

ПОСТРОЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО СТЕНДА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А. О. КОРОТКОВ^{1*}, А. В. СЕМИКОВ², Г. И. МЕЛЬНИКОВ¹.

¹ Кафедра «Электрические станции», НТУ ХПИ, Харьков, УКРАИНА

² Кафедра «Автоматизированных электромеханических систем», НТУ ХПИ, Харьков, УКРАИНА

*email: Aleksandr88_88@bk.ru

АННОТАЦИЯ В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе асинхронной машины с фазным ротором и автономного преобразователя напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть, получаемую от фазного ротора. Выполнен синтез системы управления асинхронной машины и автономного преобразователя 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 поддержание постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, испытание ДВС, автономный преобразователь напряжения, асинхронная машина.

CONSTRUCTION AND MODELLING ENERGY SAVING STAND ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR FOR TESTING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A. KOROTKOV^{1*}, A. SEMIKOV², G. MELNIKOV¹.

¹ Department of "Electric stations" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE

² Department of "Automated electromechanical systems" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The problem of energy efficiency testing process of internal combustion engines, as well as ways of modernization of testing equipment for internal combustion engines is considered in this paper. The proposed installation of the load for the internal combustion engines, where a braking device is an asynchronous machine with wound rotor and connected to the rotor of the asynchronous machine autonomous voltage inverter has been considered. This setting provides the energy transfer to the grid obtained from the stator and phase rotor of asynchronous generator. The synthesis of the asynchronous machine control system and independent voltage converter, which allow control the internal combustion engine load, regardless of the shaft speed and reactive power network has been performed. Synthesized control system allows compensate the reactive power in the network, regardless of the stand operation mode. A computer model of the entire test stand control system is performed. A computer simulation of the internal combustion engine test station in such modes, as maintenance of constant torque and maintenance of the constant internal combustion engine rotation speed is carried. The energy data of test stand for an internal combustion engine are obtained. Disadvantages of the test stand design are found and analyzed.

Keywords: internal combustion engines, test stands, test of ICE, autonomous voltage converter, asynchronous generator.

Введение

Испытания составляют заключительный этап сложного процесса создания и совершенствования двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В ходе испытаний ДВС подвергается нагрузкам для оценки таких показателей как: заявленная мощность, экономичность, токсичность и целый ряд других показателей. Определение вышеперечисленных показателей устанавливают путём испытания ДВС на специализированных обкаточно-тормозных стендах (ОТС). [1]

В настоящее время, на моторостроительных заводах, эксплуатируется большое количество устаревших ОТС, что увеличивает затраты денежных средств

на производство готовой продукции. Для уменьшения испытательной составляющей в цене готовой продукции, имеет смысл заменить или модернизировать устаревшие ОТС.

Современный или модернизированные ОТС 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. [2]

Анализ материалов, опубликованных в научной статье «Математическая модель нагрузочной части

испытательного стенда, инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада» [3] показал, что структура с электро-тормозом в виде асинхронного генератора с фазным ротором и подключенном в цепь ротора выпрямителем передающим энергию инвертору является наиболее энергоэффективной.

Цель работы

Построить систему управления и смоделировать работу ОТС на базе асинхронного генератора с фазным ротором, а так же оценить его энергетические показатели, полученные в ходе моделирования работы ОТС в пакете Matlab.

Изложение основного материала

Рассматриваемый в работе стенд выполнен на основе асинхронного генератора с фазным ротором (АГ), превращающей механическую энергию ДВС, в электрическую энергию, передаваемую в сеть через обмотки статора, подключённые напрямую к сети переменного тока, и с помощью автономного 3-ёх фазного мостового преобразователя напряжения (АПН), подключенного к ротору машины через промежуточный 3-ёх фазный мостовой выпрямитель напряжения (ВН). Функциональная схема показана на рис. 1.

