

## Транспорт

УДК 62-83-52

DOI: 10.30987/article\_5bb5e6a9a91806.05242018

И.В. Дорощенко, М.Н. Погуляев, В.Б. Попов, В.А. Савельев, В.В. Тодарев

### РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассмотрены возможности применения ресурсосберегающих технологий при создании энергосберегающих электромеханических испытательных стендов, позволяющих проводить нагрузочные испытания сложной автотранспортной и сельскохозяйственной техники. Приведены наиболее перспективные с точки зрения энергосбережения схемы построения испытательных стендов. Рассмотрена

возможность создания нагрузочных устройств, способных воспроизводить на валу момент сопротивления, инвариантный по отношению к скорости вращения вала.

**Ключевые слова:** электромеханический испытательный стенд, нагрузочные испытания двигателей, энергосбережение, ресурсосбережение.

I.V. Doroshchenko, M.N. Pogulyaev, V.B. Popov, V.A. Saveliev, V.V. Todarev

### RESOURCE SAVING ELECTROMECHANICAL PLANTS FOR COMPLEX EQUIPMENT TESTS AT TRANSPORT ENGINEERING ENTERPRISES

The possibilities of resource-saving technology use at the development of energy-saving electromechanical test desks allowing the fulfillment of load tests of complex motor-car and tractor machinery are considered. The circuits of test desks formation which are the most promising from the point of view of energy-saving are shown. A possibility for the formation of

loading devices able to carry out on a shaft a resistance moment invariant with respect to a speed of shaft rotation.

**Key words:** electro-mechanical test desk, loading tests of engines, energy-saving, resource-saving.

#### Введение

Испытания новых и модернизированных единиц автотранспортной и сельскохозяйственной техники - неотъемлемая часть процесса создания сложной техники на предприятиях транспортного машиностроения. Важной частью этого процесса являются лабораторно-полевые испытания, сопровождающиеся повышенными затратами энергии и ресурсов.

Особенности создания новой и модернизации серийной автотранспортной и сельскохозяйственной техники неизбежно связаны:

- с сезонным характером натуральных испытаний;
- относительно большими затратами топливно-энергетических ресурсов;
- неизбежными контактами с природными факторами (атмосфера, растения, почва).

Кроме того, организация полевых испытаний подразумевает затраты:

- на содержание оснащенной в широких пределах станции испытаний;
- дорогостоящую (мобильную) контрольно-измерительную аппаратуру.

Решение вышеупомянутых проблем состоит в частичной замене сезонных полевых испытаний на круглогодичные стендовые испытания агрегатов, устройств, узлов и отдельных элементов машин [1].

Одним из направлений научно-практической деятельности кафедры «Автоматизированный электропривод» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» является проектирование, разработка технической документации, изготовление и модернизация энергосберегающих электромеханических испытательных стендов. Настоящая статья является попыткой обобщить накопленный опыт.

### Постановка задачи

Испытательные стенды должны:

– в ходе стендовых испытаний создавать нагрузку, соответствующую реальной по величине и характеру, с возможностью получения предельных или запредельных величин;

– быть энергосберегающими, т.е. с возможностью рекуперации (вторичного использования) затраченной в процессе испытаний энергии.

Следует отметить, что наилучшими возможностями в этих направлениях обладают электромеханические испытательные стенды, несколько хуже - электрогидравлические, наименьшие возможности - у механических испытательных стендов.

Одним из преимуществ электромеханических испытательных стендов является их энергоэффективность. Это обусловлено тем, что механическая мощность испытуемого двигателя возвращается (рекуперруется) в электрическую сеть практически полностью в виде электрической мощности, генерируемой нагружающим устройством, за вычетом обязательных потерь в элементах стенда. При этом КПД электрических машин довольно высокий - 0,8...0,9, а у статических преобразователей - еще выше, 0,95...0,98.

Другим преимуществом электромеханических испытательных стендов является их быстрдействие. Особенно это важно, когда речь идет о воспроизведении динамических нагрузок.

### Схемы построения испытательных стендов

Стенды для испытаний двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на базе электрической машины постоянного тока (МПТ) обеспечивают два режима: холодной обкатки (в этом случае МПТ работает в двигательном режиме) и горячей обкатки (МПТ работает в генераторном режиме, нагружая испытуемый ДВС) (рис. 1а).

Управляемый преобразователь (УП) обеспечивает регулирование и стабилизацию технических и технологических показателей работы стенда при холодной и горячей обкатке, причем в последнем случае

Ещё одним важным преимуществом электромеханических испытательных стендов является возможность реализовать различные законы изменения нагрузки, что делает испытательный стенд универсальным.

Важной особенностью электромеханических испытательных стендов является возможность их модульной компоновки, что снижает капитальные затраты и позволяет реализовать режим нагружения объекта путем перекомпоновки и объединения стендов, получая широкий диапазон регулирования по величине и характеру нагрузки. И хотя сам электромеханический стенд испытаний уникален, реализован под конкретный объект, использование серийных электродвигателей, генераторов и преобразователей обуславливает его сравнительно низкую стоимость.

