

В.С. Захаренко,
к.т.н., доцент кафедры
«Автоматизированный электропривод»



Р.С. Науменко,
магистрант кафедры
«Автоматизированный электропривод»



УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», факультет автоматизированных и информационных систем

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Аннотация

Разработана имитационная модель электромеханического испытательного стенда. В состав стенда входят два асинхронных электродвигателя, соединенные валами, и два преобразователя частоты с векторным управлением. Принцип взаимной нагрузки реализован через промежуточные цепи постоянного тока преобразователей частоты.

Разработанная модель позволяет производить анализ динамических и энергетических процессов в стенде и может быть использована для оценки потенциала энергосбережения при выполнении проектов таких стендов.

Abstract

A simulation model of an electromechanical test stand was developed. The stand consists of two asynchronous electric motors connected by shafts, and two vector controlled frequency converters. The principle of mutual load is realized through intermediate DC circuits of frequency converters.

The developed model allows for the analysis of dynamic and energy processes in the stand, and can be used to assess the potential for energy saving in the implementation of projects of such stands.

Введение

На кафедре АЭП УО «ГГТУ им. П.О. Сухого» проводились научные исследования по построению систем автоматического управления энергосберегающими испытательными электромеханическими стендами на основе асинхронно-вентильного каскада и на основе взаимной нагрузки машин постоянного тока [1, 2].

Поскольку двигатели постоянного тока применяются все реже и асинхронно-вентильный каскад характеризуется невысокими показателями электромагнитной совместимости, актуальными являются исследования в области систем автоматического управления стендами на основе взаимной нагрузки машин переменного тока и серийно выпускаемых преобразователей частоты.

Для стендов с отсутствием рекуперации характерна простота реализации нагрузочного устройства. Обычно это фрикционные, аэродинамические, гидравлические, электромагнитные тормоза или электрические машины, работающие в режимах динамического торможения и торможения противотоком. Такие устройства характеризуются большой потерей энергии, расходуемой на трение или выделяющейся в добавочных сопротивлениях, и, как следствие, низким КПД.

Рекуперация энергии в сеть требует усложнения нагрузочной части стенда и экономически оправдана при испытаниях машин средней и большой мощности. В настоящее время широко применяются электромашинные нагрузочные устройства, представляющие собой

систему «генератор-двигатель-генератор» либо «генератор-вентильный преобразователь», причем во втором случае КПД системы повышается за счет уменьшения числа ступеней преобразования энергии. Вентильный преобразователь может быть как управляемым, так и неуправляемым.

Наиболее энергосберегающим является стенд с рекуперацией энергии в привод. В этом случае нагрузочное устройство, работая в режиме генератора, отдает всю выработанную энергию другой машине, которая может быть как приводной, так и исследуемой. Работая в режиме двигателя, она расходует свою механическую энергию на вращение вала нагрузочного устройства. При этом из сети потребляется мощность, необходимая только для покрытия потерь.

Это позволяет при значительной мощности испытываемого оборудования пользоваться ограниченным источником энергии.

В настоящее время используются в основном асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Для обеспечения энергосбережения используется метод взаимной нагрузки. Однако, для АД данный метод существенно ограничивает область применения стенда и диапазон скоростей и нагрузок [1]. Для получения полного диапазона применяются преобразователи частоты (ПЧ) с взаимной нагрузкой через промежуточную цепь постоянного тока [3].

В работе [3] не рассматриваются вопросы создания системы управления для регулирования скорости вращения и нагрузочного момента. Кроме того,

использованы линеаризованные модели компонентов силовой части (без учета влияния широтно-импульсной модуляции (ШИМ) инвертора). ПЧ используются со скалярным управлением. Как следует из анализа доступной нам научно-технической литературы, вопрос настройки системы управления стендом не был рассмотрен. Кроме того, моментом АД можно управлять только в системах векторного управления или в системах прямого управления моментом АД.

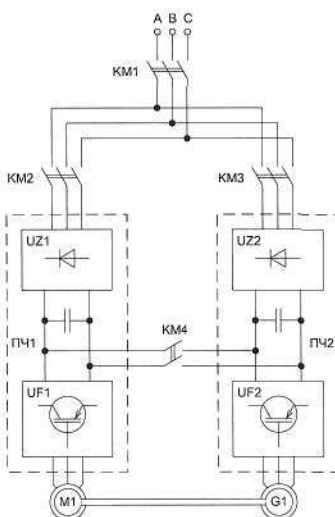
Исходя из вышеизложенного тема разработки имитационной модели электромеханического испытательного стенда на основе АД, управляемых ПЧ с векторным управлением и взаимной нагрузкой по промежуточной цепи постоянного тока, является актуальной.

Основная часть

Функциональная схема стенда показана на рис. 1.

