяет значительное отклонение напряжения в узле нагрузки, от которого питается электропривод.

Пусть $u_{L0A}(t)$ – фазное напряжение в узле нагрузки при нулевом токе рассматриваемого электропривода. При наличии тока напряжение можно представить в виде $u_{LA}(t) = u_{L0A}(t) - \Delta u_{LA}(t)$. Отклонение напряжения (в относительных величинах):

$$\Delta u_{LA} \approx L_L h_{sA},$$

где L_L – относительное значение эквивалентной индуктивности питающей сети

Например, если рассматриваемый электропривод питается от узла нагрузки с током к.з. $I_{sc} = 8 \text{ кА}$, относительная индуктивность сети составит

$$L_L \approx 354/8000 = 0.044;$$

максимальное отклонение мгновенного напряжения при прямом пуске составит

$$\Delta U_{L.\max} = 0.044 * 8 = 0.35.$$

Это – весьма значительное отклонение. Понятно, что при таком отклонении максимальные значения пускового тока и переменной h уменьшены по сравнению с рассмотренным идеальным случаем. Но при этом, тем не менее, посадка напряжения оказывается недопустимой для многих смежных электроприёмников, особенности, для регулируемых электроприводов.

2. ТИРИСТОРНОЕ УСТРОЙСТВО ПЛАВНОГО ПУСКА

Упрощенная схема главных цепей показана на рис. 3.

Сдвиг по фазе открывающих импульсов тиристоров позволяет плавно регулировать полезную составляющую линейных напряжений. В конце пуска тиристоры полностью открыты. Синхронная машина переключается на сеть и подаётся возбуждение.

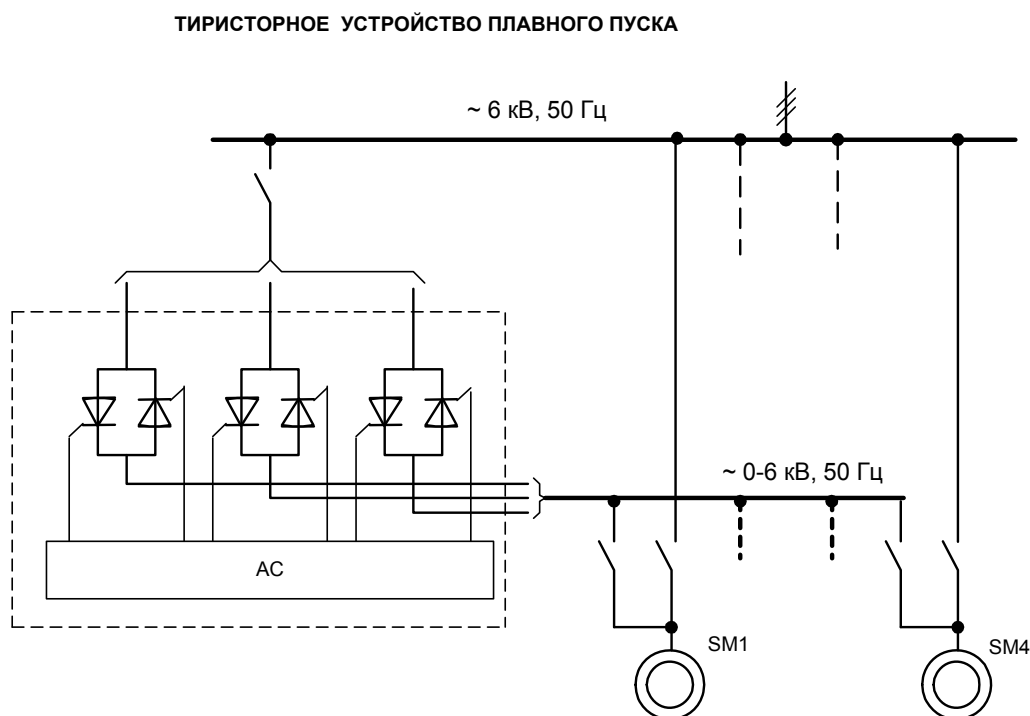


Рис. 3

Процессы при плавном асинхронном пуске показаны на рис. 4.