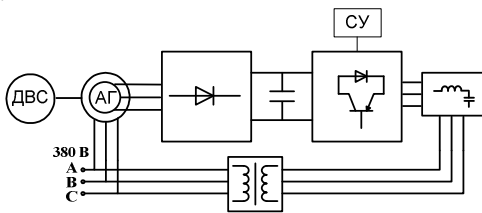


Рис. 1 – Схема испытательного стенда на базе АГ и АПН.

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.

$$M_{ДВС} - M_{Эл.М} - M_{Тр} = J \frac{d\omega}{dt}, \tag{1}$$

где $M_{Эл.М}$ — электромагнитный момент АГ,
 $M_{ДВС}$ — момент, создаваемый ДВС, приведенный к валу АГ,
 $M_{Тр}$ — момент трения,
 J — суммарный момент инерции, приведенный к валу АГ,
 ω — угловая скорость вала АГ.

Управление моментом АГ осуществляется изменением мощности, проходящей через его ротор, которая определяется из условия равенства мощностей:

$$P_P + P_{Cm} = P_M - P_{П.Р.} - P_{П.См.} \tag{2}$$

где: P_P – мощность ротора,
 P_{Cm} – мощность статора,
 P_M – мощность механическая,
 $P_{П.Р.}$ – мощность потерь в роторе и выпрямителе,
 $P_{П.См.}$ – мощность потерь в статоре.

Определение $P_P, P_{Cm}, P_{П.Р.}, P_{П.См.}$ осуществляется по токам и напряжениям с помощью блока, показанного на рис 2.

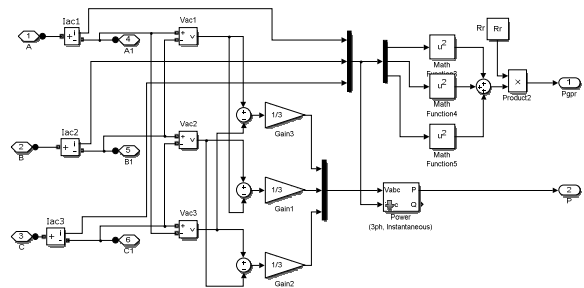


Рис. 2 – Блок определения мощности статора, ротора и мощности потерь в них

По найденной мощности и текущему значению выпрямленного напряжения ротора, а также заданной реактивной мощности рассчитывается режим работы АПН, с помощью блока, показанного на рисунке 3 и описанного в предыдущей работе [4].

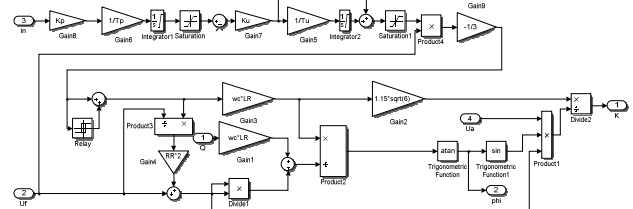


Рис. 3 – Регулятор амплитуды фазы напряжения АПН

Схема модели АПН показана на рисунке 4 и описана в предыдущей работе [3].

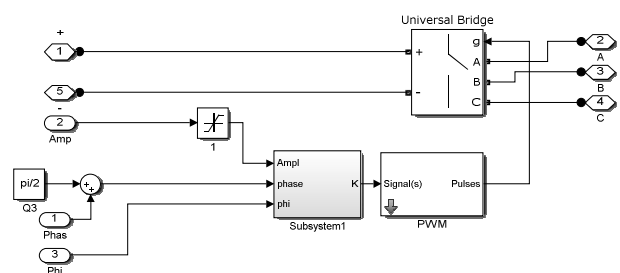


Рис. 4 – Компьютерная модель АПН

После АПН установлен фильтр для уменьшения высокочастотных составляющих тока, вызванных ШИМ. Амплитуда напряжения ротора ниже амплитуды напряжения статора, поэтому после АПН установлен повышающий трансформатор. Компьютерная модель всего стенда показана на рисунке 5, она включает в себя ДВС и электрическую сеть с активным и реактивным сопротивлением[5].