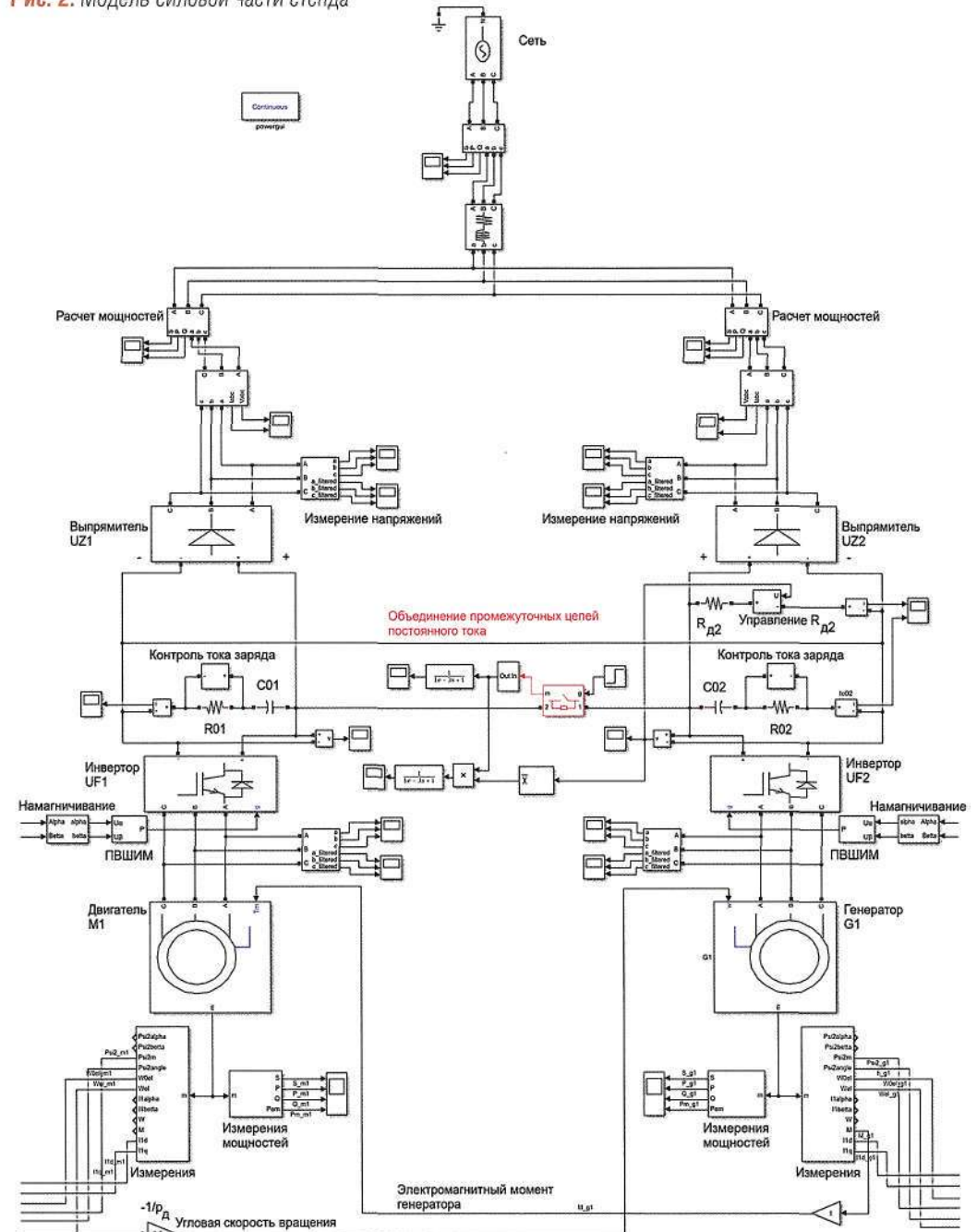
Механически сопряженные два АД М1 и G1 подключены к преобразователям частоты ПЧ1 и ПЧ2, каждый преобразователь частоты состоит из выпрямителей UZ1, UZ2, промежуточных цепей постоянного тока, управляемых инверторов UF1, UF2. Объеди-

Рис. 1. Функциональная схема стенда. ПЧ1, ПЧ2 – преобразователи частоты, UZ1, UZ2 – диодные выпрямители, UF1, UF2 – инверторы напряжения, M1, G1 – АД, работающие в режиме двигателя и генератора соответственно



нение цепей постоянного тока осуществляется, чтобы передавать энергию, вырабатываемую АД, который работает в генераторном режиме, G1 на АД, работающий в двигательном режиме, M1 через его преобразователь частоты. На схеме также отмечена коммутационная аппаратура: контакторы KM1 – KM3 – для включения/отключения частей схемы со стороны сети (источника питания); контактор KM4 – для включения/отключения объединения промежуточных цепей постоянного тока.