Естественно, не все виды испытаний могут быть реализованы с помощью электромеханических стендов, применяются и электрогидравлические и механические стенды на указанных принципах. Область применения электрогидравлических стендов – статические нагрузки.

Стендовые испытания можно проводить круглогодично, а работа на предельных нагрузках позволит в короткие сроки определить реальные показатели и возможности узлов машин.

При всем разнообразии электромеханических испытательных стендов их можно разделить на несколько групп.

- обеспечивая рекуперацию генерируемой электрической энергии в сеть.

Коэффициент полезного действия при рекуперации:

$$\eta = \eta_m \eta_{уп},$$

где  $\eta_m$  - КПД машины постоянного тока;  $\eta_{уп}$  - КПД управляемого преобразователя.

В испытательном стенде на базе асинхронной машины с фазным ротором (АМФР) холодная обкатка осуществляется в двигательном режиме работы АМФР, горячая - в генераторном, при скорости вращения вала АМФР выше синхронной (рис. 1б). Введение в цепь ротора согла-

сующего элемента (СЭ) позволяет в обоих случаях возвращать в сеть часть активной мощности ( $P_{хол2}$ ,  $P_{гор2}$ ). Схемно СЭ пред-

ставляет собой ведомый сетью инвертор с промежуточным выпрямителем - асинхронно-вентильный каскад.

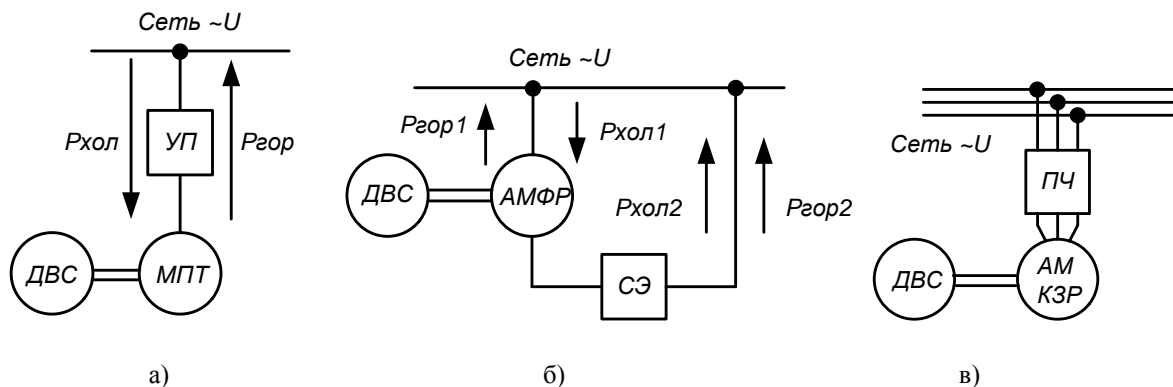


Рис. 1. Функциональные схемы стендов для испытания двигателей внутреннего сгорания: а - на основе машины постоянного тока; б - на основе асинхронной машины с фазным ротором; в - на основе короткозамкнутой асинхронной машины; ДВС – испытуемый двигатель внутреннего сгорания; МПТ – машина постоянного тока; АМФР – асинхронная машина с фазным ротором; АМКЗР – асинхронная машина с короткозамкнутым ротором; УП – управляемый преобразователь; СЭ – согласующий элемент; ПЧ – преобразователь частоты;  $P_{хол}$  – мощность в режиме холодной обкатки;  $P_{гор}$  – мощность в режиме горячей обкатки

В испытательном стенде на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АМКЗР) управление работой АМКЗР в режимах холодной и горячей обкатки осуществляется преобразователем частоты (ПЧ), имеющим, так же как и АМКЗР, высокие энергетические характеристики (рис. 1в). При наличии в составе ПЧ устройства рекуперации возврат энер-

гии в сеть в режиме горячей обкатки осуществляется на всем диапазоне рабочих скоростей. Недостаток такой схемы - высокая стоимость ПЧ.

Стенды для испытания редукторов и других элементов трансмиссий строят в основном по схемам, представленным на рис. 2.