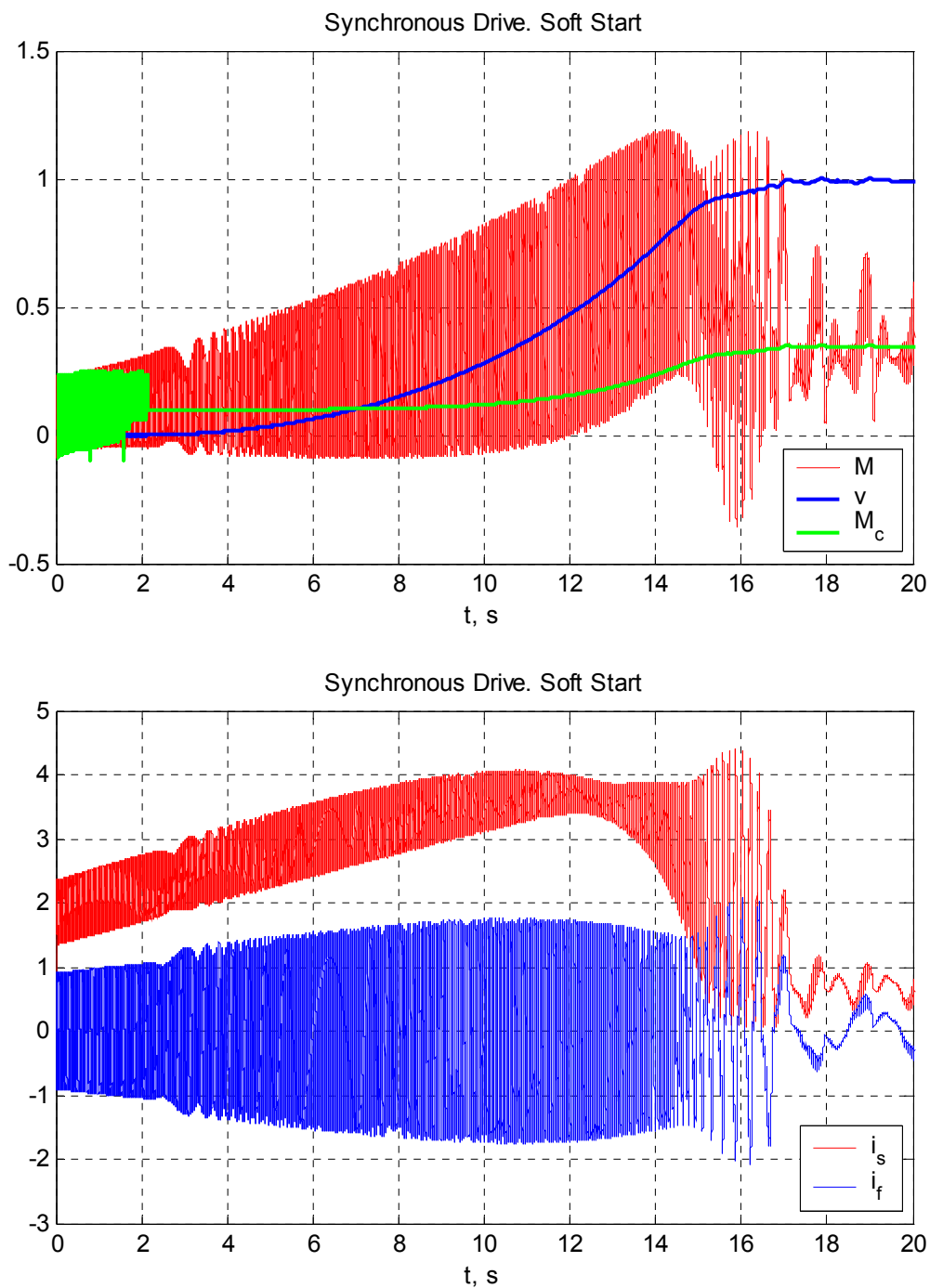


Рис. 4

По сравнению с прямым пуском при плавном пуске исключаются колебания момента большой амплитуды при стоящем двигателе, исключается ударный ток в момент включения.