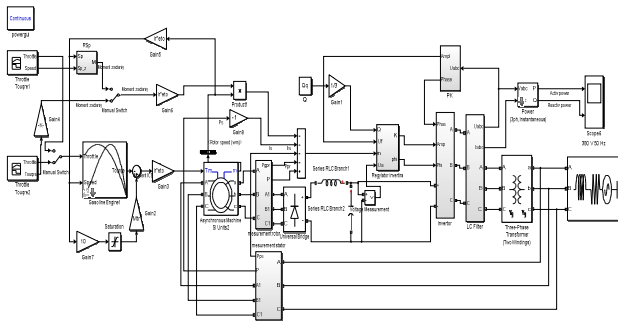


Рис. 5 – Компьютерная модель испытательного стенда.

Обсуждение результатов

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 асинхронным генератором 110 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 ходе первого эксперимента были получены следующие временные зависимости частоты оборотов вала ДВС, ток статора и ротора АГ, напряжения в звене постоянного тока инвертора, и показаны на рис.6. Также были получены энергетические характеристики стенда, такие как механическая мощность ДВС, мощность вырабатываемая статором и ротором АГ показана на рис. 7. Энергетические показатели АПН такие как активная и реактивная мощность, показанные на рис. 8.

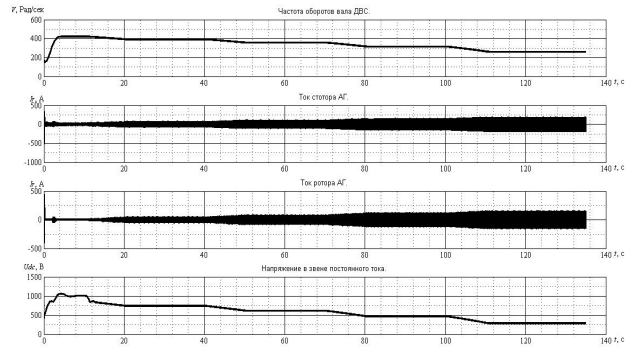


Рис. 6 – Временные зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора в первом эксперименте.

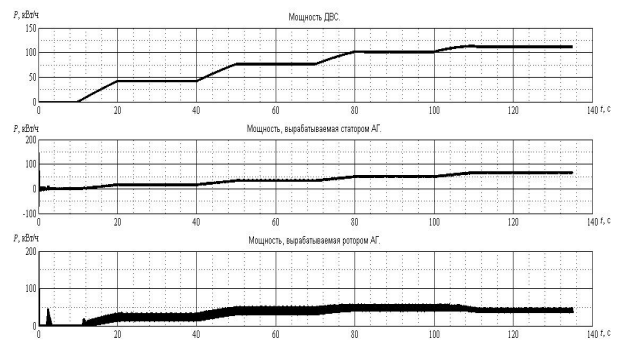


Рис. 7 – График изменения механической мощности ДВС, мощности вырабатываемой статором и ротором АГ.

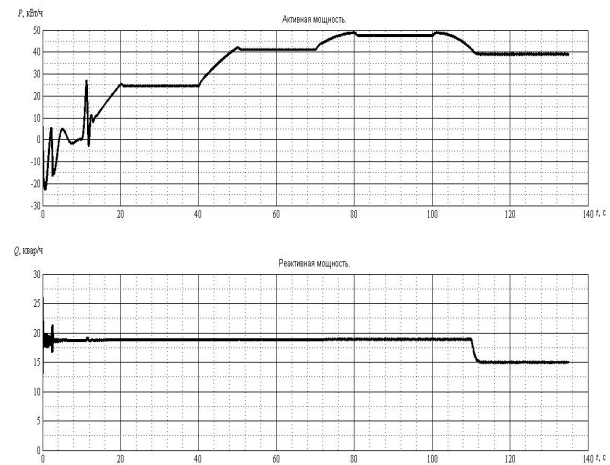


Рис. 8 – График передаваемой активной и реактивной мощности инвертором.