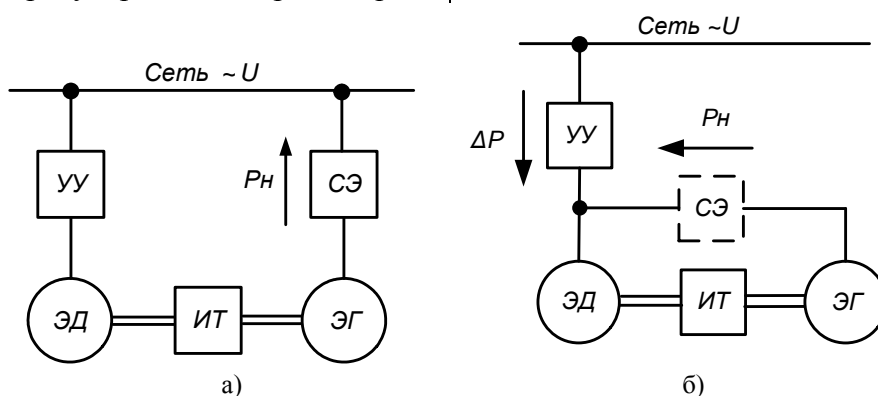


Рис. 2. Функциональные схемы стендов для испытания трансмиссий, редукторов и т.п.: а - с рекуперацией энергии в сеть; б - по схеме взаимной нагрузки; УУ – управляющее устройство; ЭД – приводной электродвигатель; ЭГ – нагружающий электрогенератор; СЭ – согласующий элемент; ИТ – испытуемая трансмиссия

На рис. 2б представлен вариант построения стенда по схеме взаимной нагрузки электрических машин [2]. Такое схемное решение является предпочтительным, поскольку из сети потребляется лишь часть мощности нагрузки, равная потерям

мощности  $\Delta P$  в двигателе, генераторе, испытуемой трансмиссии и согласующих элементах. В этом случае номинальная мощность управляющего устройства (УУ) выбирается исходя из суммарных потерь мощности в элементах стенда и для ряда

схем, например «двигатель постоянного тока - генератор постоянного тока», СЭ не требуется.

Стенды для испытания электрических двигателей и генераторов имеют такую же функциональную схему (рис. 2), что и стенды для испытания трансмиссий. Трансмиссия же в данном случае выполняет роль элемента, согласующего механические параметры электрических машин.

Наиболее часто применяемые сочетания силовых электрических машин для данного типа стендов:

– двигатель постоянного тока - генератор постоянного тока;

– асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором - генератор постоянного тока;

– асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором - асинхронный двигатель с фазным ротором.

Основным элементом испытательного стенда является нагрузочное устройство (НУ), обеспечивающее имитацию различных эксплуатационных режимов работы механизмов.

Условия и режимы работы сельскохозяйственной техники имеют широкий спектр, при этом на валу двигателя могут присутствовать различные типы моментов сопротивления.

### Обеспечение инвариантности момента сопротивления

Для проведения научных исследований, работ по наладке и испытаниям приводов и механизмов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям их эксплуатации, в состав испытательного комплекса входит устройство для физического моделирования нагрузок, способное воспроизводить на валу испытуемого двигателя широкий спектр характерных нагрузочных воздействий или сочетать несколько видов нагрузок [3].

Таковыми нагрузками могут быть:

– момент, не зависящий от координат движения,  $M_c = \text{const}$ ;

– момент, зависящий от угла поворота (пройденного пути),  $M_c = f(\varphi)$ ;

– момент, зависящий от скорости вращения,  $M_c = f(\omega)$  (к этому моменту относятся момент сухого трения  $M_c = M_{\text{sign}}(\omega)$ , момент вязкого трения  $M_c = k\omega$ , вентиляторный момент  $M_c = k\omega^2$ );

– момент, зависящий от ускорения (динамический момент),  $M_d = f(\varepsilon)$ ;

– момент, зависящий от времени,  $M_c = f(t)$ .

Например, при движении техники по ровной поверхности с постоянной скоростью двигатель преодолевает нагрузку типа сухого трения, величина которой зави-

сит от массы техники, а знак - от направления движения.

При ускорении и замедлении техники, в соответствии с уравнением движения, двигатель испытывает динамическую нагрузку, величина которой пропорциональна ускорению (замедлению) и моменту инерции на валу двигателя.

С целью приближения условий проведения лабораторных исследований и стендовых испытаний к реальным условиям эксплуатации приводов и механизмов в составе испытательного стенда необходимо иметь устройство, позволяющие воспроизводить на валу исследуемого привода вращательного движения требуемый характер нагрузки - физическую модель нагрузки.

Нагружающее устройство представляет собой систему автоматического управления статическими и динамическими механическими параметрами нагрузки. Устройство рассматривается как система стабилизации заданной функции момента. Сигнал задания момента, соответствующий требуемому виду нагрузки, формируется управляющим блоком на основании поступающей в него информации (скорость, пройденный путь, время и т.п.).

При этом частота вращения испытуемого приводного механизма выступает в качестве возмущающего воздействия, поскольку она препятствует поддержанию требуемого закона изменения момента на-

грузки. Для повышения статической и динамической точности применяется принцип инвариантности по отношению к возмущающему воздействию – скорости вращения вала – во всем диапазоне нагрузок.

Основными требованиями к такого рода устройствам являются максимальное быстродействие, минимальное перерегулирование, высокая статическая и динамическая точность.

