

А. Н. ЗАЙЦЕВ, В. Э. ВОСКОБОЙНИК, С. В. КОМАРОВ,  
А. С. ВОРОШИЛОВ (ИТСТ НАН Украины «Трансмаг»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА С ЛИНЕЙНЫМ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Досліджувалась математична модель електропривода з лінійним синхронним двигуном в перехідних режимах. Одержані результати моделювання. Модель дозволяє досліджувати електромеханічні і теплові процеси в лінійному електроприводі з урахуванням особливостей конструкції та значення параметрів.

Исследовалась математическая модель электропривода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах. Получены результаты моделирования. Модель позволяет исследовать электромеханические и тепловые процессы в линейном электроприводе с учетом особенностей конструкции и значения параметров.

The article has investigated a mathematical model of an electric drive with linear synchronous motor in transition regimes. Results of the modelling have been presented. The model allows to investigate electromechanical and thermal processes in the linear electric drive in view of structural features and the values of parameters.

В настоящее время все большее внимание уделяется транспортным системам с магнитным подвесом. В мире существуют два типа таких систем, доведенных до стадии коммерческой эксплуатации. Это германская система Transrapid (электромагнитный подвес) и японская ML (электродинамический подвес).

Практическая реализация этих систем стала возможной благодаря современному состоянию таких высоких технологий с использованием преобразовательной и микропроцессорной техники, а также технической сверхпроводимости, без которой невозможно реализовать подвес с требуемыми параметрами [1].

Динамика движения транспортных средств (ТС) таких систем во многом определяется характеристиками линейного электропривода. При разработке систем высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) с тяговыми линейными синхронными двигателями (ЛСД) возникает задача выбора наиболее рациональных параметров способов разгона и торможения ТС. Решение этого вопроса имеет прямое отношение к схеме управления движением ТС и позволяет определить требования, предъявляемые к источникам питания путевой обмотки как в установившихся, так и в переходных режимах работы [2].

Для исследования линейного синхронного двигателя (ЛСД) линейного стенда ИТСТ НАН Украины «Трансмаг» в переходных и установившихся режимах, ранее, была разработана

базовая модель, в которой обмотка статора ЛСД подключается к симметричному трехфазному источнику напряжения или тока. Ротор (транспортное средство) содержит блоки постоянных магнитов, используемых в качестве возбудителя. ЛСД описывается с помощью метода пространственного вектора, который позволяет связать полученные уравнения в единую систему.

В базовой модели [3] рассматривалась возможность подключения ЛСД к силовому полупроводниковому преобразователю. Основным назначением полупроводникового преобразователя является регулирование скорости и момента исполнительного двигателя ЭП. В ЭП переменного тока необходимо регулировать напряжение и частоту на выходе преобразователя по определенному закону. Поэтому целью работы является разработка модели преобразователя, в которой можно учитывать различные конструктивные особенности и возможности изменения и измерения параметров для переходных, квазиустановившихся и установившихся режимов работы.

В предложенном варианте в модель электропривода с линейным синхронным двигателем добавлено звено силового полупроводникового преобразователя напряжения (рис. 1, выделен штриховкой).

Преобразователь и двигатель можно представить посредством структурной модели и исследовать в общедоступных прикладных пакетах.