Из графиков видно, что система обрабатывает заданную временную зависимость момента нагрузки ДВС. В тоже время в ходе эксперимента было обнаружено что статор потребляет реактивную мощность в пределах от 20 до 30 квар., которые необходимо скомпенсировать с помощью конденсаторных бата-

рей. Полученные в ходе эксперимента энергетические показатели стенда, внесены в таблицу 1.

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

Момент ДВС, %	Механическая мощность, развиваемая ДВС, кВт	Мощность, вырабатываемая статора АГ, кВт	Мощность, вырабатываемая ротора АГ, кВт	Активная мощность, передаваемая от АПН в сеть, кВт	Реактивная мощность, потребляемая статором АГ, квар	Реактивная мощность, передаваемая от АПН в сеть, квар
25	42,12	17,78	24,8	24,5	20	18,4
50	76,3	33,2	42,2	41,1	25	18,5
75	101	49,5	48,9	47,5	30	18,6
100	109,67	66,25	41	39,05	35	15,8

Во втором эксперименте испытываемый ДВС работал в диапазоне частот от 2000 до 4500 об/мин, при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие зависимости частоты оборотов вала ДВС, ток статора и ротора АГ, напряжения в звене постоянного тока инвертора, и показаны на рис. 9. Также были получены энергетические характеристики стенда, такие как механическая мощность ДВС, мощность вырабатываемая статором и ротором АГ показана на рис 10. Энергетические показатели АПН такие как активная и реактивная мощность, показанные на рис 11.

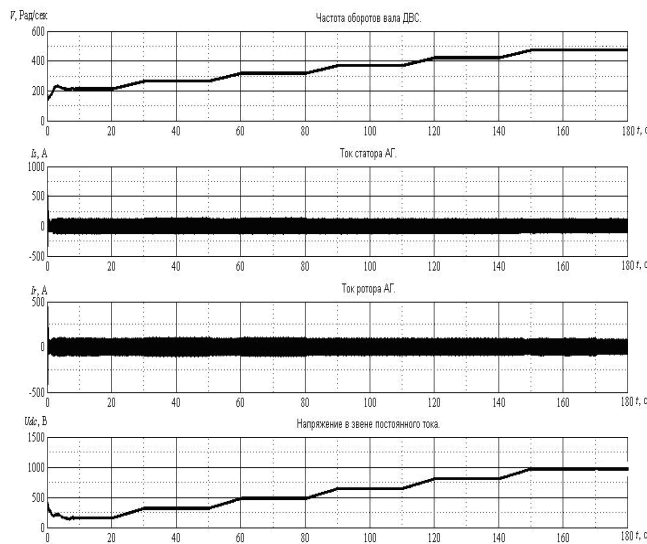


Рис. 9 – Временны зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора во втором эксперименте.

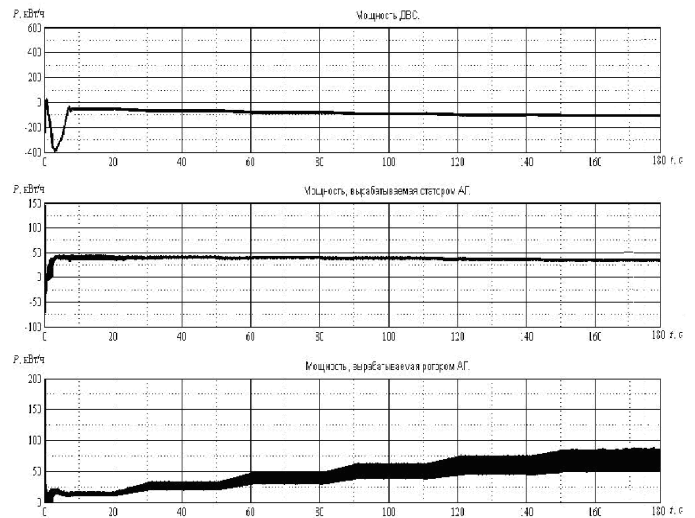


Рис. 10 – График изменения механической мощности, мощности в звене постоянного тока и разности мощностей между ДВС и инвертором.

