

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

В современных условиях при исследовании сложных электромеханических систем для решения различного рода задач повсеместно используются методы компьютерного моделирования на основе специализированных пакетов прикладных программ. Относительно частотно-регулируемого электропривода в большинстве случаев рассматриваются либо пусковые режимы работы, либо поведение системы при интересующем характере изменении нагрузки. В этой связи, целью работы является моделирование тормозных режимов асинхронного электропривода с частотным управлением, что на практике представляет определенный интерес относительно выбора способа организации режима торможения.

На сегодня имеет место три основных варианта реализации тормозного режима частотно-регулируемого электропривода. Базовым можно считать использование тормозного резистора в промежуточной цепи постоянного тока преобразователя частоты, на котором гасится энергия при торможении двигателя. Другим предложением многих фирм производителей является применение дополнительной вентильной группы, которая при торможении поддерживает инверторный режим работы и, тем самым, обеспечивается рекуперация энергии в питающую сеть. В последнее время все больше внимания уделяется использованию, так называемого, активного выпрямителя со свойством реализации потребления энергии системой электропривода из сети в двигательном режиме и возврат энергии обратно в сеть при торможении.

Для исследования указанных способов технической реализации тормозного модуля использована система компьютерного моделирования *MATLAB*, в состав которой входит пакет *SimPowerSystems*, позволяющий синтезировать виртуальные модели силового канала электромеханических систем, что дает возможность приблизить между собой работу модели и функционирование реальной системы электропривода. Основные принципы построения и методика проведения эксперимента с применением виртуальных моделей наиболее полно представлена в работе [1]. Такие модели, в отличие от структурных, позволяют получить не только динамические характеристики, но и практически все другие показатели, в частности – энергетические.

На рисунке 1 приведена синтезированная виртуальная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода для исследования поведения системы в режиме торможения.

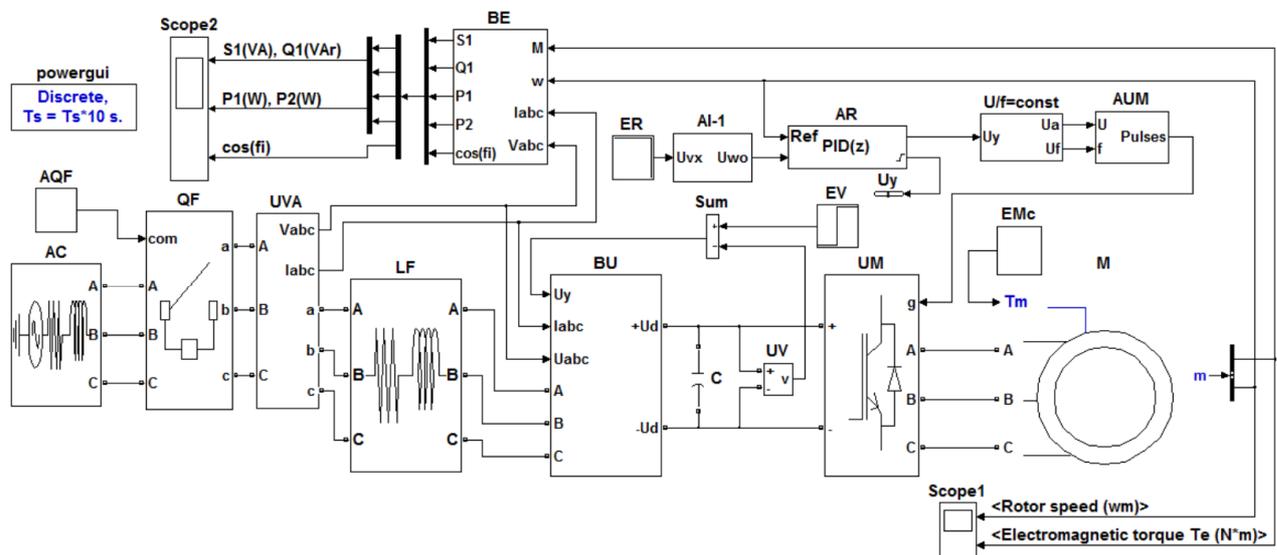


Рисунок 1 – Виртуальная модель асинхронного электропривода с частотным управлением

В модели использованы следующие блоки силового канала электропривода:

*M* – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (серия 4А: мощность 75 кВт, напряжение 380 В, частота 50 Гц, скорость 1484 об/мин);

*UM* – автономный инвертор преобразователя частоты на вентилях *IGBT/Diodes*;

*BU* – подсистема входного и тормозного модулей, создающая цепь постоянного тока;

*C* – емкостной фильтр в звене постоянного тока;

*LF* – токоограничивающий реактор для обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью;

$QF$  – входной автоматический выключатель с системой управления  $AQF$ , которая подает команду на включение или отключение автомата в требуемый момент времени;

