

Г.И. МЕЛЬНИКОВ, канд. тех. наук, доц. НТУ «ХПИ»;
А.О. КОРОТКОВ, асп. НТУ «ХПИ»;
А.В. СЕМИКОВ, асп. НТУ «ХПИ»;

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА НА БАЗЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть. Выполнен синтез системы управления машины постоянного тока и автономного инвертора напряжения, позволяющей управлять моментом нагрузки ДВС независимо от скорости вала и реактивной мощности сети. Построена компьютерная модель всей системы. Проведено компьютерное моделирование испытаний ДВС в режимах, как поддержании постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, автономный инвертор напряжения, машина постоянного тока.

Введение. Современный испытательный стенд нагрузки двигателя внутреннего сгорания (ДВС) должен удовлетворять высоким требованиям, предъявляемым к управляемости, энергосбережению, в том числе обеспечивать инвариантность скорости и момента относительно друг друга при достаточно больших диапазонах регулирования, соответствующих режимам испытаний ДВС, и отдавать в сеть энергию, вырабатываемую ДВС.

Цель статьи. Построить систему управления и смоделировать работу нагрузочного стенда испытания двигателей внутреннего сгорания, а так же получить его энергетические показатели испытательного стенда.

Основные материалы исследования. Рассматриваемый в работе стенд выполнен на основе машины постоянного тока (МПТ), превращающей механическую энергию ДВС и нагружая его, в электрическую энергию, передаваемую в сеть с помощью автономного инвертора напряжения (АИН). Функциональная схема показана на рис. 1.

© Г.И. Мельников, А. О. Коротков, А. В. Семиков. 2014

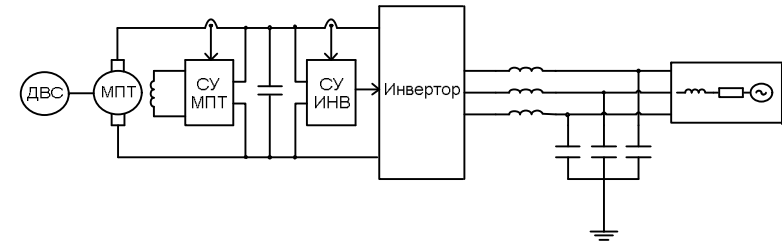


Рис 1 – Схема испытательного стенда на базе МПТ и АИН.

АИН, как и реверсивный тиристорный преобразователь (ТП), используемый в ряде нагрузочных комплексов, может передавать в промышленную сеть предприятия вырабатываемую ДВС энергию, что частично экономит средства и энергоресурсы, затраченные на испытания ДВС.

Достоинством АИН, перед РТП, является возможность независимого регулирования активной и реактивной мощностей, гармонического состава тока потребляемого или генерируемого преобразователем.

Вращающий момент нагрузки ДВС ($M_{ДВС}$) определяется электромагнитным моментом двигателя ($M_{Эл.М}$), механическими потерями ($M_{тр}$) и динамическим моментом в соответствии с уравнением механического баланса.

$$M_{Эл.М} + M_{ДВС} - M_{тр} = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1)$$

Электромагнитный момент двигателя пропорционален произведению тока якоря ($I_я$) и магнитного потока возбуждения ($\Phi_в$).

$$M_{Эл.М} = k\Phi_в I_я; \quad (2)$$

Учитывая ограничение напряжения якоря сверху допустимым значением, определяемым изоляцией обмотки МПТ, и снизу минимальным напряжением, обеспечивающим возможность передачи энергии инвертором в сеть. Управление моментом МПТ осуществляется при поддержании постоянного напряжения якоря с изменением потока возбуждения.

Для этого синтезирована система управления подчиненного регулирования (СПР). Она включает в себя контур регулирования тока якоря, с подчиненным ему контуром регулирования потока возбуждения. В обоих контурах используется пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, настроенный на модульный оптимум.