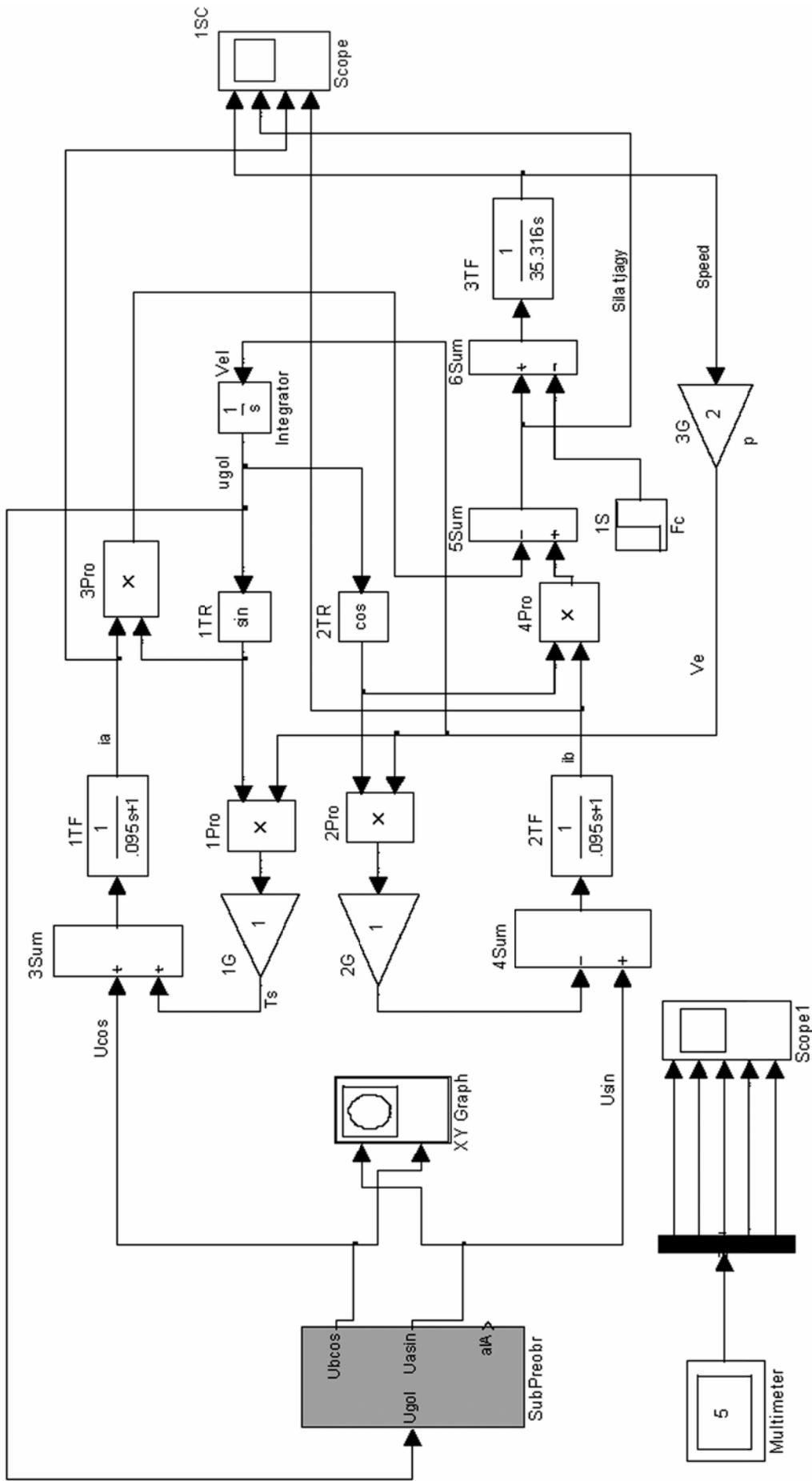


Рис. 1. Модель электропривода с линейным синхронным двигателем и преобразователем

## Описание модели вентильного двигателя с силовым преобразователем

В системе (блоки 3Sum, 4Sum, см. рис. 1) в начальный момент времени  $t = 0$  подается вектор напряжения, представленный в неподвижной системе координат. Это напряжение можно получить следующим образом.

Управление значением амплитуды напряжения (с блока Um рис. 2) подается на управляемый источник напряжения (блок Con Volt Source), выход которого подключен к преобразователю (блок Un Bridge). Блок Un Bridge в своей схеме может содержать идеальные силовые ключи. Затем трехфазное напряжение, полученное в блоке Un Bridge с помощью преобразователя координат (блок Sub3x2), преобразуется в систему неподвижных координат  $\alpha, \beta$

и подается на упомянутые выше блоки (блоки 3Sum, 4Sum). Блок Puls1 формирует заданную логическую последовательность импульсов для управления силовыми ключами преобразователя Un Bridge. Одновременно на Блок Puls1 подается сумма сигналов с блока Constant и сигнал Ugol пропорциональный фазовому углу вектора выходного напряжения, который можно получить из модели двигателя. Учтено, что угол поворота вала двигателя нельзя представлять как  $vt$  (базовая модель [3]), так как при уменьшении скорости  $v$  и возрастании времени  $t$  возможен вариант, когда их произведение остается постоянным, т. е. фазовый угол не изменяется. В действительности скорость вращения вала не равна нулю и угол должен расти. Поэтому угол поворота вала двигателя определяется как интеграл скорости (блок Integrator, см. рис. 1).