На рис. 3 приведен один из вариантов функциональной схемы испытательного стенда с устройством для управления сис-

темой нагружения на основе МПТ, электромеханическим преобразователем и системой управления приводным электродвигателем [4].

Устройство 1 управления системой нагружения испытательного стенда, функционально связанное с электромеханическим преобразователем 2 и системой 3 управления приводным электродвигателем ЭД, содержит задатчик момента (ЗМ), регулятор момента (РМ), управляемый преобразователь (УП<sub>2</sub>), датчик тока (ДТ<sub>2</sub>) и датчик скорости (ДС).

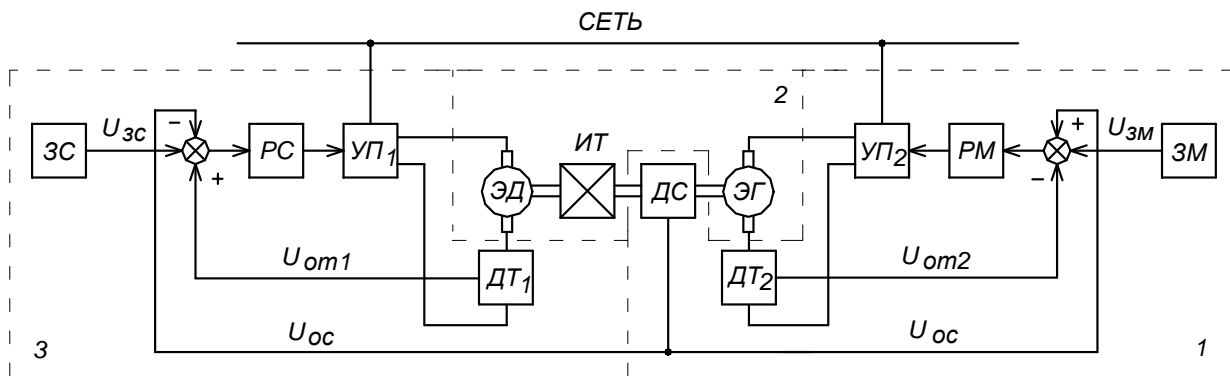


Рис. 3. Функциональная схема универсального испытательного стенда с рекуперацией энергии в сеть

В системе регулирования момента нагрузочного генератора ЭГ производится сравнение сигнала задания момента  $U_{ЗМ}$  и сигналов отрицательной обратной связи с датчика тока якоря ЭГ  $U_{ОТ2}$  и компенсирующей положительной обратной связи с датчика скорости вращения вала генератора  $U_{ОС}$ . Введение положительной обратной связи необходимо для компенсации возмущающего воздействия со стороны скорости. Регулятор момента РМ обеспечивает инвариантность момента сопротивления нагрузочного генератора по отношению к скорости вращения вала ЭГ, а также формирует характеристики системы в динамике.

Электромеханический преобразователь 2 кроме нагрузочного ЭГ также может содержать, например, приводной двигатель ЭД и механическую трансмиссию ИТ.

Система 3 управления приводным двигателем ЭД может быть выполнена по любой из известных схем, например в виде контура регулирования скорости, состоящего из задатчика скорости (ЗС), регуля-

тора скорости (РС), управляемого преобразователя (УП<sub>1</sub>) и датчика тока ЭД (ДТ<sub>1</sub>). Следует отметить, что для повышения качества испытаний система может быть выполнена инвариантной по моменту.

Как показано в [4], статический момент сопротивления, создаваемый нагрузочным ЭГ, может быть определен как

$$M = U_{ЗМ} \cdot \frac{k_p \cdot k_{ТП} \cdot k \cdot \Phi}{k_p \cdot k_{ТП} \cdot k_T + R_{Я}},$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи РМ;  $k_{ТП}$  – коэффициент передачи УП<sub>2</sub>;  $k$  – конструктивная постоянная ЭГ;  $R_{Я}$  – активное сопротивление якорной цепи ЭГ;  $k_T$  – коэффициент передачи ДТ<sub>2</sub>.

Следовательно, величина момента сопротивления, создаваемого ЭГ, не зависит от скорости вращения вала, а определяется только значением сигнала задания момента  $U_{ЗМ}$ .

На рис. 4 приведена ещё одна функциональная схема испытательного стенда с устройством 1 управления системой нагружения, электромеханическим преобра-

зователем 2 и системой 3 управления приводным двигателем, выполненная по схеме взаимной нагрузки [5].

В отличие от схемы, приведенной на рис. 3, в данной схеме якорь нагрузочного генератора ЭГ электрически соединен с якорем приводного электродвигателя ЭД. При этом управление нагрузочным генератором производится по каналу обмотки возбуждения.