Однако не исключаются значительные колебания момента при подходе к синхронной скорости.

В отношении воздействия на питающую сеть плавный пуск не даёт существенного эффекта по сравнению с прямым пуском - амплитуда фазных токов в процессе пуска – примерно 4-кратная по отношению к амплитуде номинального тока. Форма токов,

потребляемых от сети на этапе нарастания выходного напряжения, существенно несинусоидальна. На рис. 5, 6 показаны процессы для двух периодов питающего напряжения в процессе пуска.

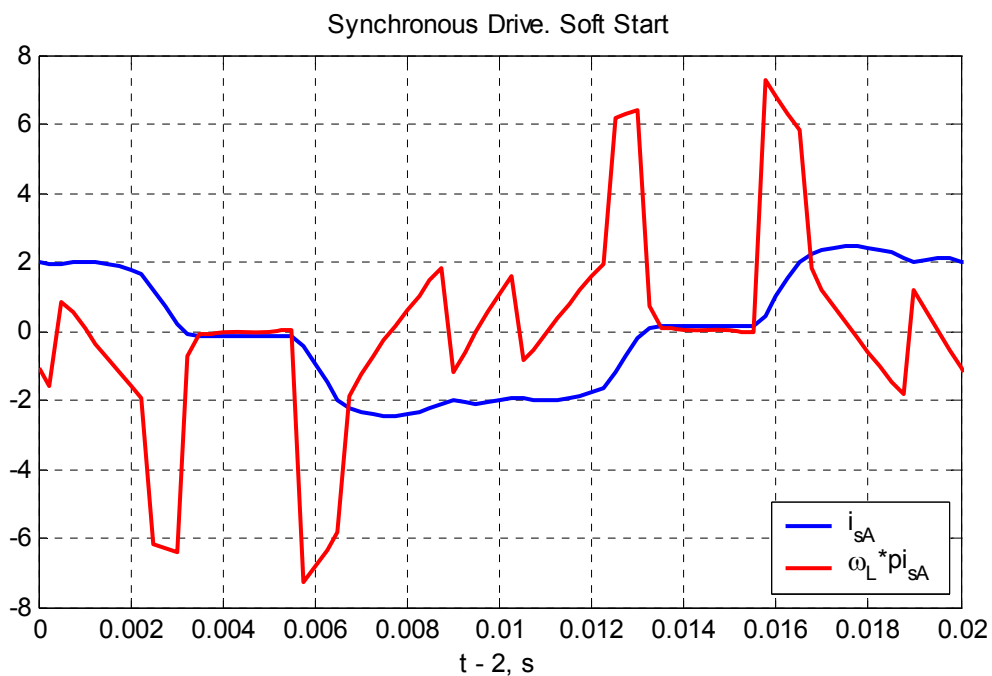


Рис. 5

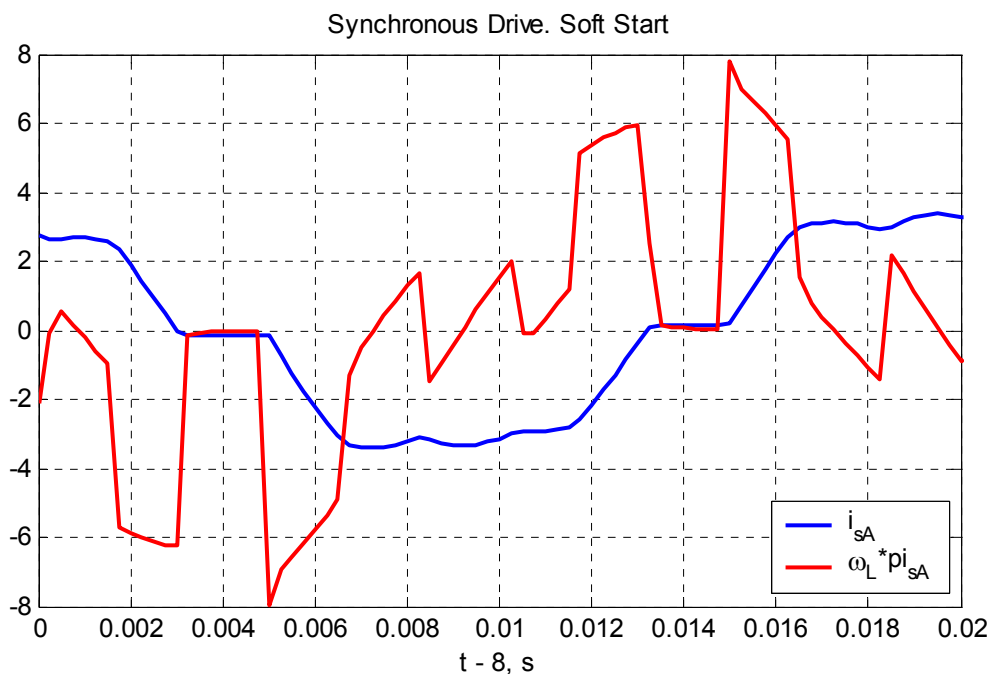


Рис. 6

Максимальное значение $H_{\max} \approx 8$ – примерно такое же, как при прямом пуске.

Отклонение и искажение напряжения в узле нагрузки, вероятнее всего, выйдет из допустимых пределов.

3. ПУСК В РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ 1557S ИЛИ POWERFLEX 7000

Функциональная схема показана на рис. 7.

РЕГУЛИРУЕМЫЙ СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД (УСТРОЙСТВО ЧАСТОТНОГО ПУСКА)