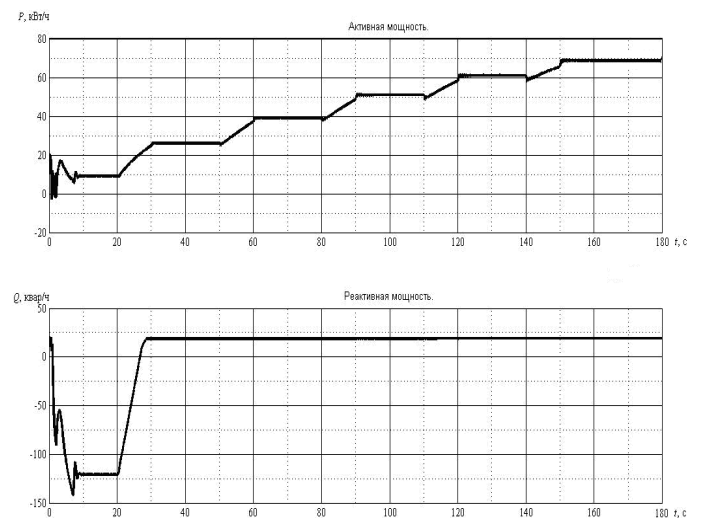


Рис. 11 – График передаваемой активной и реактивной мощности инвертором.

Из графиков видно, что данная схема обрабатывает заданную временную зависимость скорости вала ДВС в пределе регулирования от 2000 об/мин до 4500 об/мин и передаёт выработанную ДВС энергию в сеть предприятия.

При понижении частоты вала ДВС ниже 2000 об/мин АГ данного стенда переходит в двигательный режим, в тоже время при повышении частоты вала ДВС выше 4500, управление стендом становится невозможным.

Поэтому использование данного вида стенда в нагрузке ДВС по скорости [6] из-за малого предела

регулирования не имеет смысла. Так как для большинства серийных ДВС, диапазон рабочих частот вращения вала колеблется от 1500 до 5000 об/мин.

Во время моделирования работы стенда в режиме нагрузки ДВС по скорости было обнаружено, что статор потребляет реактивную мощность в пределах от 25 до 27 квар., которые необходимо компенсировать с помощью конденсаторных батарей. Полученные в ходе эксперимента энергетические показатели стенда, внесены в таблицу 2.

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

Скорость вала ДВС, %	Механическая мощность, развиваемая ДВС, кВт	Мощность, вырабатываемая статора АГ, кВт	Мощность, вырабатываемая ротора АГ, кВт	Активная мощность, передаваемая от АИП в сеть, кВт	Реактивная мощность, потребляемая статором АГ, квар	Реактивная мощность, передаваемая от АИП в сеть, квар
2000	55	40	14	13,1	27	20
2500	68,8	40,5	27,5	26,1	27	20
3000	81,7	40	40,9	39,1	26,3	21,3
3500	92,8	38,7	53,2	51,9	26,2	21,5
4000	101,4	37,1	61,5	61	25,9	21
4500	106,9	35	70,2	68,7	25,5	20

Выводы

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.

Основными недостатками этого стенда, являются предел регулирования стенда по скорости. Данная особенность стенда связана с его электротормозом, так как минимальная частота вращения в генераторном режиме составляет 1500 или один номинал, а максимальная частота вращения составляет 4500 или 3 номинала.

В тоже время необходимо компенсировать требуемый объёма реактивной мощности, потребляемой статором АГ при работе стенда. Объём реактивной мощности которую необходимо компенсировать для статора АГ варьируется от 20 до 30 квар., в зависимости от режима работы стенда.

Поэтому в дальнейшем исследовании необходимо сравнить все виды испытательных стендов, и определить какой из них является наиболее энергоэффективным.