Рис. 2. Модель силовой части стенда



Имитационная модель была разработана в системе моделирования MATLAB Simulink. Для управления обоими АД использованы системы векторного управления [4, 5]. Расчеты проводились для АД АИР90L4 мощностью 2,2 кВт и номинальной частотой вращения 1420 об/мин. Параметры схемы замещения двигателей были рассчитаны по методике профессора Фираго Б.И. [6]. Расчет параметров моделей двигателей и синтез систем управления проводился по методике, изложенной в [5]. Контуры регулирования со-

ставляющих тока статора i_{sd} и i_{sq} , контур регулирования потокоцепления ротора ψ_2 синтезированы на технический оптимум. Контур регулирования скорости – на симметричный оптимум для исключения статической ошибки по возмущению.

Часть модели, относящаяся к силовой части стенда, приведена на рис. 2. На рис. 3 и 4 приведены части модели, соответствующие системам управления АД, работающим в двигательном и генераторном режимах соответственно.

Рис. 3. Модель системы управления АД, работающего в двигательном режиме

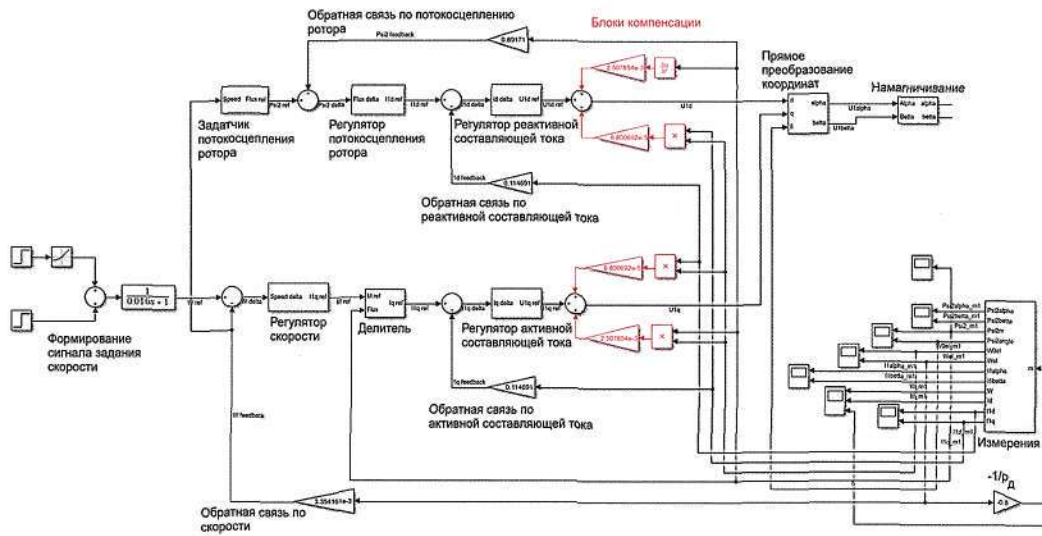
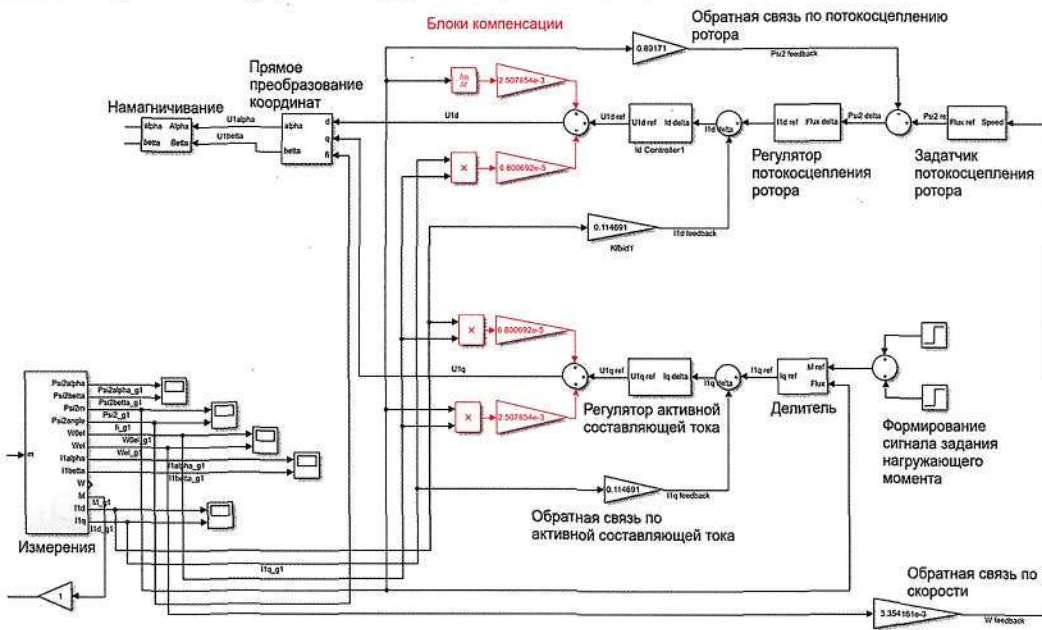


Рис. 4. Модель системы управления АД, работающего в генераторном режиме



В подмоделях «Контроль тока заряда» первоначально планировалось реализовать регулирование тока заряда конденсаторов в промежуточной цепи постоянного тока. Затем, для того чтобы чрезмерно не усложнять модель, реализовано шунтирование резисторов, ограничивающих первоначальный бросок тока, включенных последовательно с конденсаторами (R01 и R02) после выдержки времени 30 мс после включения.