В СПР внутренний контур управляет потоком возбуждения, рассчитывая напряжение питания (U_B) обмотки возбуждения исходя из требуемого потока возбуждения (Φ_B) и уравнения цепи возбуждения. Компьютерная модель показана на рис. 2.

$$\Phi_B = f(I_B); \quad (3)$$

$$U_B = R_B I_B + L_B \frac{dI_B}{dt}; \quad (4)$$

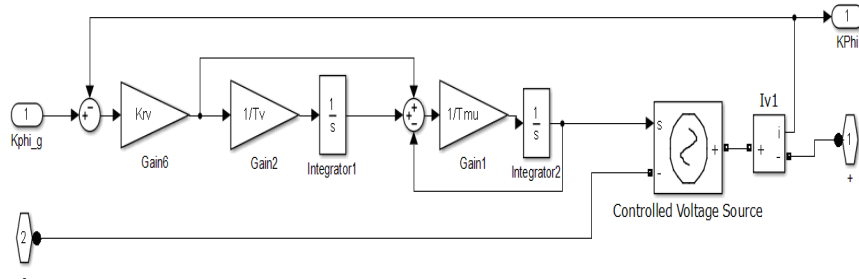


Рис 2 – Контур регулировки тока возбуждения МПТ.

Им управляет контур регулирования тока якоря (I_A) рассчитывающий требуемый поток возбуждения (Φ_B) по скорости вращения якоря (ω) в соответствии с требуемым током якоря по уравнению якорной цепи.

$$E_A = k\Phi_B \omega; \quad (5)$$

$$U_A = E_A + R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt}; \quad (6)$$

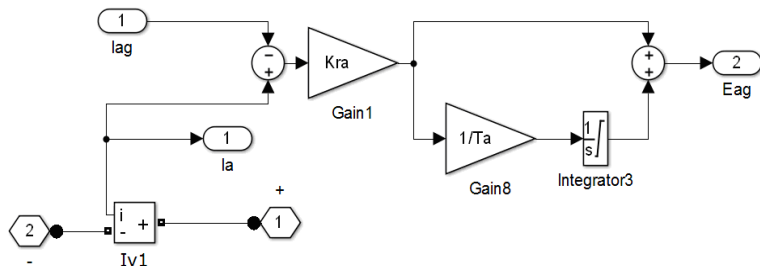


Рис 3 – Контур регулировки тока якоря МПТ.

Требуемый ток якоря (I_A) рассчитывается по заданному моменту в соответствии с режимом испытания ДВС.

Напряжение якоря поддерживается регулированием тока преобразователя с помощью ПИ регулятора напряжения якоря с компенсацией тока якоря. Компьютерная модель показана на рис. 4.

$$I_A + I_{np} = \frac{1}{C} \frac{dU_A}{dt}; \quad (7)$$

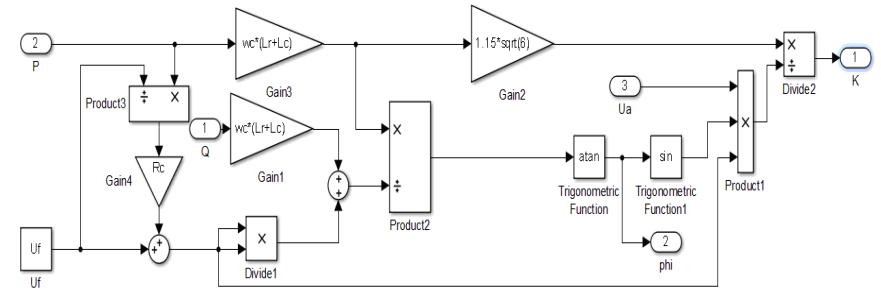


Рис 4 – регулятор напряжения якоря.

Ток преобразователя (I_{np}) поддерживается на заданном уровне за счет регулирования активной мощности (P_{np}) передаваемой в сеть.

$$P_{np} = I_{np, \text{жел}} \cdot U_A; \quad (8)$$

Рассчитанная активная мощность и требуемая реактивная мощность (Q), определяемая условиями эксплуатации стенда, задаёт коэффициент модуляции преобразователя (K) и угол опережения (γ) напряжения относительно сети. Компьютерная модель показана на рисунке 5.

$$K = \frac{\omega_c LP \cdot 1,16\sqrt{6}}{U_\phi \cdot U_A \cdot \sin \gamma}; \quad (9)$$

$$\gamma = \arctg \frac{\omega_c LP}{U_\phi^2 - \omega LQ}; \quad (10)$$

где ω_c – частота сети, L – индуктивность дросселей фильтра.