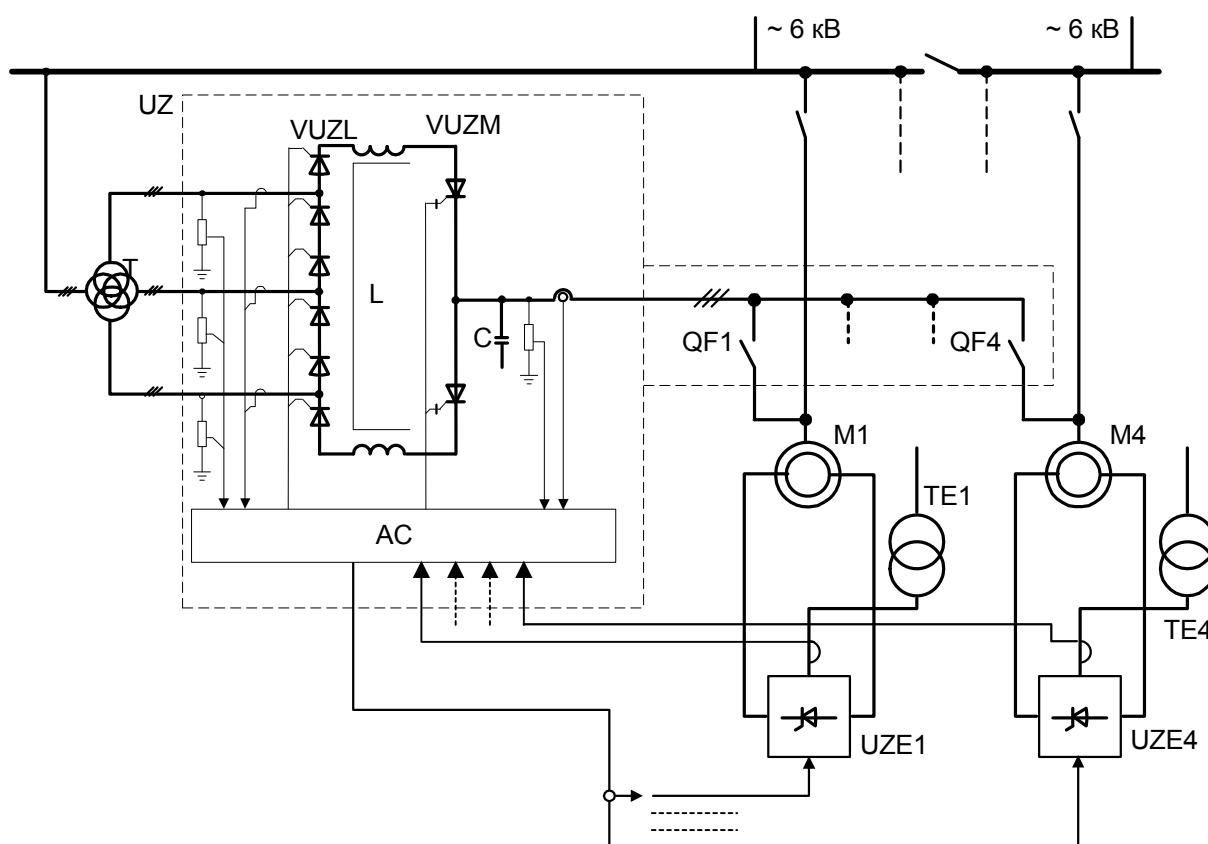


Рис. 7. $M1-M4$ – двигатели, $UZE1-UZE4$ – возбуждители двигателей, T – трансформатор, UZ – преобразовательно-регулирующее устройство, $VUZL$ – выпрямитель, $VUZM$ – инвертор, C – конденсаторная батарея фильтра, L – сглаживающий реактор, AC – микропроцессорное устройство автоматического управления электроприводом

Выпрямитель $VUZL$ управляется таким образом, что через реактор и инвертор проходит необходимый выпрямленный ток, пропорциональный необходимой амплитуде полезной составляющей выходных токов инвертора. Инвертор $VUZM$ работает с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Он переключает выпрямленный ток между фазами; каждый из выходных токов инвертора представляет собой двуполярную пачку импульсов. Высокочастотные составляющие этих пачек проходят в конденсаторную батарею C , а полезные составляющие – в статор двигателя. Управление инвертора обеспечивает необходимую частоту и фазы полезных составляющих токов.

При пуске синхронного двигателя предварительно подаётся ток возбуждения. С самого начала двигатель работает как синхронный. Частота токов статора плавно нарастает от нулевой до номинальной. Амплитуды токов автоматически регулируются таким образом, что поддерживается заданное ускорение.

Процессы пуска представлены на рис. 8.

