

УДК 621.313.1:629.458.27

Захаренко Владимир Сергеевич

**ИНВАРИАНТНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СТЕНД С  
РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ**

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Гомель 2000

Работа выполнена на кафедре “Автоматизированный электропривод”  
Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

- Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Луковников В.И.
- Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор Фираго Б.И.,
- кандидат технических наук,  
профессор Рунов Ю.А.
- Оппонирующая организация – Могилевский государственный  
технический университет

Защита состоится 30 июня 2000г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании совета по  
защите диссертаций К 02.13.01 в Гомельском государственном техническом  
университете им. П.О. Сухого.

246746, г. Гомель, пр-кт Октября, 48, корп.1, ауд. 516, Гомельский  
государственный технический университет им. П.О. Сухого.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гомельского  
государственного технического университета им. П.О. Сухого.

Автореферат разослан “29” мая 2000г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций

Г.И. Селиверстов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В подавляющем большинстве современных приводов транспортных средств, строительных механизмов, обрабатывающих устройств и других рабочих машин используются механические трансмиссии, передающие вращательное движение двигателя рабочим органам.

Надежность и качество работы таких приводов существенно зависят от прочности трансмиссий и надежности их работы в широком спектре нагрузочных моментов и угловых скоростей.

Отсюда становится понятным возросший в последнее время интерес к разработке новых методов и средств испытания рабочих машин и их трансмиссий у изготовителей, а особенно у разработчиков новой техники.

Это определяется также и тем, что в условиях рыночной экономики прибыль напрямую связана с надежностью работы оборудования, конкурентная борьба фирм заставляет строго выполнять данные потребителю гарантии в высококачественном изготовлении, а жесткая система страхования от аварий усиливает эти требования.

ГОСТами 16504-81, 16162-93, 29285-95 определено около 45 видов испытаний, которым подвергаются механические трансмиссии. Важнейшими из них являются стендовые испытания, когда программа испытаний реализуется при моделировании механических воздействий, соответствующих реальным условиям использования трансмиссий. Наиболее эффективно создаются различные нагрузочные механические характеристики с помощью управляемых электромеханических стендов.

В настоящее время отсутствуют электромеханические стенды с независимым управлением одновременно электроприводной и нагрузочной частями, хотя очевидно, что обеспечение автономной инвариантности по частоте вращения входного вала и по нагрузочному моменту на выходном валу испытываемой трансмиссии при их регулировании в широком диапазоне, позволит осуществлять самые разнообразные стационарные и нестационарные нагрузочные механические характеристики: жесткие, мягкие, вентиляторные, демпфирующие, позиционные и т. д.

Немаловажной проблемой при проведении испытаний в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации трансмиссий, является экономия электроэнергии, которую можно обеспечить, например, за счет рекуперации энергии в сеть или в приводную часть стенда.

Испытания редукторов вагонных генераторов, проведенные на Гомельском вагоноремонтном заводе показали, что таким способом можно почти две трети электрической мощности нагрузочного генератора вернуть в систему электропитания приводного электродвигателя стенда, что при мощностях в несколько десятков киловатт дает существенную экономию.

Вышеперечисленные аргументы говорят об актуальности проведения исследований по созданию электромеханических испытательных стендов, обеспечивающих при повышенном энергосбережении двустороннюю инвариантность механических воздействий на испытываемую трансмиссию.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Данная работа выполнялась в соответствии с темой № 339 за № Гос. рег. 19962937 программы фундаментальных исследований “Машиностроение” Республики Беларусь на 1996 - 2000 гг. по направлению “Разработка научных основ теории проектирования, надежности, технологии, испытания машин с использованием компьютерных методов вычисления и моделирования”.

Министерством образования Республики Беларусь в 1998 - 1999 гг. автору выделялся грант на выполнение работы № Гос. рег. 1998816 “Математическое и программное обеспечение анализа и синтеза стендов испытания трансмиссий с рекуперацией энергии” по теме диссертации.

Кроме того, часть результатов, полученных при выполнении исследований, вошли составной частью в научно-исследовательскую работу кафедры “Автоматизированный электропривод” Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого - № Гос. рег. 19942156 “Разработка САПР автоматизированных электроприводов постоянного и переменного тока на базе персональных ЭВМ”.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке принципов построения, структур, методов, алгоритмов и программного обеспечения для анализа и синтеза, схемных реализаций инвариантных электроприводов электромеханических стендов с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий.

Поставленная цель была достигнута путем решения следующих задач:

- разработки структуры инвариантных систем управления приводной и нагрузочной частями испытательных стендов;
- построения математических моделей стендов с рекуперацией энергии и на основе их анализа выяснения возможности физической реализуемости абсолютной двусторонней инвариантности систем автоматического управления электроприводами стендов;
- разработки рекомендаций и критериев для синтеза локальных систем автоматического регулирования скорости и момента;
- формулировки принципов построения и разработки алгоритмов и программного обеспечения для синтеза и анализа локальных систем автоматического регулирования скорости и момента;
- проведения сравнения регулировочных возможностей и динамических показателей вариантов стендов на основе численного исследования математических моделей;
- осуществления схемной реализации, экспериментального исследования и внедрения одного из разработанных вариантов испытательных стендов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является электромеханический стенд для испытания механических трансмиссий вращательного движения. Предмет исследования - инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий.

Гипотеза. Предполагалось, что для испытательных стендов с рекуперацией энергии получить независимость регулирования для взаимосвязанных систем управления приводной и нагрузочной частями стенда можно введением компенсационных связей.

Методология и методы проведения исследования. При аналитическом исследовании электромеханических стендов использовались традиционные методы интегрального, дифференциального и операционного (по Лапласу) исчислений.

Численный анализ осуществлялся на персональном компьютере с процессором Intel Pentium по специальной, разработанной автором, программе SMED.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается экспериментальными исследованиями и внедрением электромеханического стенда для испытания редукторов вагонных генераторов на Гомельском вагоноремонтном заводе.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Разработаны три новые функциональные схемы электромеханических испытательных стендов, отличающихся от известных инвариантностью управления угловой скоростью и нагрузочным моментом при повышенном энергосбережении.

Впервые созданы дифференциальные и операторные математические модели стендов новых структур.

Выяснено, что физически реализовать абсолютную двустороннюю инвариантность можно только в установившемся режиме одной из трех разработанных структур, когда энергия рекуперруется в сеть, а нагрузочная машина управляется по каналу якоря.

Установлено влияние параметров системы автоматического управления стендом на точность регулирования момента нагрузки для стендов с управлением генератором по каналу возбуждения.

Разработано новое программное обеспечение SMED структурного анализа и синтеза систем автоматического управления, пригодное не только для исследования электроприводов, но и для применения в качестве базы систем автоматизированного проектирования (САПР) автоматизированных электроприводов (АЭП).

Практическая и экономическая значимость полученных результатов.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых схемных реализаций систем автоматического управления (САУ) разработанных стендов; инженерных методик по синтезу и настройкам регуляторов и обратных связей; программного обеспечения анализа и

синтеза САУ АЭП, позволяющих расширить регулировочные способности при повышенных экономических показателях данных стендов.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в работе, внедрены на Гомельском вагоноремонтном заводе и используются при чтении специальных дисциплин, а программа SMED внедрена в курсовое и дипломное проектирование и ряд дисциплин по учебному плану подготовки студентов специальности Т.11.02.00 - Автоматизированный электропривод в Гомельском государственном техническом университете им. П.О. Сухого. Кроме того программа SMED используется при проведении научно-исследовательских работ на кафедре и может быть предложена предприятиям, занимающимся проектированием и наладкой АЭП.