В связи с этим для обеспечения инвариантности нагрузочного момента, создаваемого ЭГ, по отношению к скорости вращения электрохимической системы в схему добавлены блок деления ( $\div$ ) и блок извлечения квадратного корня ( $\sqrt{\quad}$ ). Кроме того, на регулятор момента (РМ) поступает сигнал обратной связи с датчика момента (ДМ).

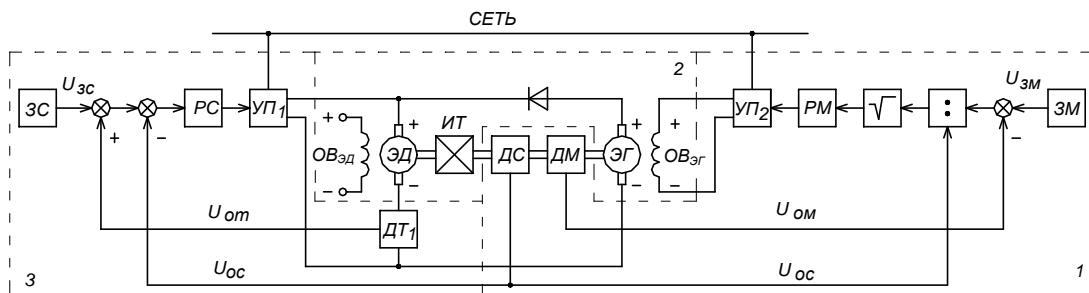


Рис. 4. Функциональная схема универсального испытательного стенда по схеме взаимной нагрузки

В остальной схеме повторяет конструкцию, приведенную на рис. 3.

Как показано в [5], статический момент сопротивления, создаваемый нагрузочным ЭГ, может быть определен как

$$M = U_{ЗМ} \cdot \frac{(k_p \cdot k_{ТП} \cdot k_B \cdot k)^2}{k_{\Omega} \cdot R_{Я} \cdot R_B^2 + k_M \cdot (k_p \cdot k_{ТП} \cdot k_B \cdot k)^2},$$

где  $k_B$  - коэффициент пропорциональности между током возбуждения ЭГ и магнитным потоком;  $k_{\Omega}$  - коэффициент передачи ДС;  $R_B$  - активное сопротивление  $ОВ_{ЭГ}$ ;  $k_M$  - коэффициент передачи ДМ.

Таким образом, статический момент сопротивления, создаваемый ЭГ, в данной схеме также не зависит от скорости вращения

вала ЭГ и полностью определяется величиной сигнала задания момента  $U_{ЗМ}$ .

На рис. 5 приведена функциональная схема энергосберегающего инвариантного электрохимического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада [6].

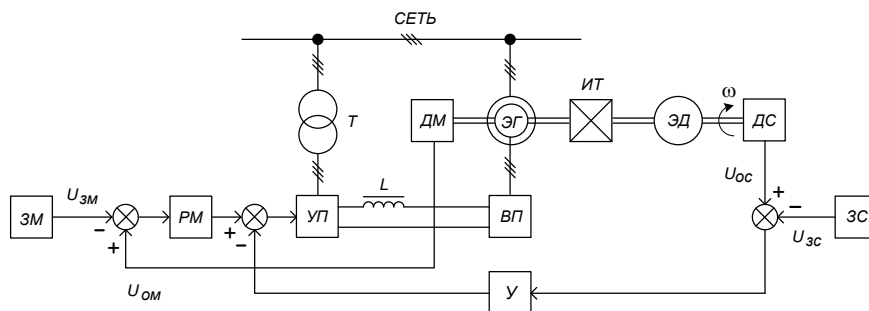


Рис. 5. Функциональная схема универсального испытательного стенда с асинхронно-вентильным каскадом

Задача повышения энергоэффективности нагрузочных испытаний при одновременном обеспечении инвариантности момента сопротивления нагрузочного устройства по отношению к скорости вращения

ния во всем диапазоне нагрузок решается тем, что в качестве нагрузочного генератора ЭГ использована асинхронная машина с фазным ротором. Вал ЭГ механически соединен с датчиком момента ДМ, датчиком

скорости ДС и валом испытуемого ЭД или испытуемой трансмиссии ИТ. Обмотка статора ЭГ подключается непосредственно к трехфазной сети переменного тока, а обмотка ротора через неуправляемый выпрямитель ВП и дроссель L соединена с управляемым преобразователем УП. Последний через согласующий трансформатор Т подключается к той же сети, что и обмотка статора ЭГ, образуя асинхронно-вентильный каскад (АВК). Это позволяет возвращать энергию скольжения асинхронной машины назад в сеть, тем самым повышая энергоэффективность нагрузочных испытаний.

Для обеспечения инвариантности момента сопротивления ЭГ по отношению к скорости вращения сигнал с выхода регулятора момента РМ сравнивается с компенсирующим сигналом, пропорциональным частоте вращения, поступающим с выхода усилителя У. Сигнал на входе усилителя У, пропорциональный скольжению,

формируется в результате сравнения сигнала заданной скорости идеального холостого хода  $U_{ЗС}$ , поступающего с задатчика скорости ЗС, и сигнала обратной связи по скорости  $U_{ОС}$ , поступающего с выхода датчика скорости ДС.