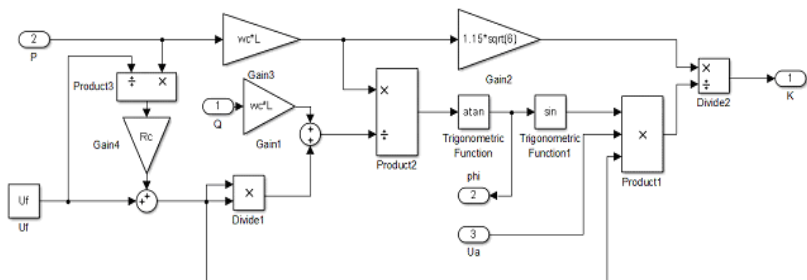


Рис 5 – Блок расчета параметров АИН.

В качестве модели АИН, показанной на рис 6, использованы имеющиеся в библиотеке SimPowerSystems программы Matlab блоки: PWM generator, Universal Bridge, Subsystem, генерирующий трехфазное синусоидальное напряжение по заданным коэффициенту модуляции, частоты, углу сдвига и текущего значения времени.

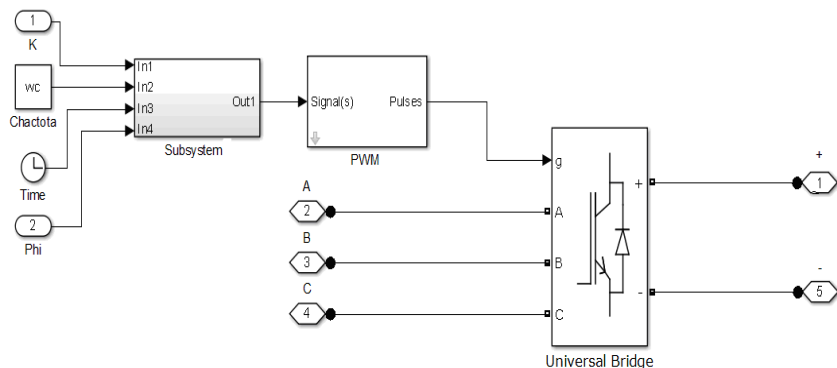


Рис. 6 – Схема АИН.

Подсистема Subsystem производит расчёт мгновенных значений фазных напряжений.

$$u_A = K_m U_m \sin(\omega t + \gamma); \quad (11)$$

$$u_B = K_m U_m \sin((\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \gamma); \quad (12)$$

$$u_C = K_m U_m \sin((\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \gamma); \quad (13)$$

Двигатель внутреннего сгорания в модели представлен в виде статической зависимости вращающего момента от положения заслонки и скорости вращения вала, взятой из модели gasoline engine, существующей в библиотеке Simulink программы Matlab.

Используя вышеуказанные математические зависимости, была синтезирована компьютерная модель стенда в библиотеке Simulink программы Matlab, показанная на рис 7.

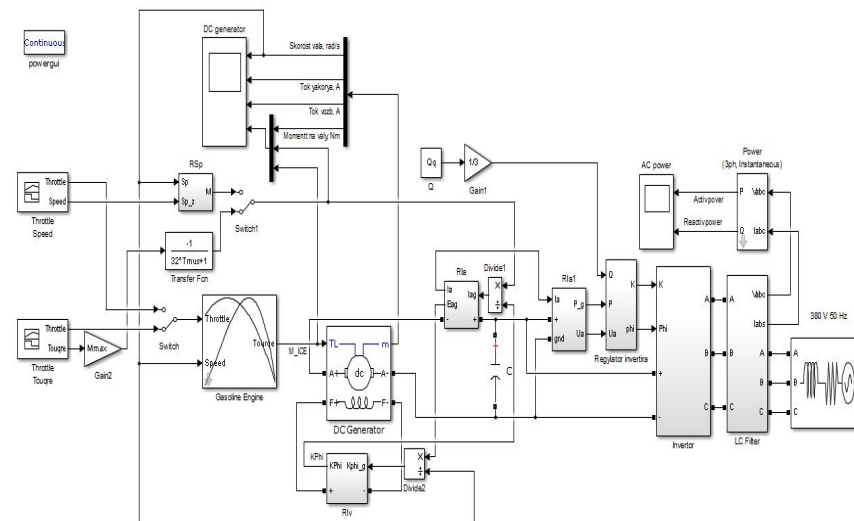


Рис 7 – Компьютерная модель испытательного стенда.