*Экономическая значимость* работы заключается в улучшении технических характеристик испытательных стендов с рекуперацией энергии, что позволяет расширить их область применения, обеспечивая увеличение энергосбережения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Функциональные и структурные схемы электромеханических испытательных стендов с двусторонней инвариантностью и повышенным энергосбережением.

2. Математическая модель упомянутых стендов.

3. Результаты аналитического и численного исследования возможности физической реализуемости абсолютной двусторонней инвариантности.

4. Программное обеспечение SMED для структурного анализа систем автоматического управления электроприводами, пригодное для использования в качестве базы САПР АЭП.

5. Принципы построения, схемные реализации и инженерные методики синтеза высококачественных электромеханических стендов, предназначенных для испытания механических трансмиссий вращательного движения.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его участии.

Гипотеза и общие направления исследований были реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительный отзыв на:

– VII научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Гомельского политехнического института (г. Гомель, 1994г.);

- республиканской научно-технической конференции “Автоматизированный электропривод промышленных установок” (г. Минск, 1994г.);
- республиканской научно-методической конференции “Использование ЭВМ в учебном процессе и научных исследованиях” (г. Гомель, 1995г.);
- научно-практическом семинаре “Автоматизация и прогрессивные технологии” (г. Новоуральск, 1996г.);
- научно-технической конференции ВУЗов Республики Беларусь (г. Минск, 1996г.);
- межвузовской конференции аспирантов и студентов (г. Гомель, 1997г.);
- международной научно-технической конференции “Современные проблемы машиноведения” (г. Гомель, 1998г.).

Опубликованность результатов. Результаты выполненных исследований опубликованы в одной статье журнала “Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ)”, двух статьях материалов международных конференций, семи тезисах докладов. Проведена предварительная экспертиза двух заявок на изобретение. Всего объем опубликованных материалов составляет 17 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и трех приложений. Общий объем работы составляет 130 страниц, в том числе 45 рисунков на 34 страницах, 4 таблицы на 4 страницах, 3 приложения на 14 страницах и список из 73 использованных источников на 7 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика проблемы создания электромеханических испытательных стендов, отличающихся от известных возможностью создания большого разнообразия регулируемых нагрузочных механических характеристик при повышенном энергосбережении. Рассматривается современное состояние работ по данному направлению и намечаются общие пути решения данной проблемы.

В первой главе рассмотрены принципы построения испытательных стендов. Сравнительный анализ принципов построения стендов позволяет заключить, что наиболее полно требования, предъявляемые к современным испытательным стендам трансмиссий, удовлетворяются при построении стенда на основе каскада взаимнонагруженных электрических машин постоянного тока. При этом система автоматического управления стендом должна обеспечивать инвариантность скорости относительно момента нагрузочной машины и момента относительно скорости.

Для обеспечения возможности моделирования различных механических характеристик исполнительных органов реальных рабочих

машин в исследовательских целях необходимо реализовывать зависимость момента от скорости в динамических и статических режимах и, следовательно, необходимо более высокое быстродействие системы автоматического регулирования моментом, чем для системы автоматического управления скоростью вращения. При создании же стендов средней и большой мощности для сертификационных испытаний и обкатки трансмиссий после ремонта или изготовления, когда быстродействие и качество переходных процессов играют второстепенную роль по сравнению со статическими характеристиками, систему автоматического управления скоростью можно делать более быстродействующей.

При анализе существующих работ по испытательным стендам выявлено, что задачи создания математических моделей, принципов построения и рекомендаций по синтезу систем автоматического управления стендами ставились и решались узко и специализированно.

Анализ существующего программного обеспечения по автоматизированному анализу и синтезу автоматизированных электроприводов показал, что специфические требования к САПР электроприводов не сформулированы и отсутствует программное обеспечение, пригодное для использования в качестве базы САПР.

Во второй главе рассматриваются три разработанных автором варианта испытательного стенда трансмиссий с рекуперацией энергии:

1. Энергия рекуперруется в сеть через тиристорный преобразователь в инверторном режиме. Управление моментом осуществляется изменением напряжения якоря нагрузочной машины. Обе электрические машины работают при постоянном номинальном значении потока возбуждения.

2. Энергия рекуперруется в сеть. Управление моментом производится изменением потока возбуждения генератора. Двигатель работает при постоянном номинальном значении потока возбуждения, а генератор при постоянном, ниже номинального, напряжении на якоре.

3. Осуществляется возврат энергии в привод. Две машины постоянного тока включены по схеме взаимной нагрузки и подключены к одному тиристорному преобразователю. Управление моментом осуществляется за счет изменения потока возбуждения нагрузочной машины. Поток возбуждения двигателя при этом постоянен и ниже номинального.

Обозначив элементы и параметры силовой части: M1, M2 - двигатель и генератор, соответственно; LM1, LM2 - обмотки возбуждения двигателя и генератора, соответственно; BR - датчик скорости вращения; UA - датчик тока, используемый для получения сигнала обратной связи по моменту;  $U_{я1}$ ,  $E_{я1}$ ,  $I_{я1}$ ,  $U_{я2}$ ,  $E_{я2}$ ,  $I_{я2}$  - напряжение, ЭДС и ток якоря двигателя и генератора, соответственно;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  - скорости вращения валов



двигателя и генератора, соответственно;  $M_1$ ,  $M_2$  - моменты на валах двигателя и генератора, соответственно  $U_{OC\omega}$ ,  $U_{OCM}$  - сигналы обратных связей по скорости и моменту, соответственно, - функциональную схему силовой части указанных стендов можно представить в виде, показанном на рис. 1.

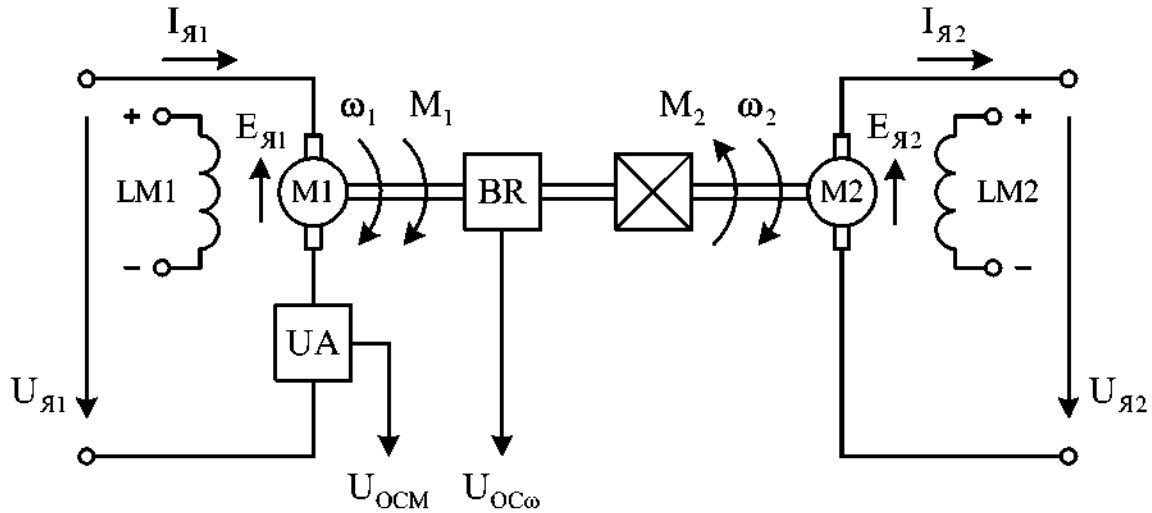


Рис. 1. Функциональная схема силовой части стенда

На основе системы уравнений, составленной по функциональной схеме, получены две математические модели силовых частей стендов в операторной и дифференциальной форме: при рекуперации энергии в сеть и при рекуперации в привод. Полученные модели в виде структурных схем приведены на рис. 2 и 3.