В промежуточной цепи постоянного тока ПЧ2 установлен резистор динамического тор-

можения R_{d2} с блоком управления им «Управление R_{d2} ». Регулятор – релейный. Максимальная частота коммутации – 1 КГц. Назначение резистора – рассеивание мощности, рекуперированной АД, работающим в режиме генератора, при отключении сети.

Промежуточные цепи постоянного тока подключаются друг к другу блоком «Ideal Switch» (соответствует KM4 на рис. 1, выделен на рис. 2 красным цветом) после выдержки времени 50 мс после включения.

Поскольку при проведении численных экспериментов было

получено, что диодные выпрямители в установившемся режиме работают в режиме прерывистого тока, то в подмоделях расчета мощностей со стороны сети было реализовано усреднение мгновенных значений мощностей за один интервал проводимости диодов.

Для управления инверторами использованы блоки пространственно-векторной ШИМ «ПВШИМ», в качестве которых использованы блоки MATLAB Simulink «SVPWM Generator (2-Level)».

В блоках «Намагничива-

тельное подмагничивание АД постоянным током на интервале времени от 30 мс до 50 мс после включения. Это сделано для того, чтобы перед запуском системы управления сформировать начальное значение потокосцепления ротора Ψ_2 . Имеющийся у нас опыт моделирования систем векторного управления АД показывает, что при отсутствии предварительного подмагничивания регуляторы канала регулирования потокосцепления сразу входят в ограничение и не оказывают влияния на динамику процессов в канале, которые протекают со значительной длительностью, что ухудшает динамику всей системы. Кроме того, регуляторы канала потокосцепления заблокированы (вход регуляторов переклочены на 0) до начала подмагничивания. Это сделано для уменьшения скачков сигналов в системе управления в начале и в конце интервала подмагничивания, а также переменных в силовой части стэнда при включении системы управления.

Регуляторы канала управления скоростью заблокированы до момента времени 50 мс после включения. В момент времени 50 мс происходит включение систем управления и подача сигналов задания.

Контур регулирования скорости системы управления АД, работающего в режиме генератора, отсутствует. Сигнал задания нагрузочного момента подается на блок вычисления задания активной составляющей тока статора i_{q^*} .

Рис. 5. Векторная диаграмма

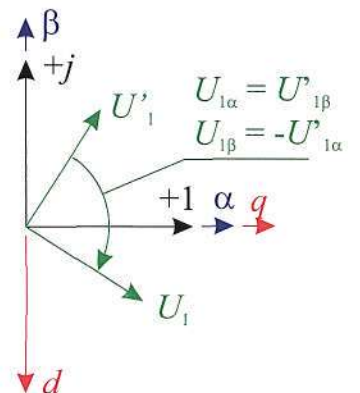


Рис. 6. Диаграммы изменения скорости вращения стэнда и моментов АД. W_{m1} – угловая скорость вращения стэнда, рад/с, M_{m1} – электромагнитный момент АД, работающего в двигательном режиме, Н·м, M_{g1} – в генераторном режиме, Н·м