Список литературы

- 1 Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. / И. Я. Райков // Москва «Высшая школа». – 1975. – С 3-11.
- 2 Тодарев, В. В., Погуляев, М. Н., Дорошенко, И. В., Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и транс-

миссий 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 Дорошенко, И. В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда, инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада. / И. В. Дорошенко, В. С. Захарченко, В. А. Савельев // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. – 2013. – №3 – С. 63-71.
- 4 Мельников, Г. И. Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе машины постоянного тока для испытания двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Мельников, А. О. Коротков, А. В. Семиков // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 56 (1098). – С. 106-117.
- 5 Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0 / С. Г. Герман Галкин // Санкт-Петербург «Люмена» – 2006. – С. 100-150.
- 6 ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. // Москва: Изд-во стандартов. – 1988. – 6 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 Raikov, I. J. tests of internal combustion engines, Moscow "High School", 1975, 3-11.
- 2 Todaro, V. V., Pogulyaev, M. N., Doroshenko, I. V. Saving electromechanical stands for testing of internal combustion engines and transmissions of agricultural machinery. *Journal of the Gomel State Technical University*, PO Sukhoi, 2007, 4, 80-84.
- 3 Doroshenko, I. V., Zakharchenko, V. S., Saveliev, V. A. Mathematical model of the load of the test-leg stand, invariant to the rotation speed on the basis of a-synchronous-valve cascade. *Journal of the Gomel State Technical University*, PO Sukhoi, 2013, 3, 63-71.

- 4 **Melnikov, G. I., Korotkov, A. A., Semenov, A. V.** Research energy-saving electromechanical stand-mechanically based DC machine for testing internal combustion engines. *Bulletin NTU "KhPI"*, 2014, **56**(1098), 106-117.
- 5 **German-Galkin, S. G.** Компьютерное моделирование систем Matlab 6.0. *Sankt Petersburg "Lumen"*, 2006, 36-150.
- 6 **GOST 18509-88** Tractor and combine diesel engines. Methods of bench tests. Moscow, 1988, 6 p.

Сведения об авторах (About authors)

Коротков Александр Олегович – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Электрические станции»; г. Харьков, Украина; e-mail: Aleksandr88_88@bk.ru.

Korotkov Aleksandr Olegovich – postgraduate student, department of "Electric stations" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE e-mail: Aleksandr88_88@bk.ru.

Семиков Алексей Владимирович – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Автоматизированных электромеханических систем»; г. Харьков, Украина; e-mail: aleksey_vl89@mail.ru

Semikov Aleksei Vladimirovich – postgraduate student, department of "Automated electromechanical systems" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE e-mail: aleksey_vl89@mail.ru

Мельников Георгий Игоревич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Электрические станции»; г. Харьков, Украина; e-mail: gmelnikov59@gmail.com

Melnikov Georgiu Igorevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Electric stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: gmelnikov59@gmail.com

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Коротков, А. О. Построение и моделирование энергосберегающего стенда на базе асинхронного генератора для испытаний двигателей внутреннего сгорания / **А. О. Коротков, А. В. Семиков, Г. И. Мельников** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 40-45. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

Please cite this article as:

Korotkov, A. O., Semikov, A. V., Melnikov, G. I. Construction and modelling energy saving stand on the basis of the asynchronous generator for testing of internal combustion engines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 40-45, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Коротков, О. О. Побудова та моделювання енергозберігаючого стенду на базі асинхронного генератора для випробувань двигунів внутрішнього згорання / **О. О. Коротков, А. В. Семіков, Г. І. Мельников** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, *Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 40-45. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

АНОТАЦІЯ У даній роботі розглядається випробувальна установка навантаження двигунів внутрішнього згорання, побудована на базі асинхронної машини з фазним ротором і автономного перетворювача напруги, що забезпечує передачу енергії в електромережу, що отримується від фазного ротора. Виконано синтез системи управління асинхронної машини і автономного перетворювача напруги, що дозволяє управляти моментом навантаження ДВС незалежно від швидкості вала і реактивної потужності мережі. Побудована комп'ютерна модель всієї системи. Проведено комп'ютерне моделювання випробувань ДВС в режимах, як підтримання постійного моменту, так і швидкості. Отримано енергети-етичні показники стенду випробувань ДВС.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, випробувальний стенд, автономний інвертор напруги, асинхронний генератор.

Поступила (received) 11.05.2016