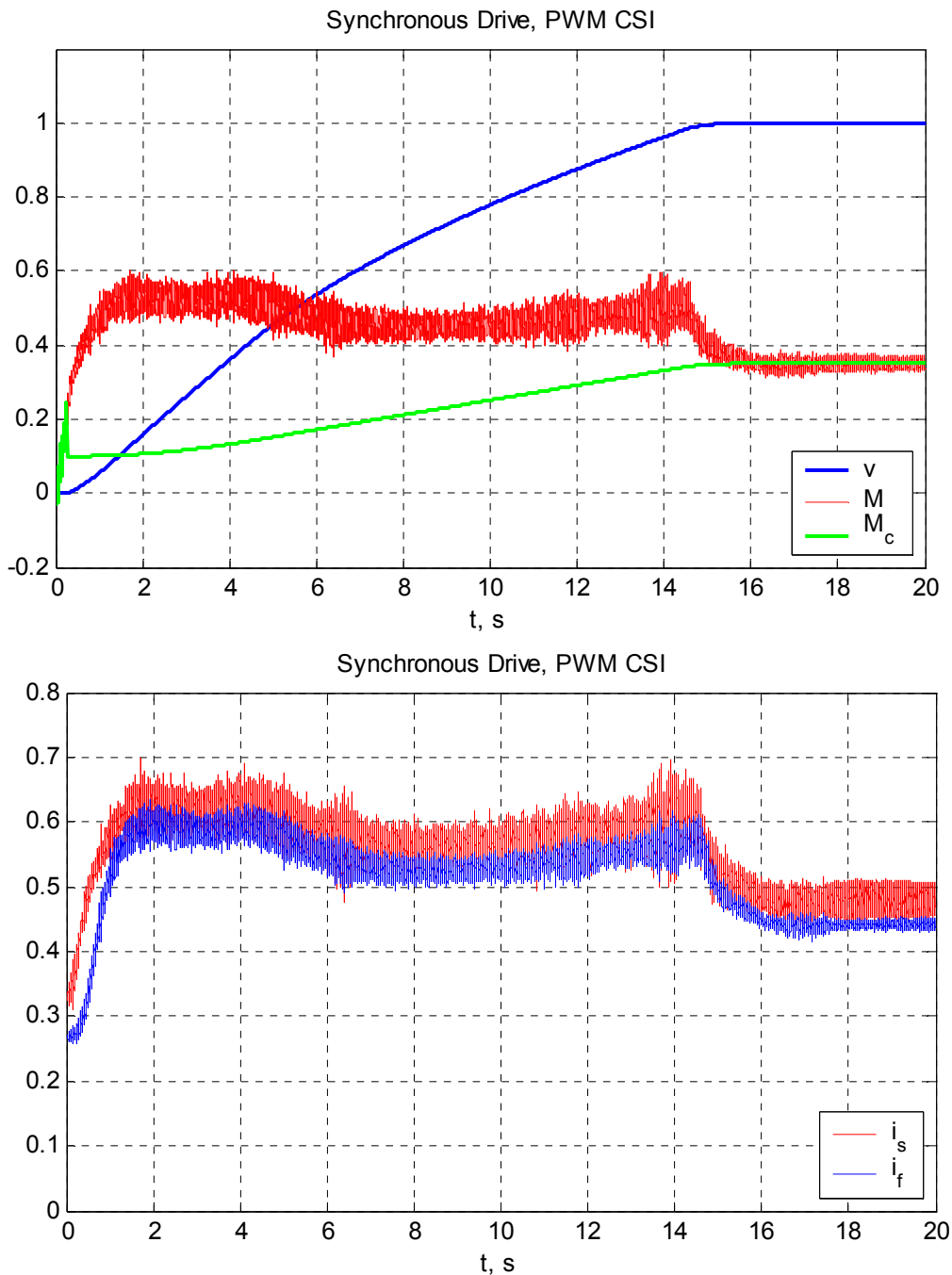


Рис. 8

По сравнению с прямым пуском регулируемый электропривод при рассмотренных параметрах обеспечивает:

- уменьшение пускового тока от 6.5-кратного до 0.65 по отношению к номинальному;

- устранение первоначального удара тока статора (примерно 12-кратной амплитуды номинального тока); максимальное усилие, воздействующее на изоляцию проводников статора, уменьшается более чем в 100 раз;
- устранение пульсаций момента на начальной стадии пуска (с амплитудой порядка 4-кратной по отношению к номинальному моменту);
- уменьшение темпа изменения момента примерно в 1000 раз;
- снятие ограничений по числу пусков;
- устранение неблагоприятного воздействия на питающую сеть – кратность максимального тока, потребляемого ПЧ от сети, примерно равна кратности максимального тока статора.

Следует отметить также, что по сравнению с ранее рассмотренными вариантами пуск в регулируемом электроприводе 1557S или PowerFlex 7000 обеспечивает значительно меньшее искажение напряжения в сети. Форма первичного тока, показанная на рис. 9, весьма мало отличается от синусоидальной.