С целью упрощения записи моделей (см. рис. 2 и 3) полиномы и параметры обозначим следующим образом:

$$\begin{aligned}
 A_1(p) &= T_{M1} \cdot p \cdot (T_{я1} \cdot p + 1) + 1; & A_2(p) &= T_{M2} \cdot p \cdot (T_{я2} \cdot p + 1) + 1; \\
 A_{д1}(p) &= T_{МД1} \cdot p \cdot (T_{яД1} \cdot p + 1) + 1; & A_{д2}(p) &= T_{МД2} \cdot p \cdot (T_{яД2} \cdot p + 1) + 1; \\
 B_1(p) &= T_{M1} \cdot p \cdot (T_{я1} \cdot p + 1); & B_2(p) &= T_{M2} \cdot p \cdot (T_{я2} \cdot p + 1); \\
 B_{д1}(p) &= T_{МД1} \cdot p \cdot (T_{яД1} \cdot p + 1); & B_{д2}(p) &= T_{МД2} \cdot p \cdot (T_{яД2} \cdot p + 1); \\
 K_{ВЭ2} &= I_{я2Н} + \frac{\Omega_{2Н} \cdot k\Phi_{2Н}}{R_{я2}}; & K_{ВЭД2} &= I_{я2Н} + \frac{\Omega_{2Н} \cdot k\Phi_{2Н}}{R_{яД2}}; \\
 T_{ВЭ2} &= \frac{I_{я2Н} \cdot R_{я2} \cdot T_{я2}}{I_{я2Н} \cdot R_{я2} + \Omega_{2Н} \cdot k\Phi_{2Н}}; & T_{ВЭД2} &= \frac{I_{я2Н} \cdot R_{яД2} \cdot T_{я2}}{I_{я2Н} \cdot R_{яД2} + \Omega_{2Н} \cdot k\Phi_{2Н}};
 \end{aligned}$$