С целью проверки работоспособности синтезированной системы управления, установления диапазона регулирования и энергоэффективности стенда на разработанной компьютерной модели, было проведено два эксперимента:

- нагрузка ДВС моментом в соответствии с заданной временной зависимостью;
- отработка заданной тахограммы скорости вала;

Экспериментально моделирование производилось с ДВС номинальной мощностью 150 л.с. и машиной постоянного тока 100 кВт,

частота вращения вала при максимальном моменте составляет 5000 об/мин, максимальная частота 8000 об/мин.

В первом эксперименте испытываемый ДВС нагружался на 25, 50, 75, 100 % от номинального момента ДВС при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие временные зависимости скорости, ток якоря и ток возбуждения МПТ, показанные на рис.8, и мощностей механической, возбуждения и в звене постоянного тока показана на рис. 9, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 10, и фазных токов показанных на рис 11

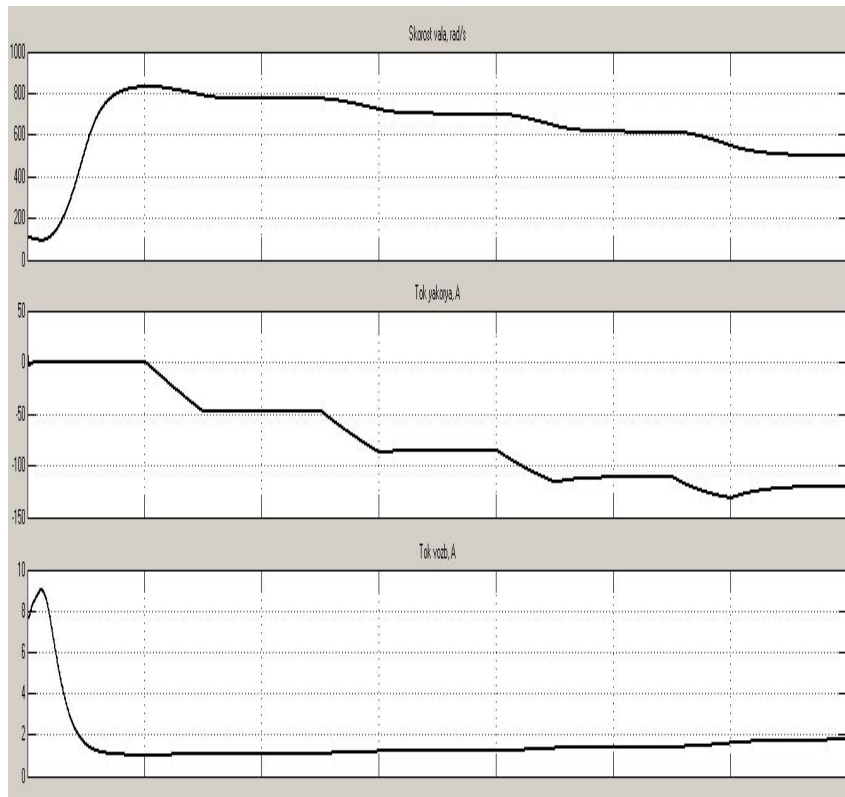


Рис 8 – Временны зависимости частоты вала, тока якоря и тока возбуждения МПТ в первом эксперименте.