Преобразователь УП, работая в режиме инвертора, регулирует нагрузку в цепи выпрямленного тока ротора ЭГ, тем самым изменяя величину создаваемого асинхронной машиной момента, нагружающего исследуемые ЭД или ИТ. При таком режиме работы асинхронной машины энергия отдается в сеть переменного тока (как через обмотку статора, так и через обмотку ротора) по цепи: обмотка ротора - выпрямитель ВП - дроссель L - преобразователь УП - трансформатор Т - сеть.

Для статора и ротора асинхронной машины в системе координат  $xу$  по закону Кирхгофа можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} u_{1m} = R_1 i_{1x} + \frac{d\psi_{1x}}{dt} - \omega_{0ЭЛ} \psi_{1y}, \\ 0 = R_1 i_{1y} + \frac{d\psi_{1y}}{dt} + \omega_{0ЭЛ} \psi_{1x}, \\ 0 = R_{2\Sigma} i_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \psi_{2y} - E_{И} \frac{1}{k_{СХ}}, \\ 0 = R_{2\Sigma} i_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \psi_{2x}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{1m}$  - мгновенное значение фазного напряжения статора ЭГ;  $i_{1x}$ ,  $i_{1y}$ ,  $i_{2x}$ ,  $i_{2y}$  - мгновенные значения фазных токов статора и ротора ЭГ;  $R_1$  - активное сопротивление обмотки статора ЭГ;  $R_{2\Sigma} = R_2 + R_{ДР} + R_{ТПС}$  - суммарное активное сопротивление цепи ротора ЭГ, включающее активное сопротивление  $R_2$  обмотки ротора ЭГ, сопротивление  $R_{ДР}$  дросселя L, суммарное сопротивление  $R_{ТПС}$  управляемого преобразователя УП и вы-

прямителя ВП;  $\omega_{0ЭЛ}$  - электрическая скорость идеального холостого хода ЭГ;  $\omega_{ЭЛ}$  - электрическая скорость вращения ротора ЭГ;  $E_{И}$  - ЭДС преобразователя УП при работе в инверторном режиме;  $k_{СХ}$  - коэффициент схемы;  $\psi_{1x}$ ,  $\psi_{1y}$ ,  $\psi_{2x}$ ,  $\psi_{2y}$  - полные потокосцепления фазных обмоток статора и ротора ЭГ.

Полные потокосцепления фазных обмоток статора и ротора:

$$\begin{cases} \psi_{1x} = L_1 i_{1x} + L_{12} i_{2x}, \\ \psi_{1y} = L_1 i_{1y} + L_{12} i_{2y}, \\ \psi_{2x} = L_{2\Sigma} i_{2x} + L_{12} i_{1x}, \\ \psi_{2y} = L_{2\Sigma} i_{2y} + L_{12} i_{1y}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_1$  - индуктивность рассеяния обмотки статора ЭГ;  $L_{2\Sigma} = L_2 + L_{др} + L_{ТП}$  - суммарная индуктивность цепи ротора ЭГ, включающая индуктивность  $L_2$  обмотки ротора ЭГ, индуктивность  $L_{др}$  дросселя, индук-

тивность  $L_{ТП}$  управляемого преобразователя УП;  $L_{12}$  - взаимная индуктивность.

Электромагнитный момент асинхронной машины:

$$M = \frac{p_d L_{12}}{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2} (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}), \quad (3)$$

где  $p_d$  - число пар полюсов асинхронной машины.

Пренебрегая в (1) падением напряжения  $R_1 i_1$  и приравняв производные ну-

лю, что соответствует установившемуся режиму работы, запишем (1) в виде

$$\begin{cases} \psi_{1y} = -\frac{u_{1m}}{\omega_{0ЭЛ}} = const, \\ \psi_{1x} = 0, \\ i_{1y} = 0, \\ 0 = R_{2\Sigma} i_{2x} - (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \psi_{2y} - E_{и} \frac{1}{k_{сх}}, \\ 0 = R_{2\Sigma} i_{2y} + (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \psi_{2x}. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом (4) запишем (2) и (3) в виде

$$\begin{cases} i_{1x} = -\frac{L_{12}}{L_1} i_{2x}, \\ i_{2y} = -\frac{u_{1m}}{\omega_{0ЭЛ}} \frac{1}{L_{12}}, \\ \psi_{2x} = L_{2\Sigma} i_{2x} + L_{12} i_{1x}, \\ \psi_{2y} = L_{2\Sigma} i_{2y}. \end{cases} \quad (5)$$

$$M = \frac{p_d L_{12}}{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2} \psi_{1y} \psi_{2x} = \frac{p_d L_{12}}{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2} \left( -\frac{u_{1m}}{\omega_{0ЭЛ}} \right) \psi_{2x}. \quad (6)$$