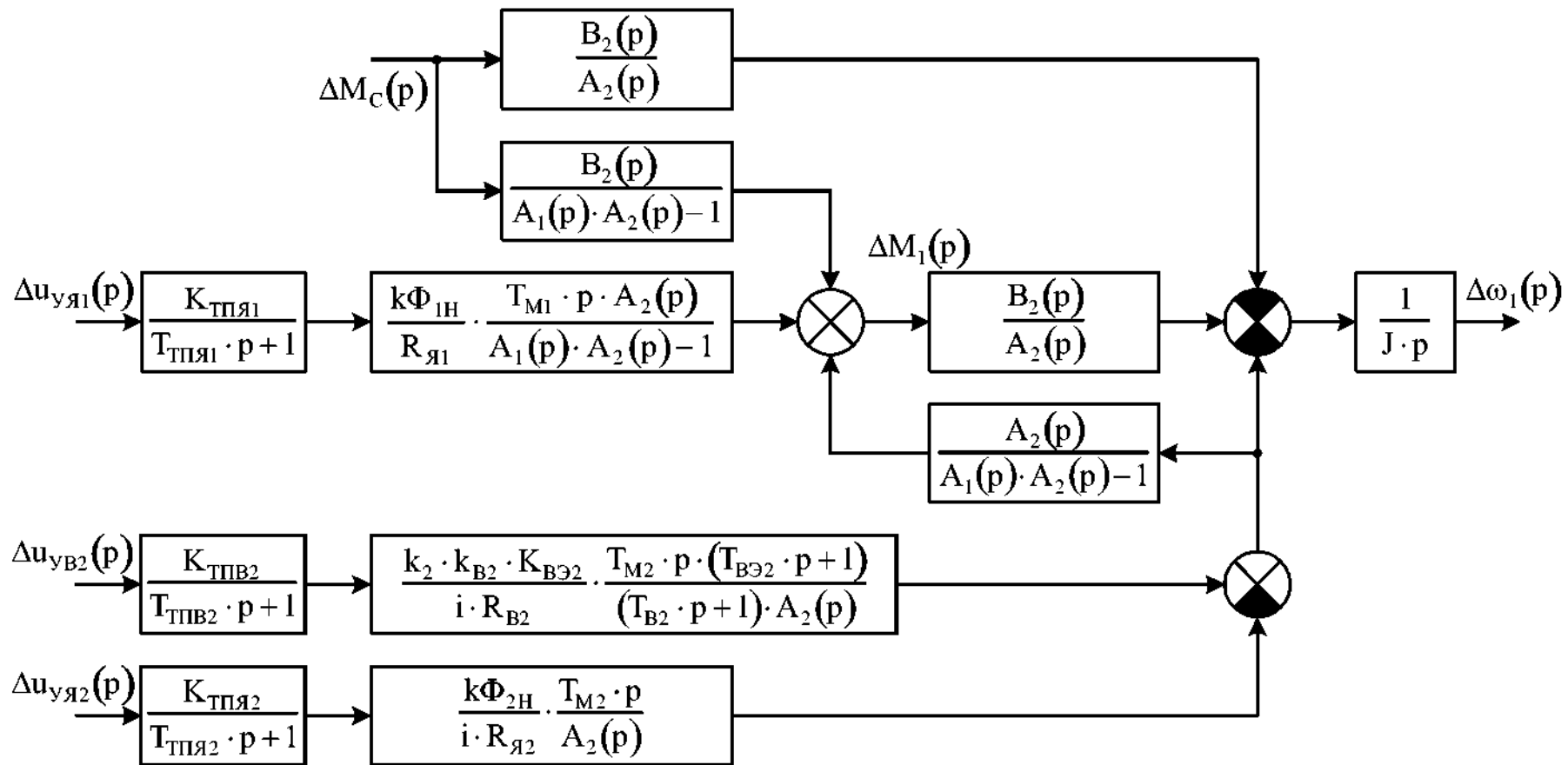


Рис. 2. Модель силовой части стенда с рекуперацией энергии в сеть

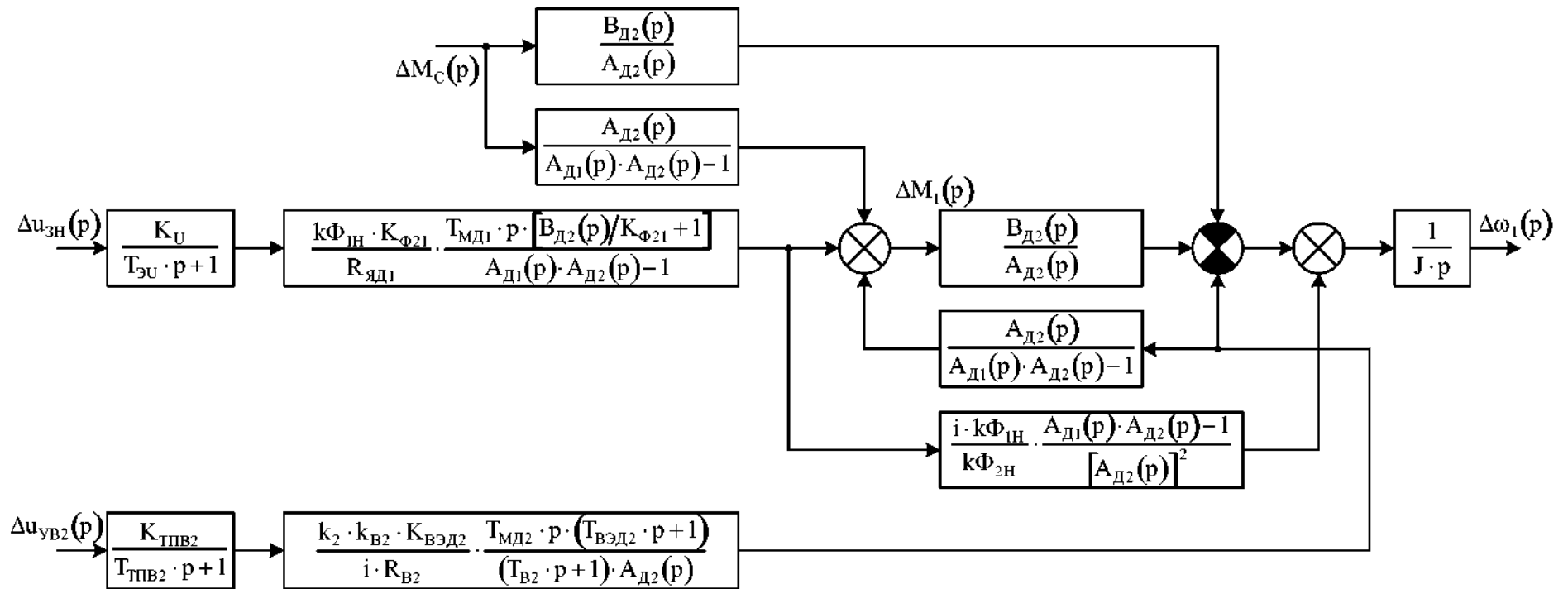


Рис. 3. Модель силовой части стенда с рекуперацией энергии в привод

$$K_{\Phi 21} = \frac{k\Phi_{2H} - i \cdot k\Phi_{1H}}{k\Phi_{2H}}; \quad T_{M1} = \frac{J \cdot R_{я1}}{k\Phi_{1H}^2}; \quad T_{M2} = \frac{i^2 \cdot J \cdot R_{я2}}{k\Phi_{2H}^2};$$

$$T_{MD1} = \frac{J \cdot R_{яд1}}{k\Phi_{1H}^2}; \quad T_{MD2} = \frac{i^2 \cdot J \cdot R_{яд2}}{k\Phi_{2H}^2},$$

где  $A_1(p)$ ,  $A_2(p)$  - характеристические полиномы передаточной функции электрической машины постоянного тока для двигателя и генератора, соответственно, с учетом параметров силовой цепи преобразователя;  $A_{д1}(p)$ ,  $A_{д2}(p)$  - характеристические полиномы передаточной функции электрической машины постоянного тока для двигателя и генератора, соответственно, без учета параметров силовой цепи преобразователя;  $K_{ВЭ2}$ ,  $K_{ВЭД2}$  - коэффициент передачи от приращения произведения потока возбуждения на конструктивную постоянную машины к приращению момента с учетом и без учета параметров преобразователя, соответственно;  $T_{M1}$ ,  $T_{M2}$ ,  $T_{MD1}$ ,  $T_{MD2}$  - электромеханические постоянные времени машин;  $T_{я1}$ ,  $T_{я2}$ ,  $T_{яд1}$ ,  $T_{яд2}$  - постоянные времени якорных цепей двигателя и генератора с учетом и без учета параметров силовой цепи преобразователей;  $R_{я1}$ ,  $R_{я2}$ ,  $R_{яд1}$ ,  $R_{яд2}$  - сопротивления якорных цепей с учетом и без учета сопротивления силовой цепи преобразователей;  $k\Phi_{1H}$ ,  $k\Phi_{2H}$  - произведения начальных значений в рабочей точке потоков возбуждения на конструктивные постоянные машин;  $J$  - суммарный момент инерции механической части стенда, приведенный к валу двигателя;  $i$  - передаточное число испытуемой трансмиссии;  $I_{я2H}$ ,  $\Omega_{я2H}$  - начальные значения в рабочей точке тока якоря и скорости вращения вала генератора;  $K_U$ ,  $T_{ЭU}$  - коэффициент передачи и эквивалентная постоянная времени контура регулирования якорного напряжения;  $k_2 \cdot k_{B2}$  - произведение конструктивной постоянной машины на коэффициент пропорциональности между потоком и током возбуждения;  $R_{B2}$ ,  $T_{B2}$  - сопротивление и постоянная времени цепи возбуждения генератора с учетом параметров преобразователя;  $K_{ТПЯ1}$ ,  $T_{ТПЯ1}$ ,  $K_{ТПЯ2}$ ,  $T_{ТПЯ2}$ ,  $K_{ТПВ2}$ ,  $T_{ТПВ2}$  - коэффициенты передачи и постоянные времени преобразователей.

По математической модели силовой части стендов получены уравнения статических характеристик силовой части стенда в относительных величинах для случая рекуперации энергии в сеть:

$$\begin{cases} \omega_{01} = \frac{k\Phi_{01} \cdot U_{я01} - R_{я01} \cdot M_{01}}{K_{E1} \cdot k\Phi_{01}^2}, \\ M_{01} = \frac{K_{E2} \cdot U_{в02}^2 \cdot \omega_{01} - i \cdot K_{\omega} \cdot U_{я02} \cdot U_{в02}}{i^2 \cdot K_M \cdot K_{\omega} \cdot R_{я02}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{я01}$ ,  $R_{я02}$  - относительное сопротивление якорной цепи двигателя и генератора, соответственно;  $K_{E1}$ ,  $K_{E2}$  - отношение номинальной ЭДС к номинальному напряжению для двигателя и генератора, соответственно;  $K_M$  - отношение номинальных моментов двигателя и генератора;  $K_{\omega}$  - отношение номинальных скоростей вращения генератора и двигателя;  $\omega_{01}$ ,  $M_{01}$ ,  $U_{я01}$ ,  $k\Phi_{01}$ ,  $U_{я02}$ ,  $U_{в02}$  - относительные значения величин: скорости вала, момента на валу, напряжения на якоре и произведения конструктивной постоянной на поток возбуждения двигателя, напряжений на якоре и возбуждения генератора.

Для случая рекуперации энергии в привод в системе уравнений (1) необходимо заменить параметры  $R_{я01}$  и  $R_{я02}$  на относительные сопротивления без учета параметров преобразователя  $R_{яд01}$  и  $R_{яд02}$  и учесть, что напряжение на якорах машин одно и то же.

На основе анализа уравнений для статического режима были разработаны новые структуры САУ приводов станков, представленные на рис. 4.