$AC$  – сеть переменного тока 380 В, 50 Гц;

Канал управления реализован с помощью блоков основного пакета *Simulink*:

$AUM$  – система управления вентилями автономного инвертора преобразователя частоты;

$U/f=const$  – подсистема функционального преобразователя, формирующая соответствующий скалярный закон управления напряжением в функции частоты;

$AR$  – регулятор скорости с ПИД - структурой;

$AI-1$  – датчик интенсивности первого порядка, ограничивающий величину замедления;

$ER$  – блок задания необходимой скоростной диаграммы;

$EV$  – блок задания требуемой величины напряжения в звене постоянного тока;

$EM_C$  – блок задания статического момента нагрузки;

$Sum$  – сумматор, формирующий сигнал рассогласования по знаку и по величине между заданным значением напряжения в звене постоянного тока и действительным значением этого напряжения;

Измерительно-информационный канал системы содержит:

$UV$  – датчик напряжения в звене постоянного тока;

$UVA$  – группа датчиков фазных напряжений и токов в питающей сети;

$BE$  – подсистема вычисления энергетических показателей;

$Scope1$  – осциллограф, отображающий диаграммы изменения угловой скорости и электромагнитного момента двигателя;

$Scope2$  – осциллограф, отображающий графики изменения мгновенных значений энергетических показателей.

Блок *puwergui* является обязательным для запуска виртуальных моделей и определяет дискретный шаг моделирования.

Фактически основным элементом виртуальной модели для решения поставленной задачи является подсистема  $BU$ , которая непосредственно моделирует возможные варианты построения тормозного модуля частотно-регулируемого электропривода (рисунок 2).

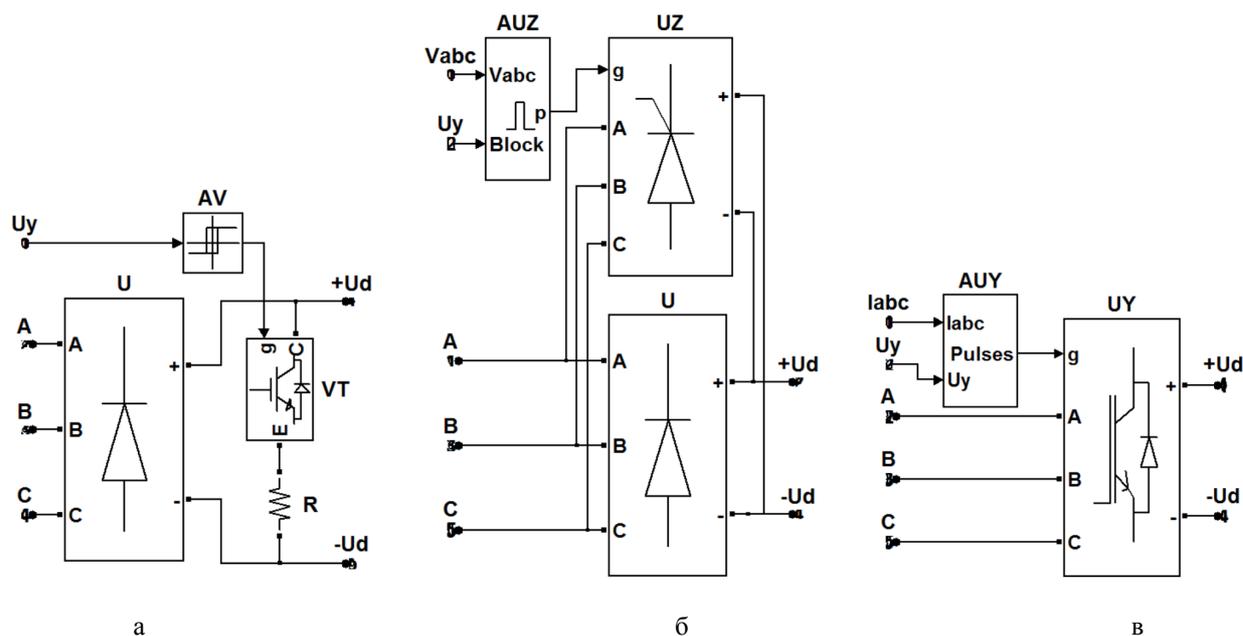


Рисунок 2 – Виртуальные модели тормозных модулей:  
а – тормозной резистор; б – дополнительная группа вентиляей; в – активный выпрямитель

Модель (рисунок 2, а) содержит неуправляемый выпрямитель на диодах  $U$  и тормозной модуль с резистором  $R$ , который подключается к цепи постоянного тока с помощью транзисторного ключа  $VT$ . Управление ключом обеспечивает нелинейный элемент  $AV$  согласно сигналу от блока  $Sum$ .