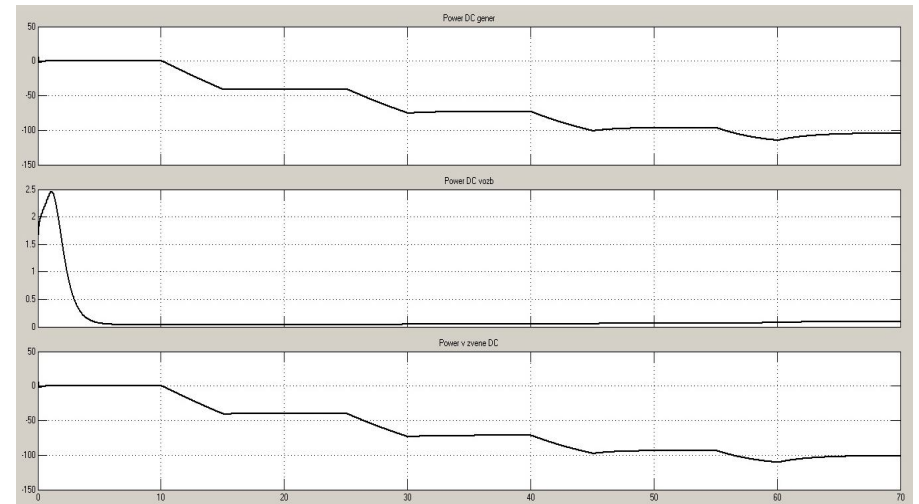


Рис 9 – График изменения механической мощности, мощности возбуждения и мощности в звене постоянного тока.

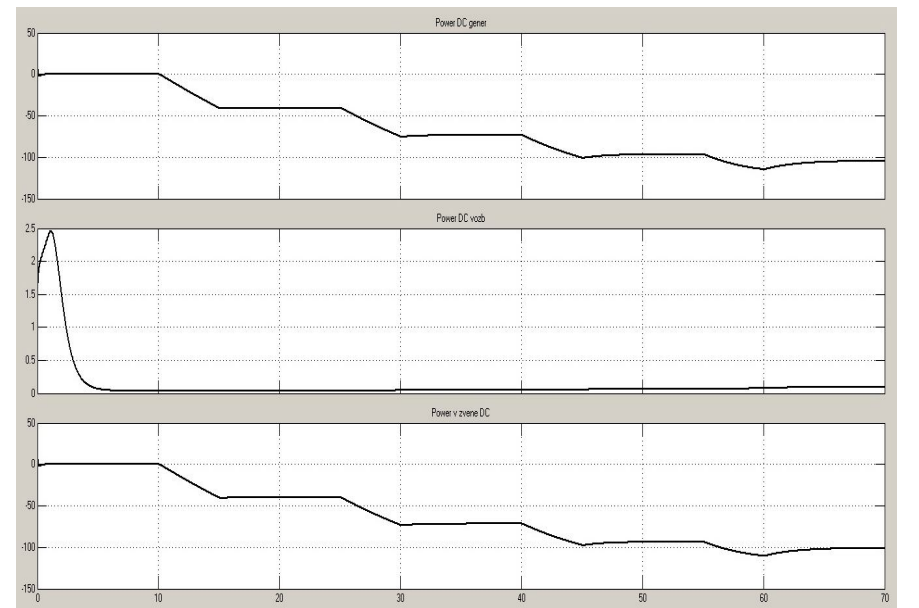


Рис 10 –График передаваемой активной и реактивной мощности

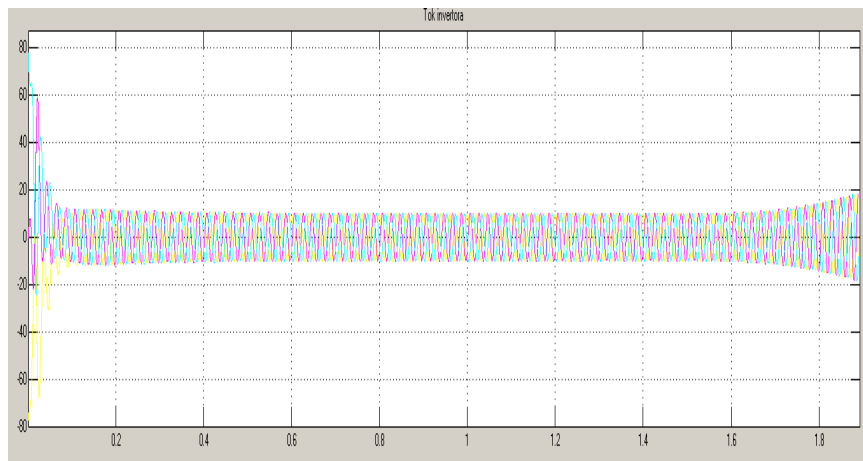


Рис 11 – График формы фазных токов.