В приводной части станка для обеспечения инвариантности введена положительная компенсационная обратная связь по моменту и отрицательная стабилизирующая по скорости. При этом для обеспечения абсолютной инвариантности при единичном коэффициенте передачи регулятора скорости необходимо выбрать относительные коэффициенты передачи суммирующих усилителей по каналам обратных связей, равными

$$K_{C1} = \frac{R_{я01}}{K_{ТП01}}, \quad (2) \quad K_{C2} = \frac{K_{ТП01} - K_{E1}}{K_{ТП01}} \quad (3)$$

при рекуперации энергии в сеть и

$$K_{C1} = \frac{R_{яд01}}{K_{ТП01} \cdot k\Phi_{01H}}, \quad (4) \quad K_{C2} = \frac{K_{ТП01} - K_{E1} \cdot k\Phi_{01H}}{K_{ТП01}} \quad (5)$$

при рекуперации энергии в привод, где  $K_{ТП01}$  - относительный коэффициент передачи тиристорного преобразователя, питающего якорную обмотку двигателя.

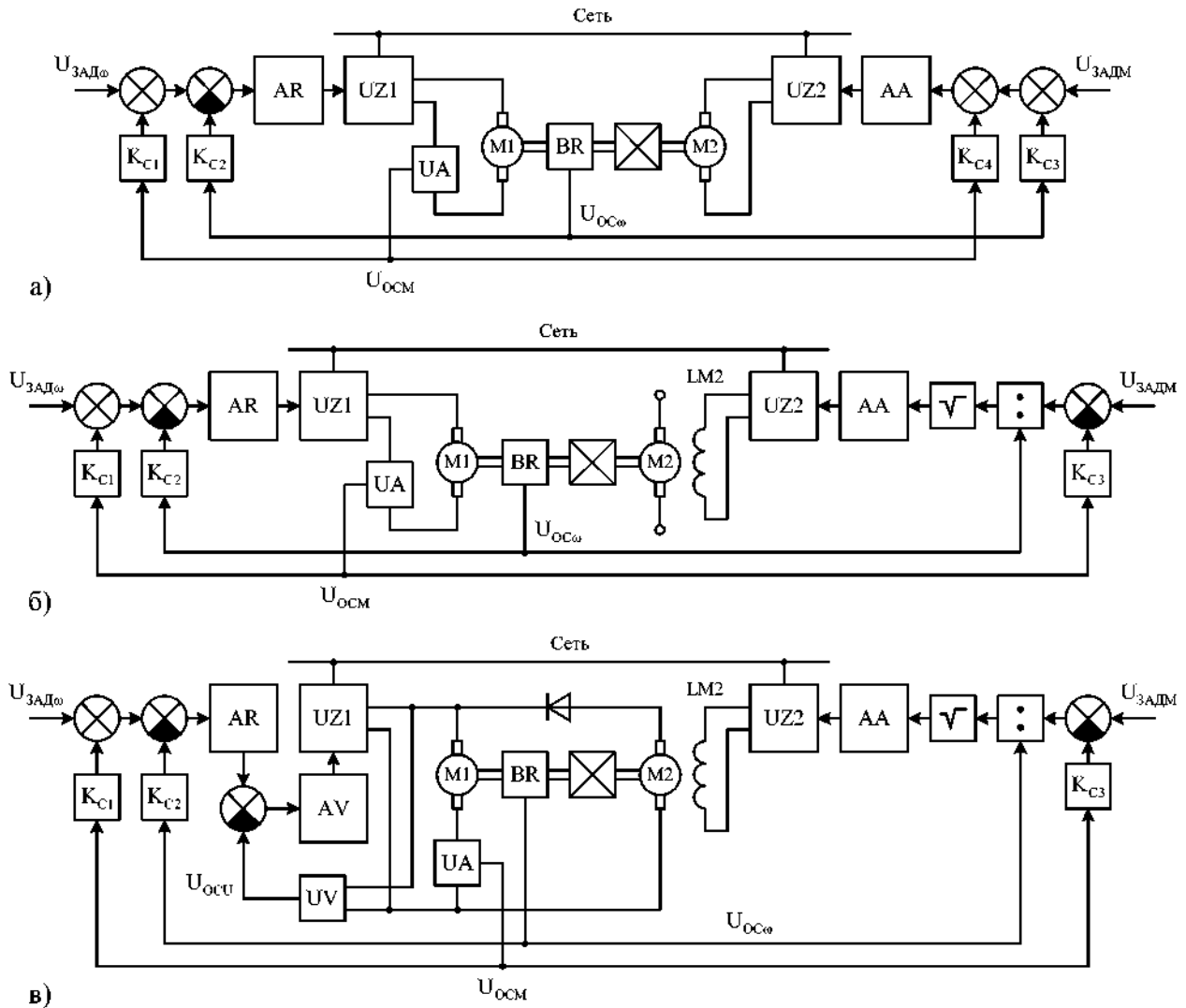


Рис. 4. Функциональные схемы САУ стандами:  
 а - рекуперация энергии в сеть и управление генератором по якорному каналу;  
 б - рекуперация энергии в сеть и управление генератором по каналу возбуждения; в - рекуперация энергии в привод.

Полную инвариантность нагрузочной части можно обеспечить только для первого варианта станда. Это достигается при выполнении условий

$$K_{C3} = \frac{K_{E2}}{i \cdot K_{\omega} \cdot K_{ТПО2}}, \quad (6)$$

$$K_{C4} = \frac{K_{ТПО2} - i \cdot K_M \cdot R_{\lambda O2}}{K_{ТПО2}}, \quad (7)$$

где  $K_{ТПО2}$  - относительный коэффициент передачи преобразователя, питающего обмотку генератора, по каналу которой осуществляется управление.

Для второго и третьего вариантов стандов полную инвариантность получить нельзя. Можно только уменьшить погрешность регулирования момента, увеличивая относительный коэффициент передачи регулятора момента  $K_{PMO}$ . При этом относительный коэффициент передачи  $K_{C3}$  следует выбрать равным

$$K_{C3} = \frac{K_{E2} \cdot K_{ТПО2}^2 \cdot K_{РМО}^2 - i^2 \cdot K_M \cdot K_\omega \cdot R_{ЯО2}}{K_{E2} \cdot K_{ТПО2}^2 \cdot K_{РМО}^2}, \quad (8)$$

Вид статических характеристик для второго варианта стенда показан на рис. 5. На рисунке штриховкой показана область допустимых значений при напряжении на якоре генератора 30% от номинального.