Выражая из (5) потокосцепление  $\psi_{2x}$ , получим

$$\psi_{2x} = \frac{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2}{L_1} i_{2x}.$$

Из четвертого уравнения (4) с учетом второго и четвертого уравнений (5) запишем ток  $i_{2x}$  в виде

$$i_{2x} = \frac{1}{R_{2\Sigma}} (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) \left( -\frac{u_{1m}}{\omega_{0ЭЛ}} \right) \frac{L_{2\Sigma}}{L_{12}} + E_{и} \frac{1}{k_{сх}} \frac{1}{R_{2\Sigma}}. \quad (7)$$

Тогда с учетом (7) после несложных преобразований уравнение момента (6) примет вид

$$M = \frac{p_d L_{2\Sigma}}{L_1 R_{2\Sigma}} \frac{u_{1m}^2}{\omega_{0ЭЛ}^2} (\omega_{0ЭЛ} - \omega_{ЭЛ}) - E_{и} \frac{u_{1m}}{\omega_{0ЭЛ}} \frac{p_d L_{12}}{k_{сх} R_{2\Sigma} L_1}. \quad (8)$$

Как видно из (8), для обеспечения инвариантности момента сопротивления нагрузочного устройства по отношению к скорости вращения достаточно установить

коэффициент передачи усилителя  $U$  равным

$$k = \frac{p_d L_{2\Sigma}}{L_1 R_{2\Sigma}} \frac{u_{1m}^2}{\omega_{0ЭЛ}^2}.$$



## Практические результаты

Научно-технические разработки энергосберегающих электромеханических испытательных стендов кафедры «Автоматизированный электропривод» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» успешно внедрены в производство:

– в ОАО «Научно-технический центр комбайностроения» (г. Гомель) - стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания;

– ОАО «Витебский мотороремонтный завод» (г. Витебск) - стенд для испы-

тания двигателей внутреннего сгорания на основе асинхронно-вентильного каскада;

– УП «Витебское отделение Белорусской железной дороги» (локомотивное депо Полоцк) - стенд для испытания электрических машин постоянного тока после ремонта;

– УП «Гродненское отделение Белорусской железной дороги» (локомотивное депо Лида) - стенд для испытания гидропередачи после ремонта.

## Заключение

При проведении нагрузочных испытаний целесообразно использовать электромеханические испытательные стенды на основе машин постоянного или переменного тока, обеспечивающие инвариантность нагружающего момента по отношению к скорости вращения испытуемого двигателя или элемента трансмиссии. Для нагрузочных устройств, как на основе машин постоянного тока, так и на основе машин переменного тока, можно обеспечить рекуперацию энергии либо в питающую сеть, либо на приводной электродви-

гатель, тем самым повышая энергоэффективность испытаний. При введении в систему регулирования нагрузочного момента обратных связей, как по регулируемой координате - моменту, так и по возмущающим воздействиям - скорости или скольжению, возможно обеспечить инвариантность нагружающего момента по отношению к скорости. Инвариантное нагрузочное устройство будет воспроизводить на валу необходимую для испытаний зависимость момента от скорости, времени, угла поворота и т.п.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тодарев, В.В. Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники / В.В. Тодарев, М.Н. Погуляев, И.В. Дорошенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. Випуск 101. Проблеми енергозабезпечення та енергосбереження в АПК України. - Харків, 2010. - С. 90-91.
2. Тодарев, В.В. Взаимная нагрузка в электромеханических стендах для испытания электрических машин / В.В. Тодарев, М.Н. Погуляев, И.В. Дорошенко // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 115-летию со дня рождения Павла Осиповича Сухого) (г. Гомель, 28-29 окт. 2010 г.) / под общ. ред. С.И. Тимошина. - Гомель: ГГТУ, 2010. - С. 149-150.
3. Савельев, В.А. Нагружающие устройства испытательных стендов / В.А. Савельев, В.Б. Попов, В.В. Тодарев // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе - сегодня и завтра: сб. тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. (г. Гомель, 21-22 дек. 2017 г.). - Гомель, 2017. - С. 102-103.
4. Пат. 5370 ВУ, МПК7 H02P 5/00, H04R 29/00. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2003. - № 3.
5. Пат. 5694 ВУ, МПК7 H02P 5/00, H04R 29/00. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2003. - № 4.
6. Дорошенко, И.В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда, инвариантного к скорости вращения, на основе асинхронно-вентильного каскада / И.В. Дорошенко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. - 2013. - № 3. - С.63-72.
7. Дорошенко, И.В. Исследование энергетического баланса испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И.В. Дорошенко, М.Н. Погуляев, В.А. Савельев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие техноло-

гии: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Могилев, 14-15 апр. 2016 г.) / ред.: И.С. Сазонов

[и др.]. - Могилев, 2016. - С. 299-300.