Из графиков видно, что система обрабатывает заданную временную зависимость момента нагрузки ДВС при этом полученные значения мощности соответствуют ожидаемым результатам и внесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения мощностей в различных участках цепи в первом эксперименте.

Момент ДВС, %	Механическая мощность, кВт	Мощность возбуждения МПТ, кВт	Мощность постоянного тока, кВт	Активная мощность сети, кВт	Реактивная мощность сеть, кВар
25	41.19	0.03	40.62	40.38	5.23
50	75.15	0.04	73.29	75.6	4.94
75	100.5	0.05	97.25	96.15	4.37
100	110.8	0.06	106.8	100.5	4.07

Во втором эксперименте испытываемый ДВС работал в диапазоне частот от 2000 до 5000 об/мин, при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие временные зависимости скорости, ток якоря и ток возбуждения МПТ, показанные на рис.12, и мощностей механической, возбуждения и в звене постоянно-

го тока показана на рис. 13, а также активная и реактивная мощности, показанные на рис. 14.

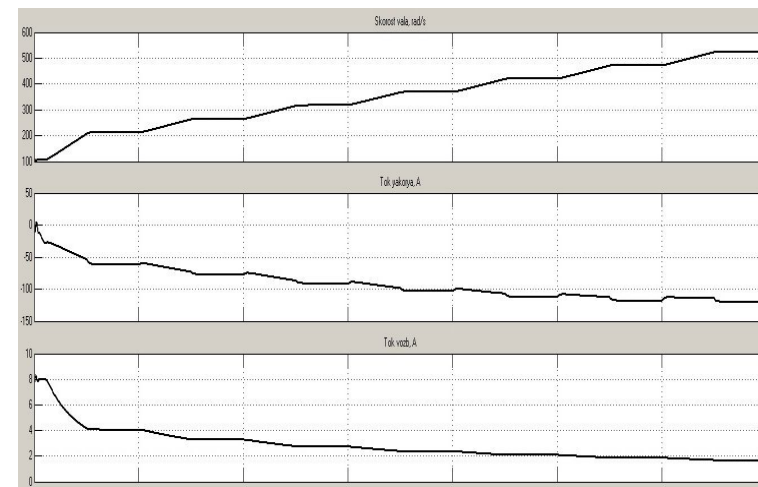


Рис 12 – Временны зависимости частоты вала, тока якоря и тока возбуждения МПТ во втором эксперименте.

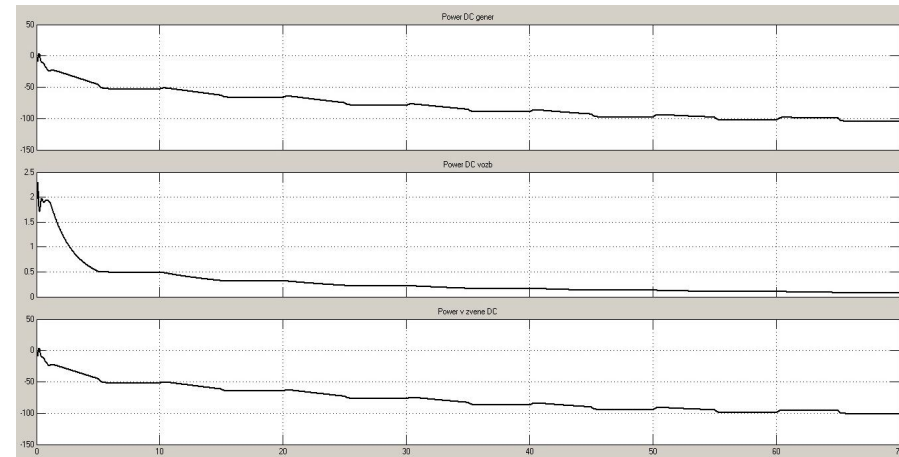


Рис 13 – График изменения механической мощности, мощности возбуждения и мощности в звене постоянного тока.