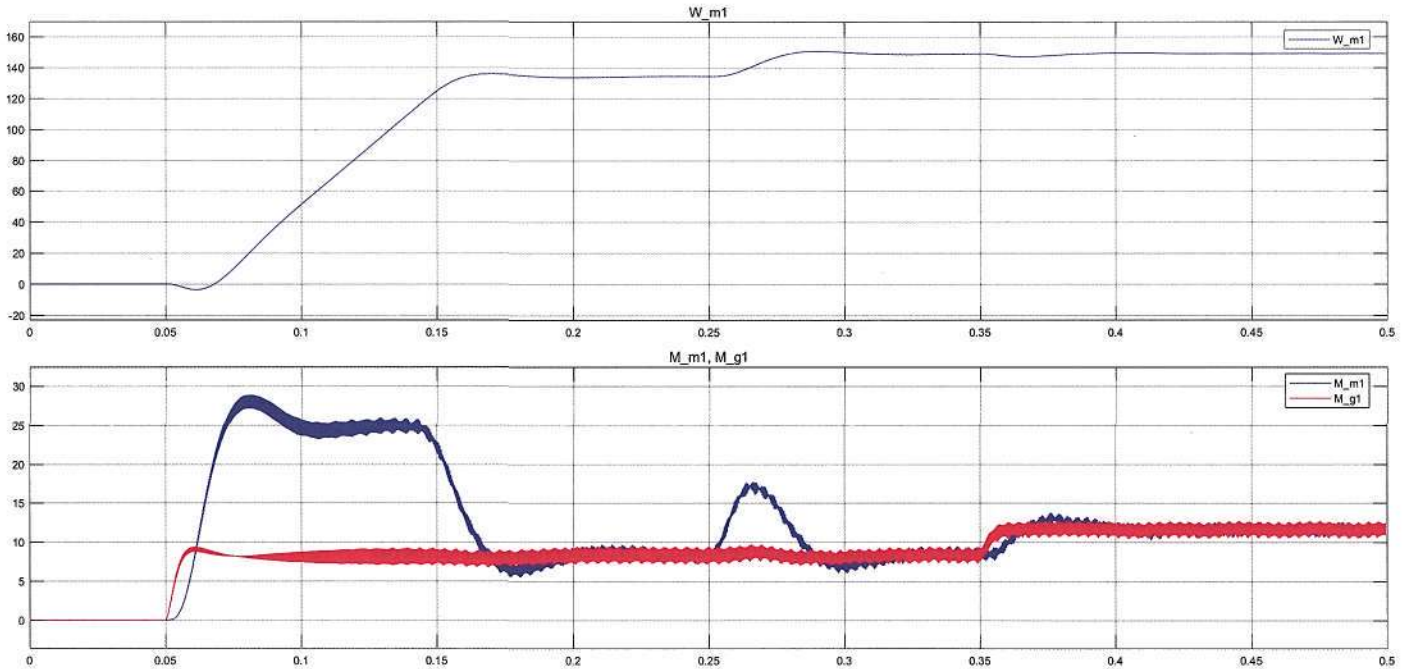


Рис. 7. Диаграмма изменения потокоцепления ротора АД, работающего в двигательном режиме (диаграмма АД, работающего в генераторном режиме, аналогична), Вб

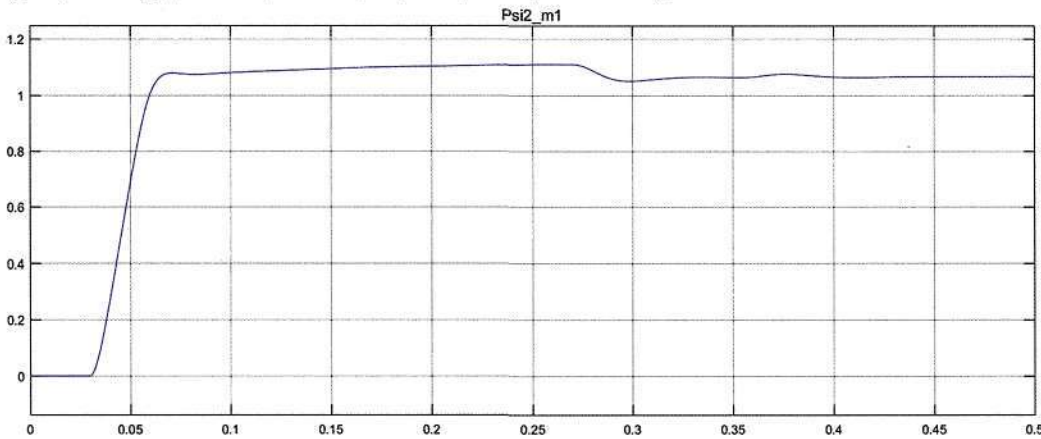
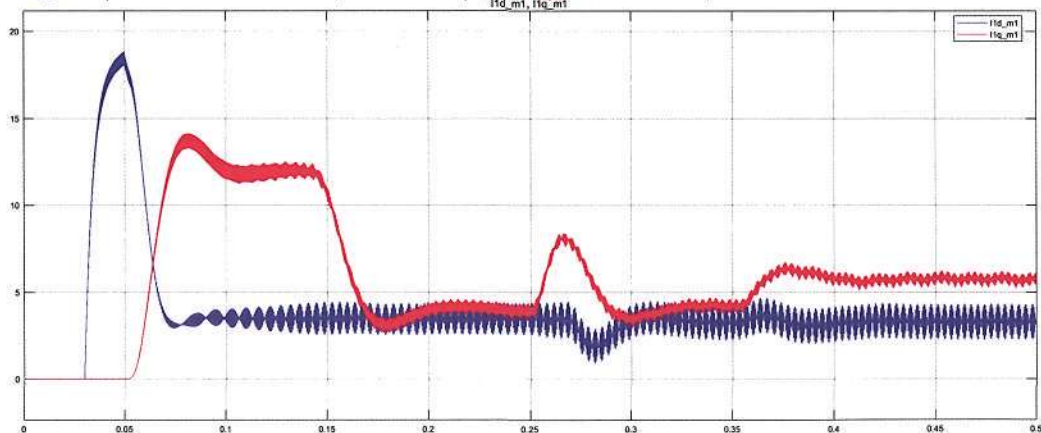


Рис. 8. Диаграммы токов статора АД, работающего в двигательном режиме, в осях dq.