1. Todarev, V.V. Energy-saving electro-mechanical test desks for tests of internal combustion engines and transmission units of agricultural equipment / V.V. Todarev, M.N. Pogulyaev, I.V. Doroshchenko // *Bulletin of Vasilenko National Technical University of Agriculture of Kharkov. Engineering Sciences*. Edition 101. Problems of Energy-saving and Energy Supply in Agriculture. – Kharkov. 2010. – pp. 90-91.
2. Todarev, V.V. Mutual load in electromechanical test desks for electric machines testing / V.V. Todarev, M.N. Pogulyaev, I.V. Doroshchenko // *Current Problems in Mechanical Engineering: Report Abstracts of the VIII-th Inter. Scientific Tech. Conf.* (Scientific readings dedicated to Pavel Sukhoy's 115-th anniversary) (Gomel, October 28-29, 2010) / under the general editorship of S.I. Timoshin. – Gomel: GSTU, 2010. – pp. 149-150.
3. Saveliev, V.A. Loading devices of test desks / V.A. Saveliev, V.B. Popov, V.V. Todarev // *Innovation Technologies in Agricultural Complex – Today and Tomorrow: Proceedings of the Inter. Scientific Pract. Conf.* (Gomel, December 21-22, 2017. – pp. 102-103.
4. Pat. 5370 BY, IPC7 H02P 5/00, H04R 29/00. Device for Loading System Control of Test Desk // *Official Bulletin / Patent Dep. of Belarus*. – 2003. – No.4.
5. Pat. 5694 BY, IPC7 H02P 5/00, H04R 29/00. Device for Loading System Control of Test Desk // *Official Bulletin / Patent Dep. of Belarus*. – 2003. – No.4.
6. Doroshchyenko, I.V. Loading part simulator of test desk invariant to rotation speed based on asynchronous-valve cascade / I.V. Doroshchenko, V.S. Zakharenko, V.A. Saveliev // *Bulletin of Sukhoy State Technical University of Gomel*. – 2013. No.3. – pp. 63-72.
7. Doroshchenko, I.V. Investigation of test desk energetic balance based on asynchronous-valve cascade / I.V. Doroshchenko, M.N. Pogulyaev, V.A. Saveliev // *Materials, Equipment and Resource-saving Technologies: Proceedings of the Inter. Scientific Tech. Conf.* (Mogilyov, April 14-15, 2016) / editor: I.S. Sazonov [et al.]. – Mogilyov, 2016. – pp. 299-300.

Статья поступила в редакцию 4.05.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого  
Грунтович Н.В.

Статья принята к публикации 14.06.18.

#### Сведения об авторах:

**Дорошенко Игорь Васильевич**, ст. преподаватель кафедры «Автоматизированный электропривод» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, тел.: 8 (0232) 40-18-34; e-mail: dr-aed@gstu.by.

**Погуляев Михаил Никифорович**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, тел.: 8 (044) 548-05-76; e-mail: poguljaev@gstu.by.

**Попов Виктор Борисович**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Сельскохозяйственные машины» Гомельского государственного технического университета

**Doroshchenko Igor Vasilievich**, Senior Lecturer of the Dep. “Automated Electric Drive”, Sukhoy State Technical University of Gomel, phone: 8 (0232) 40-18-34; e-mail: [dr-aed@gstu.by](mailto:dr-aed@gstu.by).

**Pogulyaev Mikhail Nikiforovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Electric Drive”, Sukhoy State Technical University of Gomel, phone: 8 (044) 548-05-76; e-mail: [poguljaev@gstu.by](mailto:poguljaev@gstu.by).

**Popov Victor Borisovich**, Can. Sc. Tech., Head of the Dep. “Agricultural Equipment”, Sukhoy State Technic-

al University of Gomel, phone: 8 (0232) 40-18-34; e-mail: [popov5@list.ru](mailto:popov5@list.ru).

**Saveliev Vadim Alexeevich**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, тел.: 8 (0232) 40-18-34, e-mail: [vadim1974@gstu.by](mailto:vadim1974@gstu.by).

**Todarev Valentin Vasilievich**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, тел.: 8 (0232) 40-18-34; e-mail: [todarev@gstu.by](mailto:todarev@gstu.by).

al University of Gomel, phone: 8 (0232) 40-18-34; e-mail: [popov5@list.ru](mailto:popov5@list.ru).

**Saveliev Vadim Alexeevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Electric Drive”, Sukhoy State Technical University of Gomel, phone: 8 (0232) 40-18-34, e-mail: [vadim1974@gstu.by](mailto:vadim1974@gstu.by).

**Todarev Valentin Vasilievich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Electric Drive”, Sukhoy State Technical University of Gomel, phone: 8 (0232) 40-18-34, e-mail: [todarev@gstu.by](mailto:todarev@gstu.by).