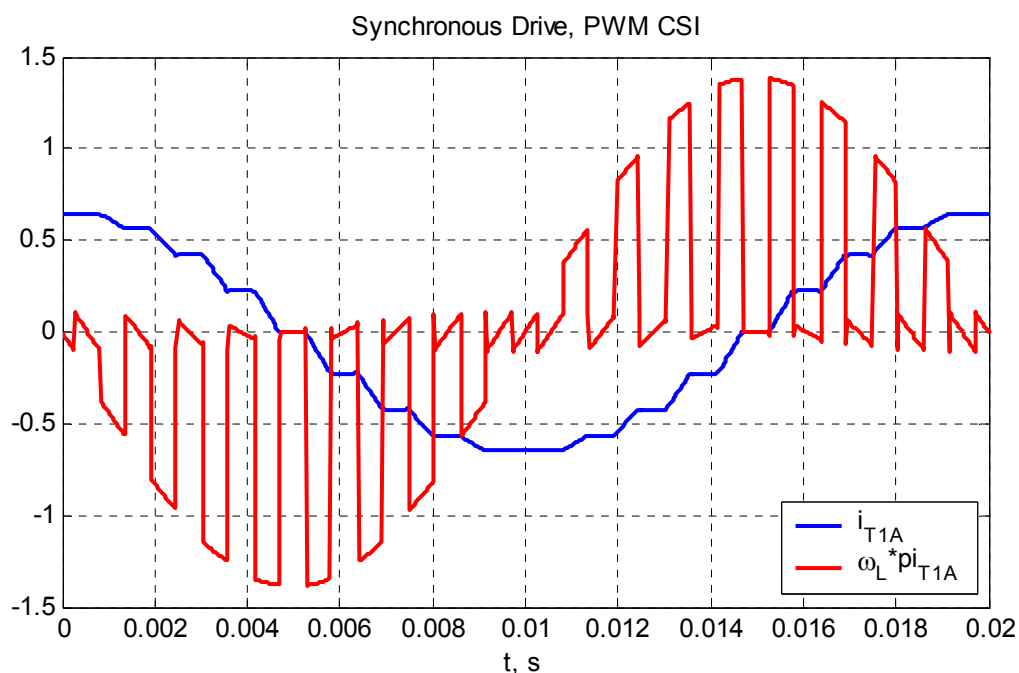


Рис. 9

Максимальное значение $H_{\max} \approx 1.5$, это в 5 раз меньше, чем при прямом пуске или с устройством плавного пуска. Соответственно и отклонение мгновенного напряжения уменьшено в таком же соотношении. Для рассмотренного примера с током короткого замыкания в узле нагрузки $I_{sc} = 8$ кА максимальное отклонение мгновенного напряжения составит всего лишь $\Delta U_{L,\max} \approx 0.07$. Такое отклонение заведомо приемлемо для любых смежных электроприёмников.

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВАРИАНТОВ ПУСКА

В приведенной ниже таблице неблагоприятные показатели для плавного пуска и для частотного пуска сопоставлены с показателями для прямого пуска, причём показатели прямого пуска приняты за 1.

Показатели	Прямой пуск	Плавный пуск	Пуск в регулируемом электроприводе
Максимальное значение тока статора.	1	0.38	0.06
Нагрев обмоток двигателя за время пуска	1	1	0.1
Максимальное значение электромагнитного момента	1	0.34	0.17
Амплитуда низкочастотных колебаний момента	1	0.6	0
Максимальное отклонение мгновенного напряжения в узле нагрузки	1	1	0.19

5. ВЫВОДЫ

1. Использование устройства плавного асинхронного пуска для рассматриваемого класса электроприводов частично снижает ударные нагрузки механо- и электрооборудования. Однако оно не устраняет низкочастотных колебаний момента в зоне подсинхронных скоростей.
2. Использование плавного асинхронного пуска для данного электропривода не устраняет неблагоприятное воздействие пускового тока на питающую сеть.
3. Устройство плавного пуска не обеспечивает даже кратковременной работы электропривода на пониженной скорости для выполнения ремонтных или технологических операций.
4. Данное сопоставление показывает, что радикальное решение задачи пуска мощного синхронного электропривода турбокомпрессора обеспечивается только при использовании частотно-регулируемого электропривода. Это решение устраняет все неблагоприятные факторы в отношении условий работы механо- и электрооборудования, устраняет неблагоприятное воздействие на питающую сеть.

Кроме того, обеспечиваются дополнительные возможности для работы на пониженной или ползучей скорости в определённых технологических и ремонтных режимах.

4.04.01

Проф., д.т.н.

А.М.Вейнгер