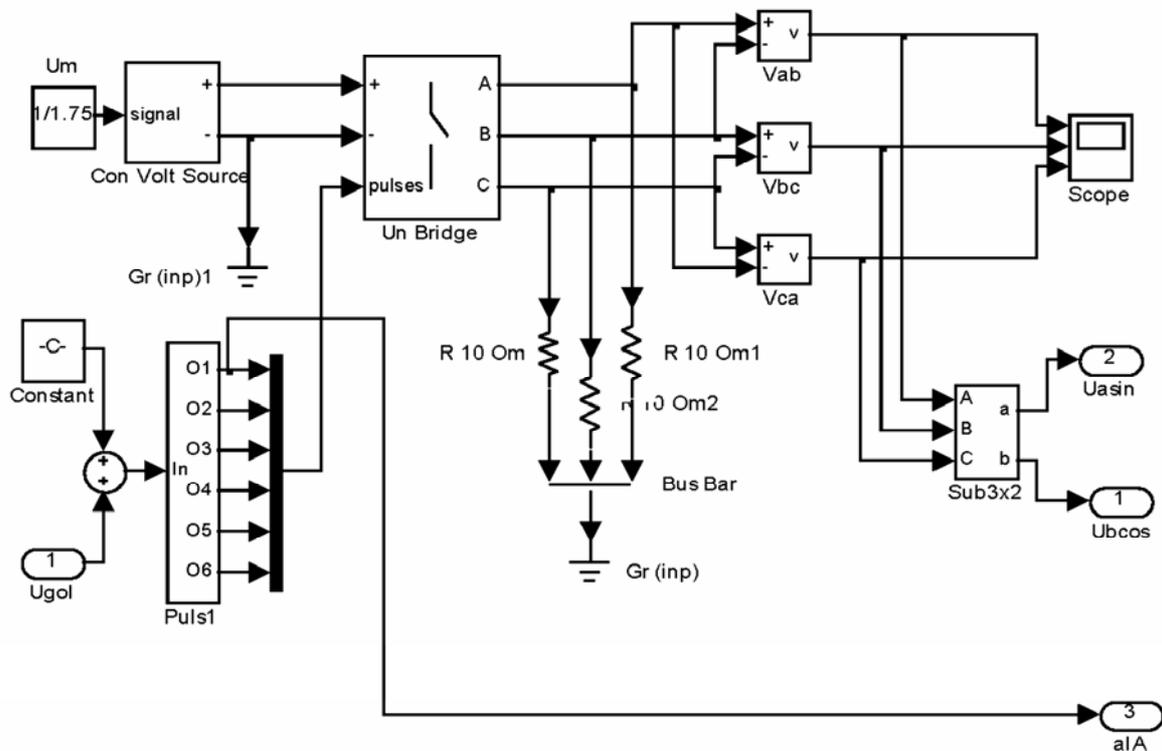


Рис. 2. Модель преобразователя

В модели вентильного двигателя в относительных единицах амплитуда напряжения двигателя равна единице. Если начальная фаза напряжения равна нулю, то движения не будет. Шесть переключений за период – это шаг  $\pi/3$ . Первое постоянное смещение, которое подается на вход Ugol, величиной  $\pi/3$  повернет вектор напряжения в исходном состоянии на 60 эл. град. Угол поворота двигателя после этого увеличивается в положительном направлении.

Блок Multimeter позволяет измерять напряжения и токи каждого силового ключа в преобразователе напряжения.

Выход alA в силовом преобразователе (см. рис. 1) предусмотрен для последующих исследований единичного силового ключа.

## Исследование модели вентильного двигателя с силовым преобразователем

Модель привода (см. рис. 1) содержит силовой преобразователь, собранный на базе автономного инвертора напряжения с идеальными ключами. Для исследования такой модели применена начальная фазировка управляющих сигналов со значением  $\pi/3 + \alpha$  ( $\alpha$  – регулируемое смещение угла), которая устанавливается в блоке Constant (см. рис. 2).