В модели (рисунок 2, б) встречно-параллельно неуправляемому выпрямителю  $U$  подсоединена дополнительная вентиляльная группа на тиристорах  $UZ$  с постоянным углом управления в инверторном режиме 150 эл. град. Включение этой вентиляльной группы в работу происходит в зависимости от знака выходного сигнала  $U_y$  регулятора скорости  $AR$ .

Модель активного выпрямителя (рисунок 2, в) представляет собой одну вентиляльную группу  $UY$  на вентилях  $IGBT/Diodes$  с системой управления  $AUY$ , которая реагирует на знак выходного сигнала блока  $Sum$ .

Алгоритм функционирования модели следующий:

$4 < t < 5$  с – работа электропривода в установившемся режиме с номинальной скоростью;

$t = 5$  с – начало режима торможения;

$5 < t < 6,5$  с – снижение скорости в диапазоне 2:1;

$t = 6,5$  с – выход на половинную скорость;

$6,5 < t < 8$  с – установившееся движение с половинной скоростью;

$t = 8$  с – окончание времени моделирования.

Динамику поведения системы частотно-регулируемого электропривода в тормозном режиме иллюстрирует рисунок 3.

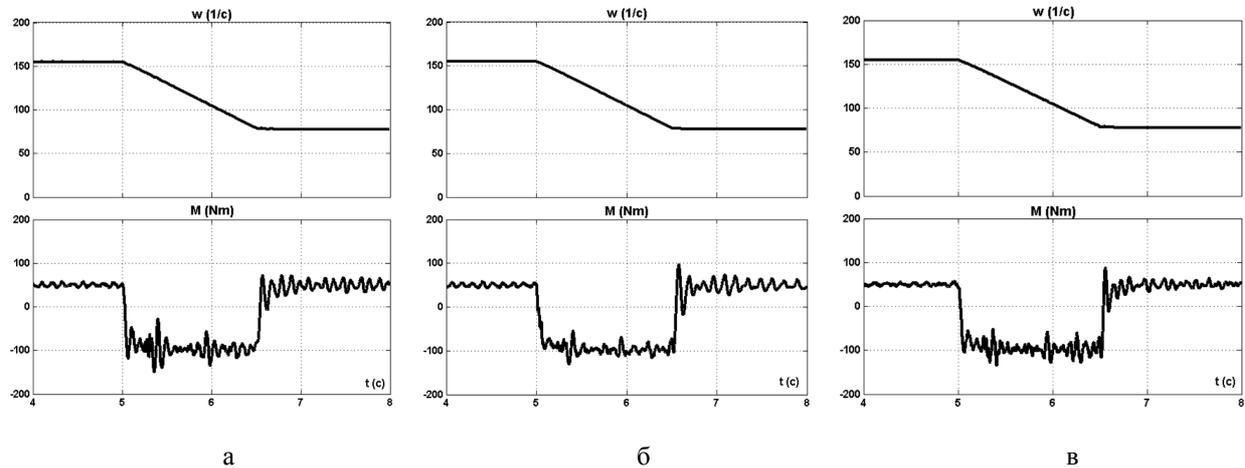


Рисунок 3 – Диаграммы изменения угловой скорости и электромагнитного момента при торможении двигателя:

а – с тормозным резистором; б – с дополнительной группой вентилей; в – с активным выпрямителем

В достаточной степени полученные результаты свидетельствуют о том, что динамика системы фактически не зависит от варианта технической реализации тормозного модуля. За счет использования ПИД-регулятора точно обрабатывается задание на снижение скорости в два раза. В кривых электромагнитного момента имеются некоторые незначительные отличия, которые практически не влияют на общий характер протекания переходных процессов.

Наибольший интерес представляют энергетические показатели в режиме торможения, графики изменения мгновенных значений которых представлены на рисунке 4.