I_{ld_m1} – реактивная составляющая тока статора, А, I_{lq_m1} – активная, А



Необходимо отметить еще ряд особенностей модели, часть из которых хотя и должны быть очевидны для специалистов в области электропривода, однако авторы обратили на них внимание только на этапе отладки модели, после первых неудачных численных экспериментов:

1. После выполнения прямых координатных преобразований из осей dq в $\alpha\beta$ необходимо вектор сигнала управления напряжением повернуть на -90° , как показано на векторной диаграмме на рис. 5 (из U'_1 в U_1). Поскольку ось d является реактивной, она направлена на комплексной плоскости противоположно мнимой оси $+j$. Ось q является активной и направлена вдоль вещественной оси $+1$.
2. На нашей кафедре принято использовать эквивалентную двухфазную модель АД с учетом коэффициента согласования, выбираемого по условию сохранения мгновенной мощности [5] (2.13)

$$k_c = \sqrt{\frac{3}{2}}$$

И пересчитать с его учетом величины всех переменных. Соответственно, для нас было ▶

Рис. 9. Диаграммы токов статора АД, работающего в генераторном режиме, в осях dq . I_{1d_g1} – реактивная составляющая тока статора, А, I_{1q_g1} – активная, А

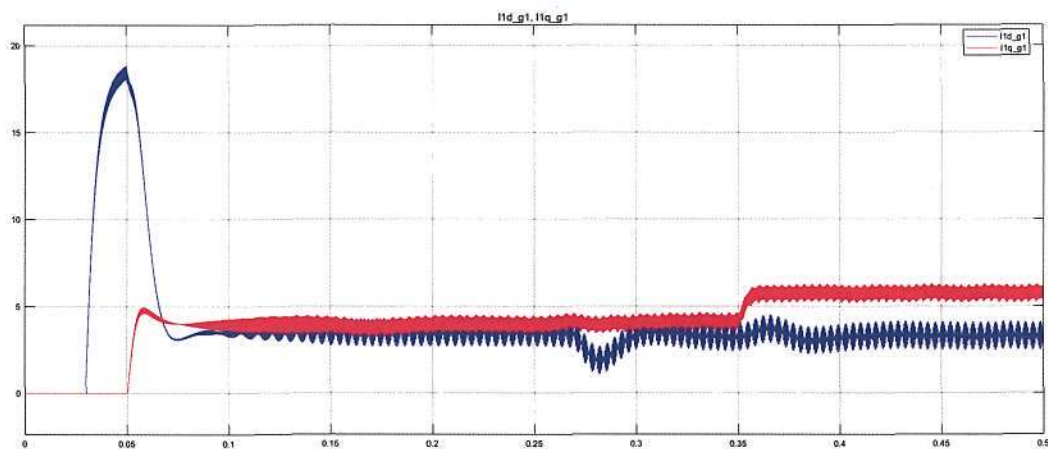


Рис. 10. Диаграммы мощностей АД, работающего в двигательном режиме. S_{m1} – полная мощность, ВА, P_{m1} – активная мощность, Вт, Q_{m1} – реактивная мощность, ВАр, P_{m_m1} – механическая, Вт

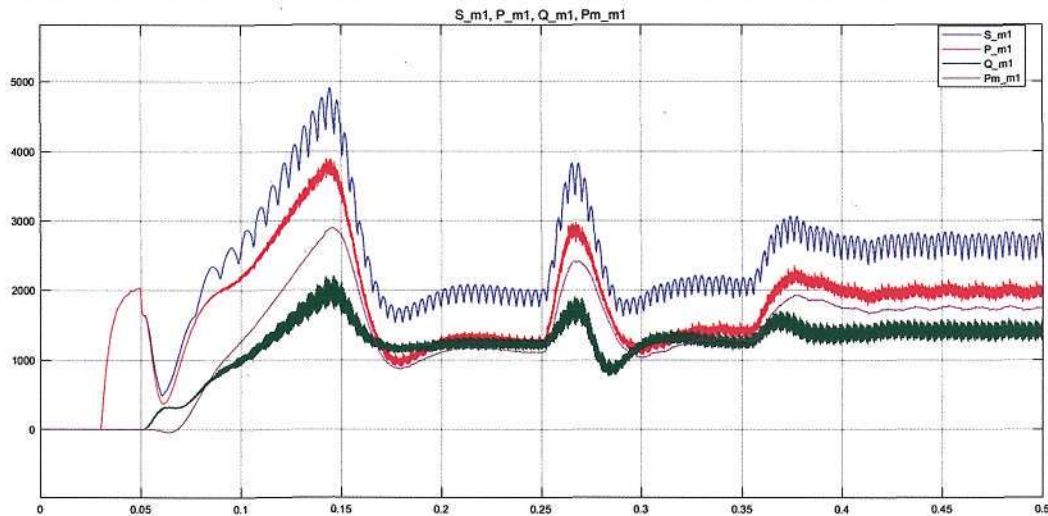
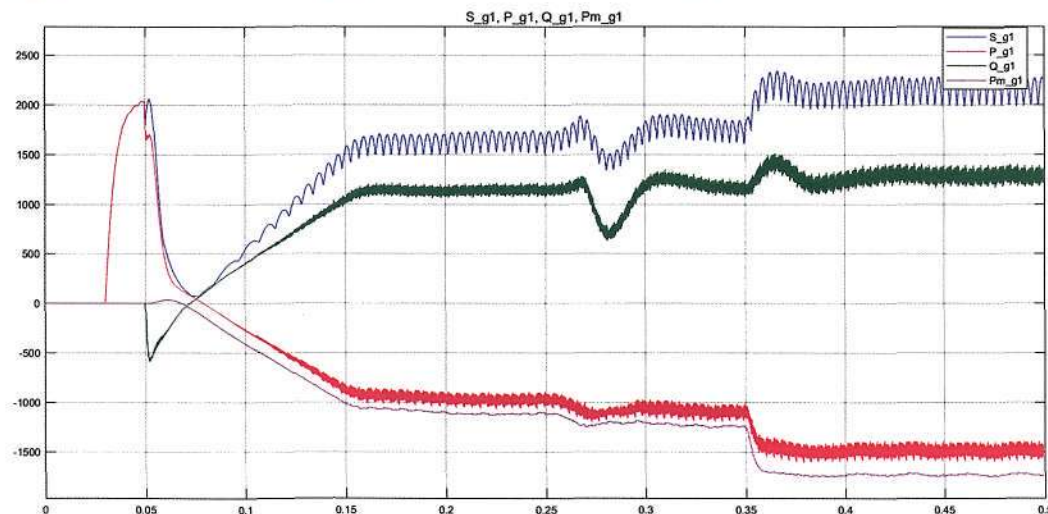