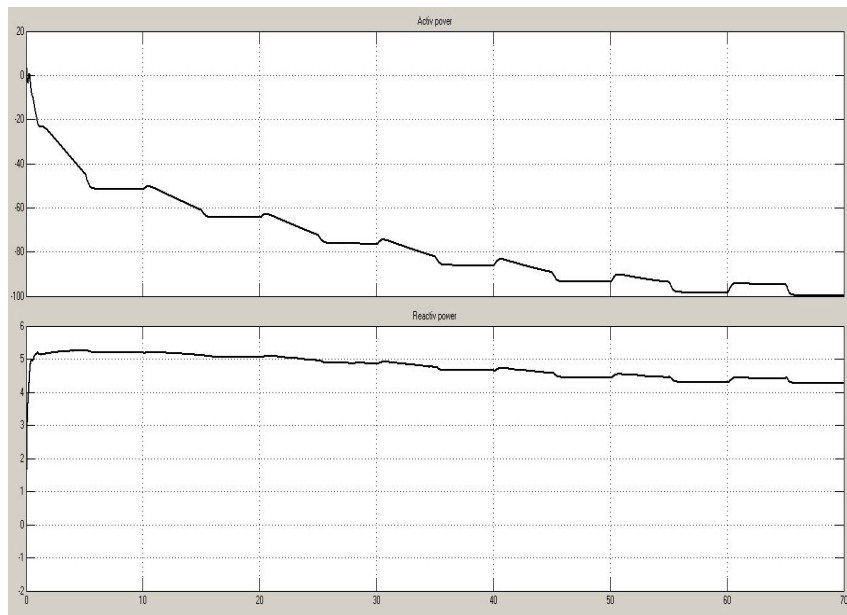


Рис 14 – График передаваемой активной и реактивной.

Из графиков видно что система обрабатывает заданную временную зависимость скоростей ДВС при этом полученные значения мощности соответствуют ожидаемым результатам и внесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения мощностей в различных участках цепи во втором эксперименте.

Частота ДВС, об/мин	Механическая мощность, кВт	Мощность возбужденные МПТ, кВт	Мощность постоянного тока, кВт	Активная мощность сети, кВт	Реактивная мощность сеть, кВар
2000	52.19	0.5	50.62	50.2	5.12
2500	70.24	0.4	68.29	60.31	5
3000	81.57	0.32	79.25	78.62	4.89
3500	91.82	0.3	86.81	88.57	4.68
4000	99.17	0.28	95.14	92.27	4.5
4500	100.12	0.26	99.56	98.76	4.3
5000	100.33	0.21	100.15	100	4.22

Вывод. Анализируя полученные результаты видно что система обрабатывает с достаточным быстродействием (порядка 0.1 с) задаваемые временные зависимости момента нагрузки и скорости ДВС, обеспечивая при этом отдачу энергии в сеть с относительно высоким КПД, около 90%.

Также моделирование подтверждают важное преимущество АИН, что форма тока вырабатываемая преобразователем имеет синусоидальную форму в отличие от случая использования ТП, а значение реактивной мощности возможно регулировать независимо от режима испытания ДВС.

Основным недостатком этого стенда, является использование МПТ, требующей обслуживания в отличие от машин переменного тока и значительно большую стоимость чем асинхронные машины, а также незначительно меньший КПД чем у машин переменного тока.

Поэтому в дальнейшем исследовании необходимо построить стенд на базе машины переменного тока и создать соответствующую математическую модель испытательного стенда. Также необходимо сравнить энергетические показатели этих стендов.

Список литературы: 1. Райков И.Я., Испытания двигателей внутреннего сгорания. И.Я. Райков. - Москва «Высшая школа» 1975 г. С 3-11 2. Тодарев В.В., Погуляев М.Н., Дорошенко И.В., Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники. / В.В. Тодарев, М.Н. Погуляев, И.В. Дорошенко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. -2007. -№4. – С.80-84. 3. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0 С.Г. Герман Галкин Санкт-Петербург «Люмена» 2006 г С 100-150

Bibliography (transliterated): 1. Raikov I.J., tests of internal combustion engines. - Moscow "High School" 1975 2 Todaro V.V., Pogulyaev M.N., Doroshenko I.V., saving electromechanical stands for testing of internal combustion engines and transmissions of agricultural machinery. Herald Gomel State. tehn. University No 4. 2007. 80-84. Print. 3 German Galkin S.G., Kompyutornoe modeling of semiconductor systems Matlab 6.0 St. Petersburg. Lumen 2006.

Поступила (received) 11.11.2014