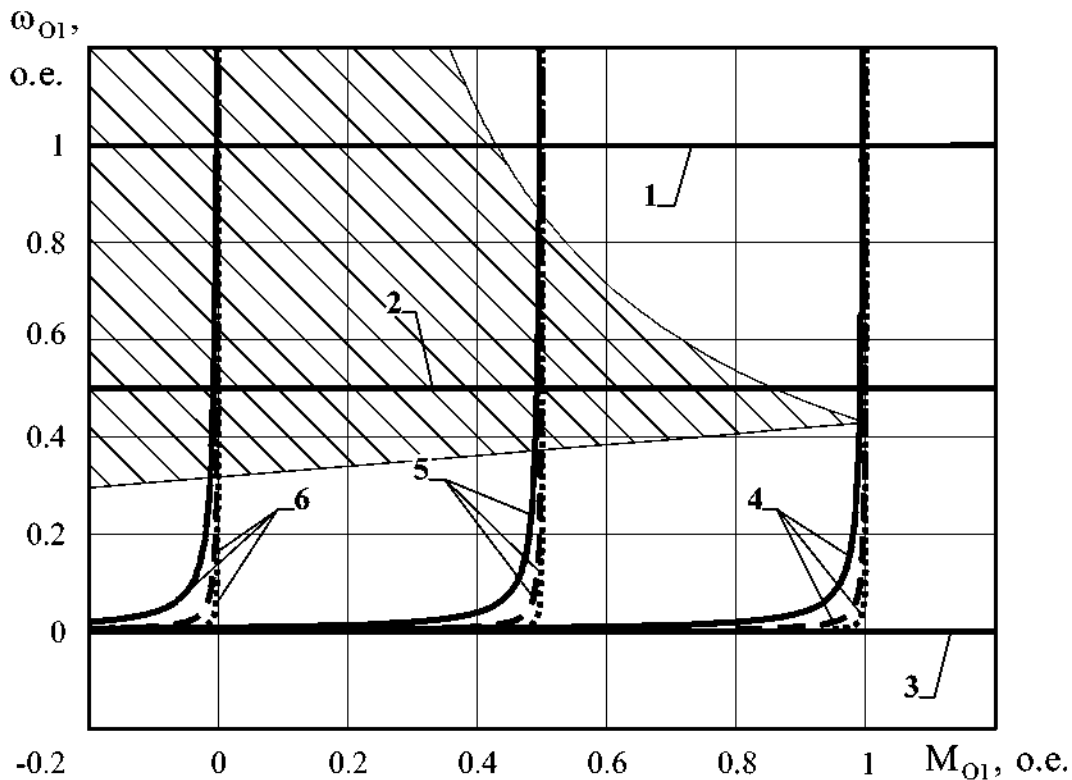


Рис. 5. Механические характеристики второго варианта стенда:  
1, 2 и 3 - приводной части; 4, 5 и 6 - нагрузочной части; 1, 4 - при номинальном значении сигнала задания; 2, 5 - при значении сигнала задания 50% от номинального; 3, 6 - при нулевом сигнале задания.

При синтезе САУ данных стендов регуляторы необходимо выполнять в виде комбинации апериодических и форсирующих звеньев, а коэффициент передачи их выбирать в соответствии с требованиями по обеспечению инвариантности. Для третьего варианта необходимо вводить внутренний контур регулирования якорного напряжения с целью компенсации влияния падения напряжения в силовой цепи преобразователя. Коэффициент передачи контура напряжения должен быть равен коэффициенту передачи преобразователя. Быстродействие контура напряжения должно быть высоким. Высокое быстродействие и компенсация влияния падения напряжения достигается, например, при настройке контура напряжения на оптимум по модулю.

*В третьей главе* формулируется специфическое требование к САПР автоматизированных электроприводов. Поскольку самым трудоемким при синтезе систем автоматического управления электроприводами является

работа с математическими моделями (т. е. преобразование их к виду, пригодному для синтеза регуляторов, и анализ динамических процессов в синтезированном электроприводе), то в основе САПР должно лежать программное обеспечение, построенное на основе алгоритмов для работы с математическими моделями при их структурном представлении. Использование структурного представления математических моделей позволяет создать универсальное программное обеспечение.

С учетом указанного требования было создано программное обеспечение структурного анализа динамики SMED. И на его основе была создана САПР автоматизированных электроприводов постоянного тока подчиненного регулирования, используемая, в том числе, для анализа локальных систем автоматического регулирования стандов.

Данное программное обеспечение используется в учебном процессе и научных исследованиях кафедры “Автоматизированный электропривод” ГГТУ им. П.О. Сухого.

В четвертой главе приводятся результаты численного анализа математических моделей. Для всех трех вариантов станда производится синтез САУ в соответствии с соотношениями и рекомендациями, полученными во второй главе. После синтеза систем управления по полным, не упрощенным и нелинеаризованным моделям на программе SMED были рассчитаны переходные процессы. На рис. 6 приведена диаграмма переходного процесса пуска для третьего варианта станда.

Сравнение установившихся значений скорости и момента подтверждает выводы, сделанные во второй главе.

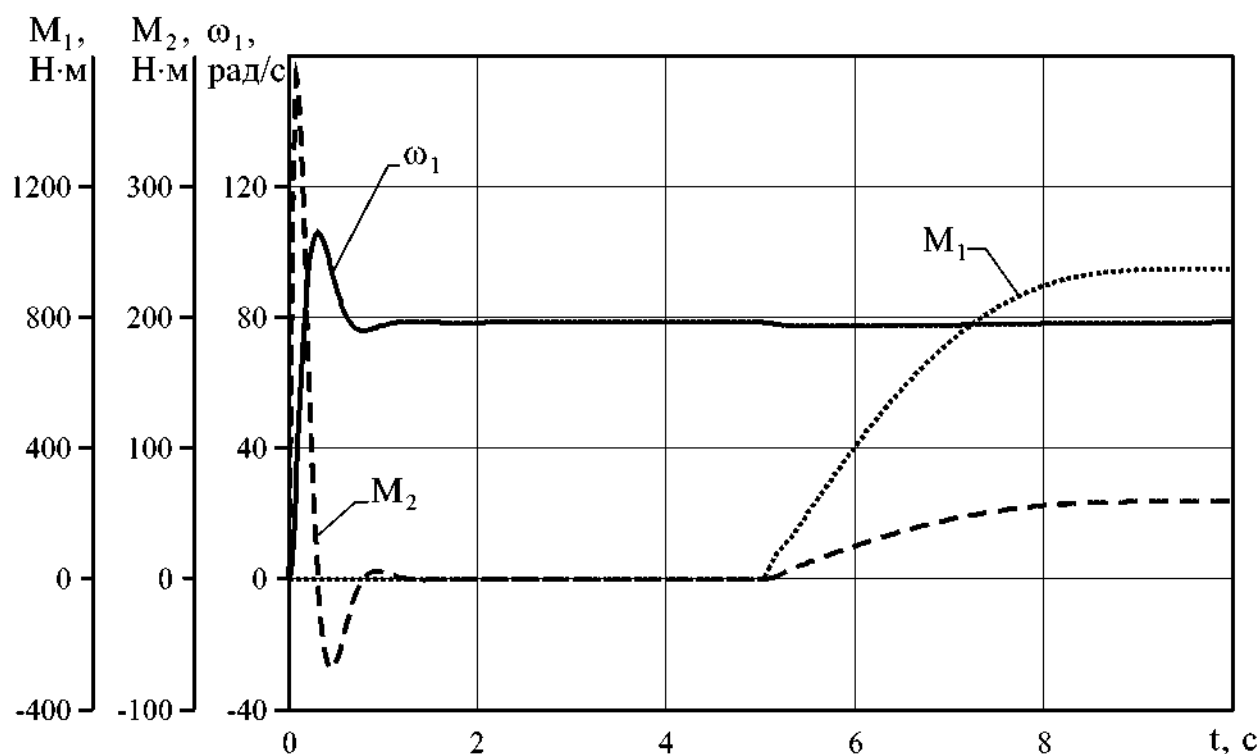


Рис. 6. Пуск станда



В пятой главе описывается внедренный на Гомельском вагоноремонтном заводе стенд испытания редукторов вагонных генераторов. На рис. 7 приведена функциональная схема стенда.