Рис. 11. Диаграммы мощностей АД, работающего в генераторном режиме. S_{g1} – полная мощность, ВА, P_{g1} – активная мощность, Вт, Q_{g1} – реактивная мощность, ВАр, P_{m_g1} – механическая, Вт



неожиданностью то, что блок MATLAB Simulink, представляющий АД «Asynchronous Machine SI Units», двухфазные переменные отдает в масштабе реальной трехфазной машины. В связи с этим в подмоделях измерений «Измерения» напряжения, токи и потокосцепления умножаются на k_c .

3. При расчете активной и реактивной мощностей для АД, работающего в режиме генератора, фазовый сдвиг между напряжением и током необходимо брать с обратным знаком, поскольку он вращается в обратном направлении.

В процессе отладки модели пришлось точку ослабления поля (снижение сигнала задания потокосцепления при переходе регулирования во 2-ю зону) снизить со 100% до 95% от номинальной скорости. Это вызвано тем, что при номинальной скорости и номинальном моменте нагрузки достигалось ограничение сигнала управления инвертором – 1 о.е. Скорее всего, это обусловлено тем, что при разработке пособия [5] при выводе формул номинальных значений потокосцеплений (2.11) и (2.12)

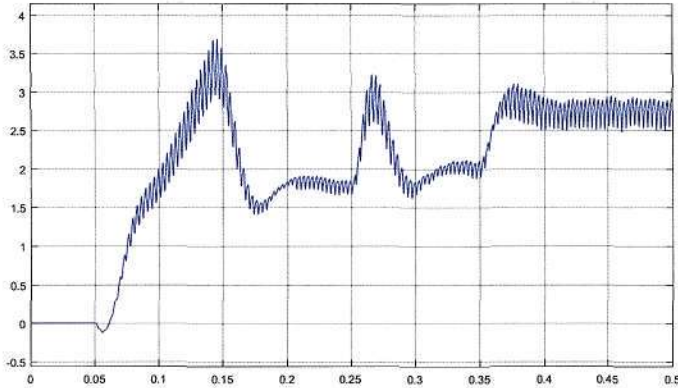
$$\Psi_{1H} = \frac{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_H}\right)^2 + \left[\frac{R_1 \cdot R_2}{x_\mu \cdot s_H} - (x_1 + x_2)\right]^2}} \cdot \frac{U_H}{\omega_{0ЭЛ}}$$

$$\Psi_{2H} = \frac{\frac{R_2}{s_H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_H}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \cdot \Psi_{1H}$$

с целью упрощения выражений было введено пренебрежение некоторыми составляющими из-за их малости.

Нами анализировались следующие процессы: пуск стэнда до скорости 90% от номинальной с нагрузкой 50% от номинального момента; увеличение скорости до номинальной; наброс нагрузки до 60% от номинальной. Диаграммы процессов приведены на рис. 6 – 13.

Рис. 12. Диаграмма тока, протекающего между промежуточными цепями постоянного тока, А



Динамические показатели переходных процессов близки к ожидаемым. На рис. 14 приведена функциональная схема стенда с указанием мощностей в различных частях стенда. Мощности показаны для момента времени, когда скорость вращения равна номинальной и нагрузочный момент равен 50% от номинального. Расхождение балансов мощностей со стороны сети в пределах 6% вызвано неточной син-

хронизацией моментов времени, для которых снимались показания с диаграмм. Видно, что из сети потребляется около 25% от механической мощности на валах АД.

В планах на будущее: дискретизация систем управления; доработка модели за счет разработки собственной модели механической части с учетом механических потерь в агрегате стенда.