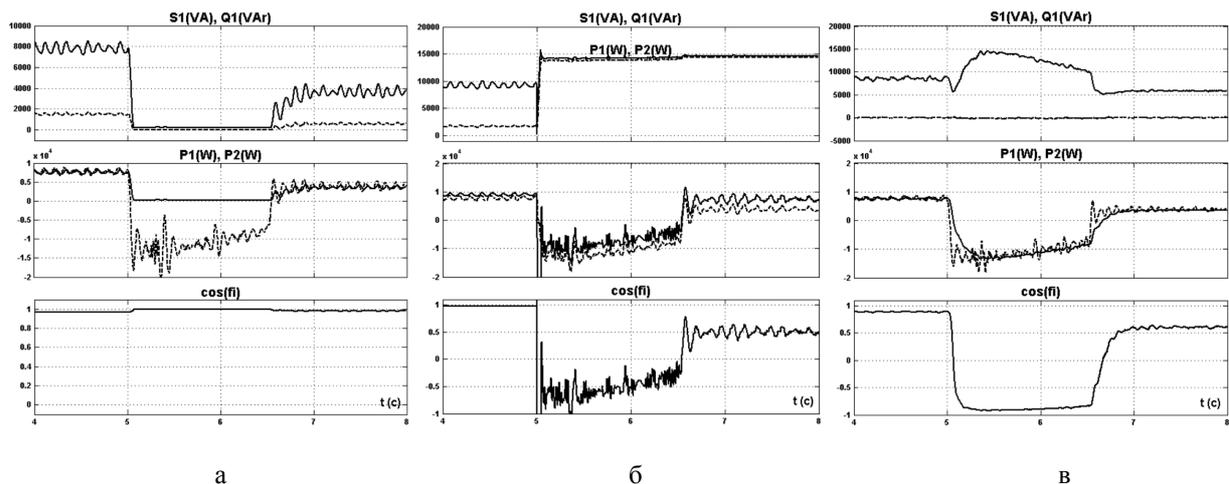


Рисунок 4 – Графики изменения мгновенных значений энергетических показателей:

а – с тормозным резистором; б – с дополнительной группой вентилей; в – с активным выпрямителем

Особенностью работы схемы с тормозным резистором (рисунок 4, а) является отсутствие потребления мощности из сети в период торможения. В этот момент активная мощность  $P2$  (пунктирная линия) рассеивается на резисторе.

Схема с дополнительной вентильной группой (рисунок 4, б) обеспечивает режим рекуперации энергии в сеть при торможении, чему соответствуют отрицательные значения мощностей  $P1$  и  $P2$ . В этот период имеет место опережающий коэффициент мощности.

Схема с активным выпрямителем (рисунок 4, в) в период торможения также реализует режим возврата энергии в питающую сеть с высоким значением опережающего  $\cos\varphi$ . За счет специального алгоритма управления, который обеспечивается системой АУУ, во всех режимах работы электропривода практически отсутствует потребление реактивной мощности из сети  $Q1$  (пунктирная линия).

Численные значения энергетических показателей для удобства сравнения и анализа сведены в таблицу:

Энергетические показатели	Тормозной резистор	Тип тормозного модуля	
		Дополнительный мост	Активный выпрямитель
$S1$ (кВА)	0,186	14,2	12,6
$Q1$ (кВАр)	0,011	13,8	-0,16
$P1$ (кВт)	0,185	-7,6	-11,4
$P2$ (кВт)	-11,5	-10,8	-10,6
$\cos\varphi$ (о.е.)	0,99	-0,54	-0,90

Приведенные в таблице величины соответствуют моменту времени  $t = 6,5$  с. Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что энергетические характеристики в целом лучше у схемы с активным выпрямителем.

Относительно рассмотренных вариантов построения тормозных модулей асинхронного электропривода необходимо отметить следующее.

С точки зрения технической реализации схема с тормозным резистором наиболее проста и надежна. Недостатком является невозможность реализовать режим возврата энергии торможения в сеть. Поэтому такой вариант целесообразно использовать для механизмов, у которых интенсивность тормозных режимов невысока или в зависимости от вида и величины нагрузочного момента по технологии режим рекуперации обеспечить нельзя.

Применение дополнительной управляемой вентильной группы наиболее просто обеспечивает возврат энергии при торможении в питающую сеть. Однако схема становится сложнее и менее надежной, так как во время всего периода торможения необходимо поддерживать устойчивый режим работы тиристоров в инверторном режиме. Этот вариант особенно подходит для реверсивных электроприводов машин и установок с активным характером нагрузочного момента. В этом случае при изменении направления движения по технологии двигателя переходит в генераторный режим и целесообразно с точки зрения энергосбережения обеспечивать рекуперацию энергии в сеть.

Наиболее универсальной является схема с активным выпрямителем. Во-первых, имеется всего одна вентильная группа, во-вторых, кроме возможности обеспечивать двухсторонний обмен энергии с сетью, активному выпрямителю присущи еще некоторые важные свойства [2]. Определяющим фактором является выбор алгоритма управления, от которого зависит режим работы активного выпрямителя: отсутствие потребления реактивной мощности, генерация активной или реактивной мощности, одновременное совмещение генерации активной и реактивной мощностей. Кроме того, можно выбрать передаточные функции регуляторов в системе управления таким образом, что преобразователь будет выполнять функцию фильтра низких частот, а это приведет к улучшению спектра напряжения, подаваемого на статор асинхронного двигателя. Таким образом, активный выпрямитель обладает возможностью бесконтактно, при высоком быстродействии плавно управлять количеством компенсируемой реактивной мощности, а также формировать близкие к синусоидальным потребляемые из сети фазные токи. Относительным недостатком активного выпрямителя можно считать сложность построения и расчета параметров системы управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
2. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією: Монографія. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470 с. Рос. мовою.