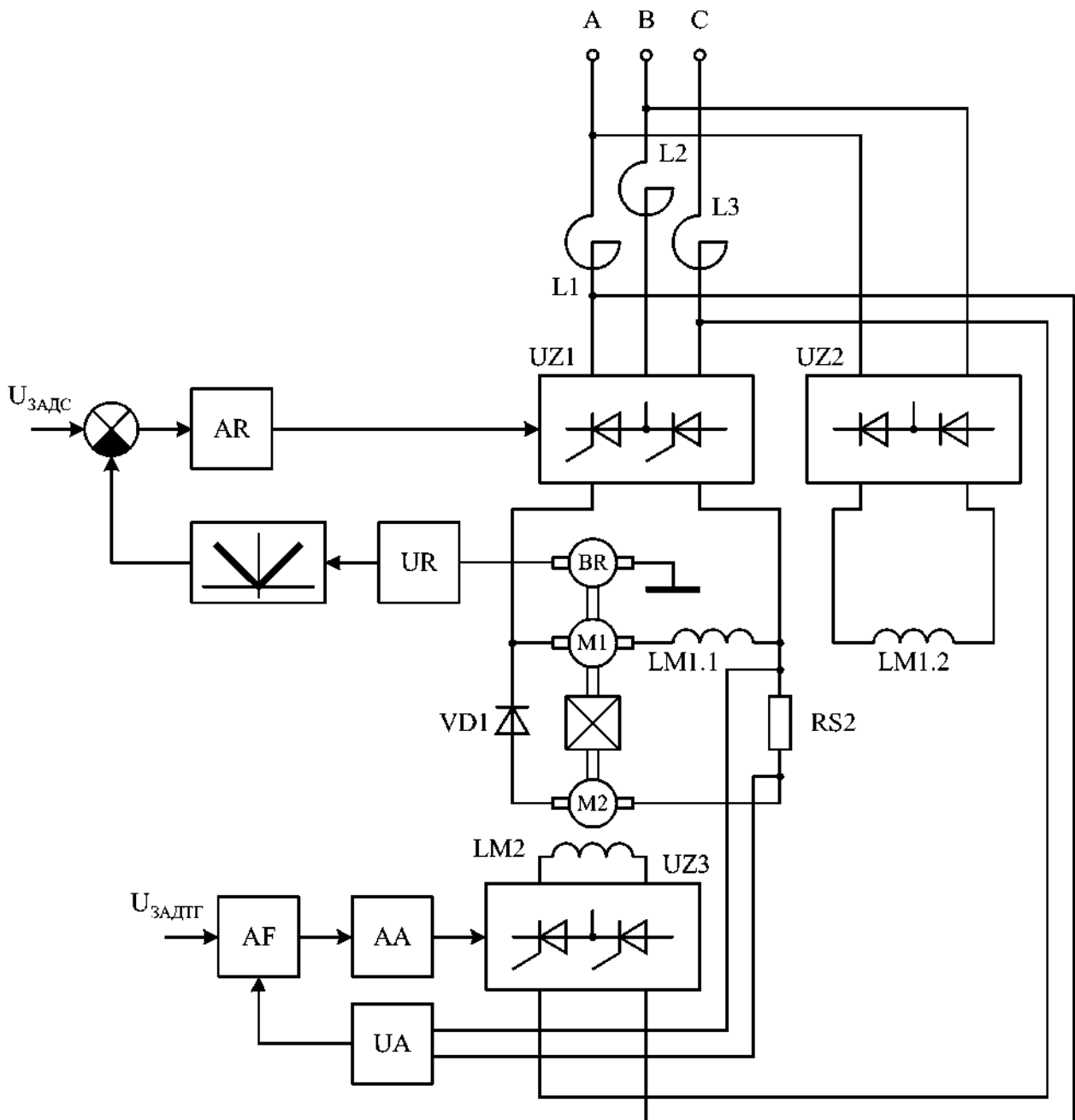


Рис. 7. Функциональная схема стенда испытания редукторов вагонных генераторов

Силовая часть стенда построена в соответствии с третьим рассматриваемым в данной работе вариантом стенда. В состав стенда входят: M1, LM1.1, LM1.2 - двигатель смешанного возбуждения; M2, LM2 - генератор; VD1 - диод, предназначенный для исключения работы нагрузочной машины в двигательном режиме; RS2, UA - шунт и датчик тока возбуждения генератора; BR, UR - тахогенератор и датчик скорости; UZ1, UZ2 - тиристорные преобразователи; UZ3 - неуправляемый выпрямитель;

L1 - L3 - коммутационные реакторы; AR - регулятор скорости; AA - регулятор тока возбуждения генератора; AF - нелинейное звено, предназначенное для ограничения нагрузочного момента в переходных процессах.

В стенде были использованы троллейбусные двигатели смешанного возбуждения ДК210А. Генератор был перемотан на полное независимое возбуждение.

Система управления стендом, по просьбе заказчика, была упрощена для удобства эксплуатации и наладки персоналом завода по отношению к разработанной во второй главе структуре. Согласно акту внедрения стенд имеет следующие технические характеристики:

- диапазон регулирования частоты вращения редуктора – 0...960 об/мин;
- диапазон регулирования мощности нагрузки – 0...40 кВт;
- потребляемая мощность из сети 12.6 кВт при потребляемой мощности двигателя 37.9 кВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований успешно решена важная научно-прикладная задача по разработке структур и методик синтеза инвариантных электромеханических стендов с широким диапазоном регулирования частоты вращения и нагрузочного момента и с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий. Это подтверждается следующими результатами, полученными в работе:

1. Созданы математические модели силовых частей электромеханических испытательных стендов с рекуперацией энергии, построенных на основе машин постоянного тока, с помощью которых разработаны три новые структуры инвариантных систем автоматического управления этими стендами [1, 3 с. 113 - 114, 10, 11].

2. Выяснено, что абсолютную инвариантность приводной части стенда можно достичь для всех трех рассматриваемых вариантов стендов, а для нагрузочной части стенда только при рекуперации энергии в сеть и управлении нагрузочной машиной по каналу якоря [1, 11].

3. Разработаны методики, рекомендации и получены соотношения для выбора коэффициентов обратных связей, выбора структуры и определения параметров регуляторов систем автоматического управления стендами, при соблюдении которых обеспечивается инвариантность [1, 11].

4. Созданы алгоритмы и программное обеспечение анализа математических моделей при их структурном представлении для использования в качестве основы САПР АЭП [2 с. 42 - 43, 4, 5, 6, 7, 8].

5. С помощью разработанного программного обеспечения проведен численный анализ инвариантных стендов с рекуперацией энергии, САУ которых построены в соответствии с разработанными структурами,

подтвердивший эффективность полученных рекомендаций и соотношений [1].

6. Изготовлен, экспериментально исследован и внедрен стенд испытания редукторов вагонных генераторов на Гомельском вагоноремонтном заводе [1, 9, 10].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Инвариантный электромеханический стенд испытания трансмиссий / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объедин. СНГ). - 1999. - № 1. - С. 33 - 37.

2. Захаренко В.С. Принципы построения программного обеспечения анализа динамики электроприводов SMED // Современные проблемы машиноведения: Материалы межд. науч.-техн. конф. - Гомель: ГПИ, 1998. - Т. 2. - С. 42 - 43.