Рис. 14. Функциональная схема стенда с указанием мощностей в различных частях стенда

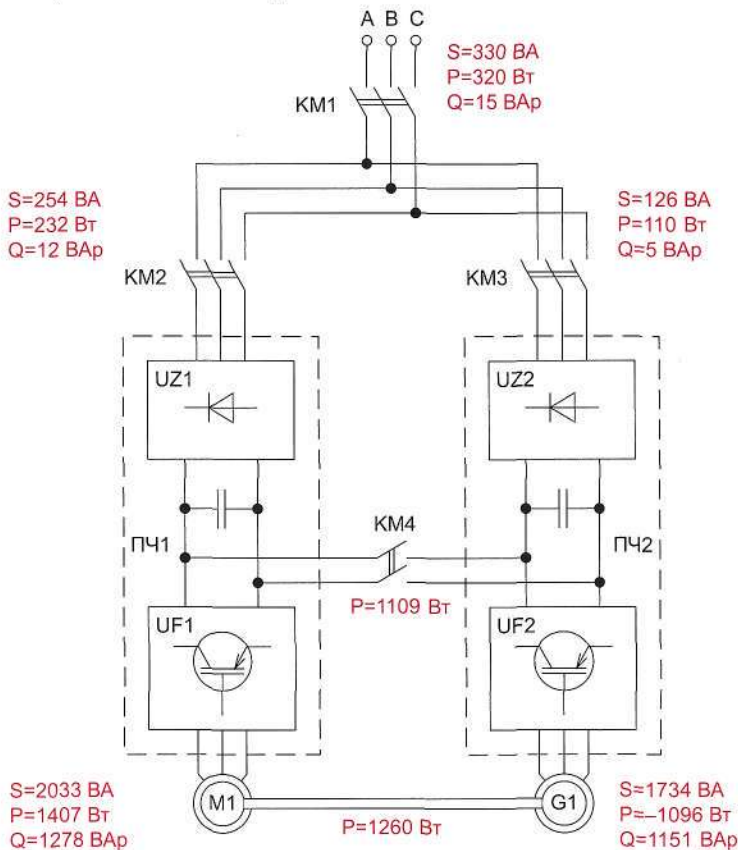
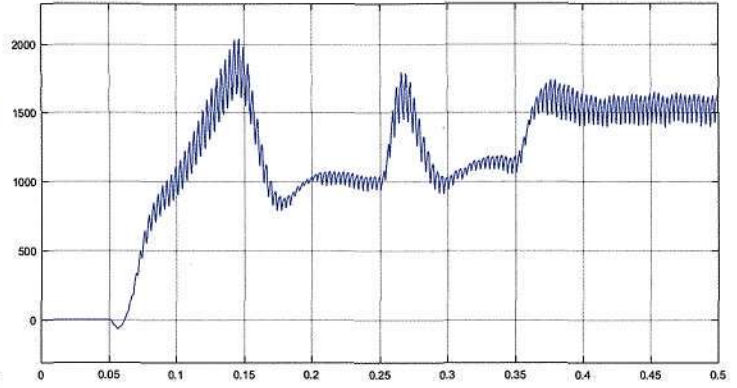


Рис. 13. Диаграмма мощности, рекуперированной между промежуточными цепями постоянного тока, Вт



Выводы

Разработана имитационная модель электромеханического испытательного стенда на основе асинхронных электродвигателей, управляемых преобразователями частоты с векторным управлением и взаимной нагрузкой по промежуточной цепи постоянного тока. Модель позволяет анализировать динамические и энергетические процессы в стенде и может быть использована для оценки потенциала энергосбережения как при выполнении проектов таких новых стендов, так и при модернизации существующих. Выполненный расчет для двигателей мощностью 2,2 кВт показывает, что из сети без учета механических потерь потребляется всего 25% от мощности на валах двигателей. Вышеприведенные расчеты подтверждают высокий потенциал энергосбережения подобных стендов, что является актуальным при проведении приемосдаточных и послеремонтных испытаний.

Литература

- Захаренко, В.С. Инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / В.С. Захаренко; ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2000. – 21 с.
- Захаренко, В.С. Динамика инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / В.С. За-

харенко, И.В. Дорошенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. №4. – С. 25–33.

3. Авилов, В.Д. Математическое моделирование метода взаимной нагрузки при испытании асинхронных двигателей / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Вестник СибАДИ. – 2013. – №5 (33). – С. 75–81.

4. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

5. Захаренко, В.С. Системы управления электроприводами для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневн. и заочн. форм обучения / авт.-сост. В.С. Захаренко, И.В. Дорошенко. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – 59 с.

6. Фираго, Б.И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пособие / Б.И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с. ■

Статья поступила в редакцию 3.07.2019.

Мы писали:

Дорошенко И.В., Погуляев М.Н., Савельев В.А., Тодарев В.В. Энергоэффективные испытательные стенды. – «Энергоэффективность». – 2018. – №9. – С. 26–30.