Относительные значения токов  $i_{S\alpha}$ ,  $i_{S\beta}$  снимаются непосредственно с выходов блоков 1TF и 2TF и подаются для измерения на осциллоскоп 1SC Score. Сигналы силы тяги и скорости снимаются с выходов блоков 5Sum, 3TF. Измерения производятся блоком 1SC. Результаты моделирования представлены осциллограммами на рис. 3.

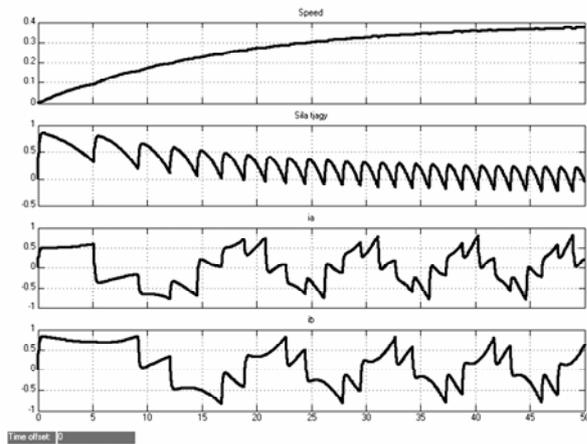


Рис. 3. Результаты моделирования при величине  $\alpha = 0$

Скорость изменяет свое значение от нуля до установившегося значения. Момент, совершая колебательные движения, достигает 0,8 номинального значения, а затем снижается и переходит в квазиустановившийся режим.

Без дополнительного регулирования изменения среднего значения момента происходят по экспоненте.

Годограф пространственного вектора напряжения инвертора (показания измеряются блоком XY Graph) образует равносторонний шестиугольник (рис.4).

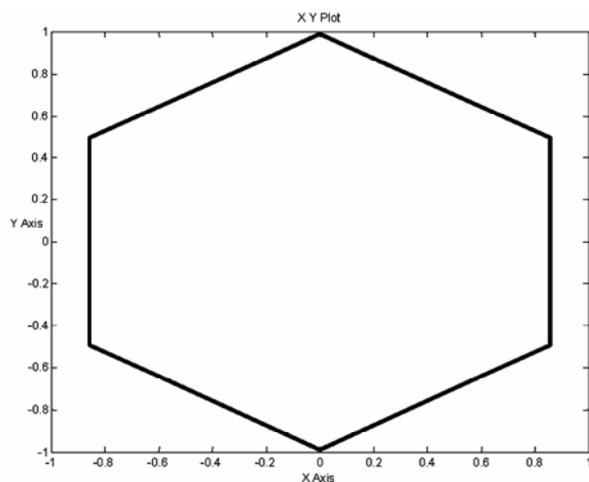


Рис. 4. Годограф пространственного вектора напряжения

Для  $\alpha = +0,5235$  получены другие результаты моделирования (рис. 5).

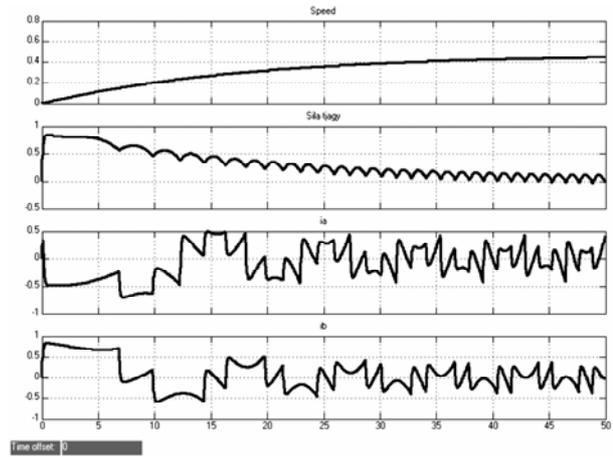


Рис. 5. Результаты моделирования при величине  $\alpha = +0,5235$

Для  $\alpha = +0,5236$  можно получить результаты моделирования по рис. 6.