3. Захаренко В.С., Савельев В.А. Принципы построения испытательных стендов // Современные проблемы машиноведения: Материалы межд. науч.-техн. конф. - Гомель: ГПИ, 1998. - Т. 2. - С. 113 - 114.

4. Программное обеспечение проектирования автоматизированных электроприводов / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, Е.В. Славницкий, В.С. Малашенко, В.С. Захаренко // Тез. VII науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава ГПИ, посвящ. 25-летию института. - Гомель: ГПИ, 1994. - С. 43.

5. Программное обеспечение "ЗАЛМАС" анализа и синтеза автоматизированных электроприводов / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, Е.В. Славницкий, В.С. Малашенко, В.С. Захаренко // Автоматизированный электропривод промышленных установок: Тез. республ. науч.-техн. конф. - Минск: БГПА, 1994. - С. 53.

6. Луковников В.И., Захаренко В.С. Программное обеспечение курсового и дипломного проектирования по специальности Т.11.02 - "Автоматизированный электропривод" // Использование ЭВМ в учебном процессе и научных исследованиях: Тез. республ. науч.-метод. конф. - Гомель: БелГУТ, 1995. - С. 70.

7. Захаренко В.С. Программное обеспечение структурного анализа и синтеза динамики САУ // Автоматизация и прогрессивные технологии: Тез. науч.-практ. семинара. - Новоуральск: МИФИ-2, 1996. - С. 121.

8. Захаренко В.С., Савельев В.А. Расчет на ПЭВМ переходных процессов по структурным схемам электроприводов // Тез. науч.-техн. конф. ВУЗов РБ. - Минск: БГУ, 1996. - С. 94.

9. Захаренко В.С. Электропривод испытательного стенда редукторов вагонных генераторов // Сб. материалов межвуз. конф. аспирантов и студентов. - Гомель: ГПИ - ГКИ, 1997. - С. 28 - 29.

10. Автоматизированный стенд испытания механических трансмиссий / С.И. Захаренко, В.В. Тодарев, В.С. Захаренко, В.А. Савельев // Актуальные проблемы развития транспортных систем: Тез. науч.-техн. конф. - Гомель: БелГУТ, 1998. - С. 38.

11. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда / В.И. Луковников, С.И. Захаренко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев. - № а19990246; Заявл. 17.03.1999; Опубл. 30.12.1999 // Изобретения, полезные модели, промышленные образцы / Дзярж. пат. ведомства Рэсп. Беларусь. - 1999. - № 4. - С. 68.

## РЕЗЮМЕ

Захаренко Владимир Сергеевич

Инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для  
испытания механических трансмиссий

Испытательный стенд, инвариантность, энергосбережение, рекуперация энергии, система управления, анализ, синтез, программное обеспечение, САПР.

Объект исследования - электромеханический стенд для испытания механических трансмиссий вращательного движения.

Предмет исследования - инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий.

Цель работы заключается в разработке принципов построения, структур, методов, алгоритмов и программного обеспечения анализа и синтеза, схемных реализаций инвариантных электроприводов электромеханических стендов с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в том, что:

- разработаны математические модели и три новые структуры инвариантных электромеханических испытательных стендов с рекуперацией энергии;

- получены соотношения и рекомендации по синтезу и настройкам регуляторов и обратных связей в разработанных стендах для обеспечения инвариантности;

- сформулировано специфическое требование к САПР автоматизированных электроприводов и, в соответствии с ним, создано программное обеспечение анализа и синтеза автоматизированных электроприводов;

- разработана схемная реализация подобного стенда.

Результаты исследований могут быть использованы на предприятиях, проектирующих и изготавливающих испытательное оборудование; изготавливающих и ремонтирующих механические трансмиссии, в частности, на Гомельском вагоноремонтном заводе при разработке систем управления испытательными и обкаточными стендами.

Область применения - организации и предприятия, занимающиеся проектированием электроприводов испытательных стендов.

## РЭЗЮМЭ

Захаранка Уладзімір Сяргеевіч

Інварыянтны электрамеханічны стэнд з рэкуперацыяй энергіі для  
выпрабавання механічных трансмісій

Выпрабавальны стэнд, інварыянтнасць, энергасберажэнне, рекуперацыя энергіі, сістэма кіравання, аналіз, сінтэз, праграмнае забеспячэнне, САПР.

Аб'ект даследвання - электрамеханічны стэнд для выпрабавання механічных трансмісій вярчальнага двіжэння.

Прадмет даследвання - інварыянтны электрамеханічны стэнд з рэкуперацыяй энергіі для выпрабавання механічных трансмісій.

Мэта працы зводзіцца да распрацоўкі прынцыпаў пастраення, структур, метадаў, алгарытмаў і праграмнага забеспячэння аналіза і сінтэза, схемных рэалізацый інварыянтных электрапрывадаў электрамеханічных стэндаў з рэкуперацыяй энергіі для выпрабавання механічных трансмісій.

Навуковая і практычная значнасць атрыманых вынікаў складаецца з таго, што:

- распрацаваны матэматычныя мадэлі і тры новыя структуры інварыянтных электрамеханічных выпрабавальных стэндаў з рэкуперацыяй энергіі;

- атрыманы суадносіны і рэкамендацыі па сінтэзу і настройкам регулятараў і абратных сувязей у распрацаваных стэндах для забеспячэння інварыянтнасці;

- сфармулявана спецыфічнае патрабаванне да САПР аўтаматызаваных электрапрывадаў і, у адпаведнасці з ім, распрацавана праграмнае забеспячэнне аналізу і сінтэзу аўтаматызаваных электрапрывадаў;

- распрацавана схемная рэалізацыя падобнага стэнда.

Вынікі даследванняў могуць быць выкарыстаны на прадпрыемствах, праектуючых і вырабляючых выпрабавальнае абсталяванне; вырабляючых і рэмантуючых механічныя трансмісіі, у прыватнасці, на Гомельскім вагонарэмонтным заводзе пры распрацаванні сістэм кіравання выпрабавальнымі і абкатачнымі стэндамі.

Вобласць выкарыстання - арганізацыі і прадпрыемствы, займаючыяся праектаваннем электрапрывадаў выпрабавальных стэндаў.

## SUMMARY

Zakharenko Vladimir Sergeevich

The invariant electromechanical bench with power recuperation trial mechanical transmissions testing

The test bench, invariance, power saving, power recuperation, control system, analysis, synthesis, software, CAD.

Object of research is a electromechanical bench for rotation mechanical transmissions testing.

Subject of research is a invariant bench with power recuperation for mechanical transmissions testing.

The purpose of research is the development of principles of construction, structures, methods, algorithms as well as analysis and synthesis software, circuit implementations of invariant electrical drives of electromechanical benches with recuperation of energy for trial mechanical transmissions testing.

The scientific and practical significance of the results obtained is in:

- development of the mathematical models and three new structures of invariant electromechanical test benches with power recuperation;
- development of the relations guidelines in synthesis and customizations of regulators and feedbacks in designed benches for support of invariancy;
- development of the specific requirement to a CAD of the automated electric drives, and, according to it, the software of the analysis and synthesis of the automated electric drives;
- development of the circuit implementation of the similar benches.

The results of scientific investigation can be used at the enterprises designing and making test equipment; making and repairing mechanical transmissions, in particular, at Gomel coach-repair factory designing control systems of test benches.

Usage - organizations and firms designing electric drives of test benches.