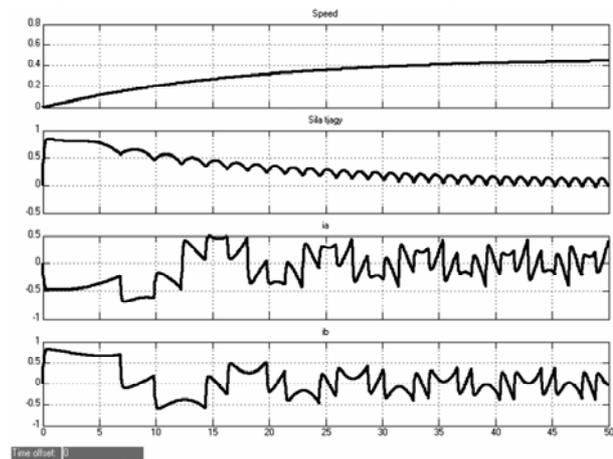


Рис. 6. Результаты моделирования при величине  $\alpha = +0,5236$

Годограф пространственного вектора напряжения аналогичен изображению на рис.4. Однако пространственный вектор напряжения начинает переключение на 60 эл.град позже. Причем пуск происходит с током  $i_{S\alpha}$  противоположного знака в начальный момент времени.

Анализируя осциллограммы результатов моделирования, приведенные на рис. 3, 5, 6, можно определенно сказать, что переходной процесс при включении вентильного двигателя улучшается с изменением значения начальной фазировки  $\alpha$  от 0 до значения  $+0,5235$ .

Оптимальным для исследованных параметров является  $\alpha = +0,5235$ , при котором переходной процесс имеет наилучшие качественные показатели.

Скорость переключения электронного элемента зависит от сопротивления содержащегося в его цепи. При этом задний фронт импульса имеет

нелинейность. Чем меньше нелинейность, тем выше скорость переключения. Как следствие уменьшаются динамическое сопротивление и потери мощности на электронном элементе.

Достаточно просто создать модель вентильного двигателя с силовым преобразователем на базе автономного инвертора тока с идеальными ключами. Для этого в модели необходимо заменить управляемый источник напряжения (блок *Con Volt Source*, см. рис. 2) на управляемый источник тока. Остальные блоки модели остаются без изменения.

Достаточно просто заменяются электронные элементы силового преобразователя. Кроме идеальных силовых ключей в модели преобразователя можно устанавливать другие электронные элементы. Модель содержит преобразователь и позволяет анализировать различные способы коммутации различных электронных элементов (тиристоры, IGBT, MOSFET). Допускаются вариации параметров и изменения скорости переключения элементов. Можно получать реальные кривые токов и производить спектральный анализ гармоник тока и напряжения.

В данной статье рассмотрена работоспособная модель силового преобразователя вентильного двигателя, который может содержать автономный инвертор напряжения или тока. Получены результаты моделирования переходных процессов при совместной работе преобразователя и вентильного двигателя.

Установлено, что с помощью программных методов управления преобразователем можно улучшить гармонический состав токов, снизить потери мощности, уменьшить энергозатраты на перемещение транспортного средства.

Получены результаты моделирования, которые позволяют оценить качество тягового усилия и гармонического состава токов в преобразователе и в питающей сети от параметров системы и режимов движения.

В модели предусмотрена возможность получения исходных данных для расчета температуры силовых элементов преобразователя. С помощью измерительных блоков можно получить напряжение и ток, протекающие непосредственно в каждом силовом ключе. Перемножив их, можно получить потери мощности силового ключа. Если подставить полученную мощность в тепловую модель (не рассматривается в данной статье) можно получить температуру отдельно взятого силового ключа преобразователя.

Результаты показывают специфические особенности электромагнитных и механических процессов, которые требуют дополнительных исследований с целью оптимизации параметров и режимов работы электропривода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев и др.; Под общей ред. В. А. Дзензерского, В. И. Омеляненко. – К.: Наукова думка. – 2001. – 479 с.
2. Зайцев А. Н. Энергетические характеристики режимов разгона транспортных экипажей на магнитном подвесе / А. Н. Зайцев, С. В. Комаров, А. С. Ворошилов. // Транспорт: Зб. наук. праць. – Вып. 9. – Д., 2001. – 180 с.
3. Зайцев А. Н. Разработка математической модели привода с линейным синхронным двигателем для исследования переходных режимов / А. Н. Зайцев, В. Э. Воскобойник, С. В. Комаров и др. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. імені акад. В. Лазаряна. – Вип. 5. – Д: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2004. – 240 с.

Поступила в редколлегию 16.12.2005.