

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»**

---

*УДК 621.313.224:621.313.33.001.4*

**Савельев Вадим Алексеевич**

**МЕТОДЫ СИНТЕЗА, СТРУКТУРЫ  
И СХЕМНЫЕ РЕАЛИЗАЦИИ  
ИНВАРИАНТНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО  
ТОКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ  
ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Гомель 2003

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированный электропривод» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Захаренко С.И., Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», кафедра «Автоматизированный электропривод».

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Чубриков Л.Г., Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», кафедра «Теоретические основы электротехники»;

кандидат технических наук, профессор Петренко Ю.Н. УО «БНТУ», кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов».

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Могилевский государственный технический университет»

Защита состоится 27 июня 2003 г. в 10-00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» по адресу:

росим вы-  
7-91-65 на

реждения  
иверситет

Храбров

.А., 2003

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время существует тенденция увеличения числа механизмов и машин, использующих асинхронный вентильный электропривод (АВЭП). На них возлагаются задачи, связанные с обеспечением статических и динамических показателей при регулировании, а также с получением специальных законов движения исполнительных механизмов. К последним относятся шаговый, применяемый в станках для выбора зазоров в кинематической цепи и для поворота револьверных головок, в подъемных машинах для выбора слабины каната, колебательный, использующийся в вибростендах для испытаний изделий радиоэлектронной промышленности, дизельных двигателей, в сейсморазведке, а также режим «ползучей» скорости, необходимый в станках для центровки заготовок и в подъемниках для ревизии канатов.

Таким образом, условия и режимы работы АВЭП имеют широкий спектр, а на валу двигателя могут присутствовать различные типы моментов сопротивления, зависящие от разных координат.

В инженерной практике для анализа и синтеза систем автоматического регулирования АВЭП в качестве основы математических моделей используются обобщенная двухфазная электрическая машина и уравнения электрического равновесия для схемы замещения асинхронного двигателя (АД). Они построены с учетом таких допущений, как синусоидальное распределение магнитного потока вдоль окружности равномерного воздушного зазора, отсутствие насыщения магнитной цепи и потеря в стали статора и ротора, симметрия обмоток статора и ротора и др.

Математические модели с указанными допущениями достаточно точно описывают процессы при работе двигателя на устойчивой части механической характеристики и при представлении вентильных преобразователей непрерывными звеньями. В остальных же случаях, в частности, при работе двигателей с низкими скоростями вращения («ползучая» скорость), при сложных законах движения вала (колебательное, шаговое и др.) и при питании от вентильных преобразователей, указанные модели оказываются весьма приближенными и, по существу, непригодными.

Выбор же неадекватной модели при разработке может потребовать полного изменения системы электропривода (ЭП), а неточный учет энергетических процессов приводит к резкому снижению сроков службы двигателя или завышению его мощности. Экспериментальных исследований АВЭП, определяющих области практического использования тех или иных моделей, энергетических процессов в них, к настоящему времени не проводилось. Для проведения таких исследований необходимо иметь физическую модель АВЭП, основным назначением которой является получение различных режимов работы исследуемого АД

При проведении стендовых испытаний желательнее, чтобы привод работал с нагрузкой, максимально приближенной к реальной. С этой целью ставится задача создания устройства, позволяющего воспроизводить на валу исследуемого двигателя требуемый характер нагрузки – управляемого нагрузочного электропривода (УНЭ). Кроме того, необходимо разработать информационно-измерительную систему, способную адекватно отображать процессы, происходящие в исследуемом ЭП.

Таким образом, разработка методов синтеза, структур и схемных решений для создания электромеханического комплекса для испытания АВЭП, способного физически моделировать различного рода нагрузки, получать необходимые режимы работы АД, измерять требуемые координаты ЭП, позволит снять указанные проблемы.

*Связь работы с крупными научными программами, темами.* Работа выполнялась в соответствии с темой научно-исследовательской работы кафедры «Автоматизированный электропривод» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» № Гос. рег. 19992501 «Разработка теоретических основ и принципов построения комплекса испытательно-измерительных методов и средств для исследования асинхронных вентильных электроприводов». Результаты работы нашли практическое применение при выполнении хозяйственной темы «Определение оптимальных режимов работы электропривода канатных машин ТД-2/202, Ri-10, Ri-15, исключающих выход из строя электродвигателей постоянного тока».

*Цель и задачи исследования.* Цель диссертационной работы заключается в разработке структур, методов синтеза и схемных реализаций инвариантного электромеханического комплекса на основе машины постоянного тока (МПТ) для испытания АВЭП, направленных на повышение качества и расширение диапазона нагрузочных испытаний.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Создать структуру УНЭ на основе контуров стабилизации нагрузочного момента, компенсации влияния на нагрузочный момент угловой скорости вращения испытуемого АВЭП и регулирования момента инерции.
2. Разработать методику синтеза регуляторов для оптимизации САУ УНЭ по максимальному быстрдействию при заданных ограничениях на перегревание и скорость нарастания тока.
3. Разработать и реализовать схему УНЭ.
4. Разработать схемную реализацию и программное обеспечение для анализа физической модели АВЭП.
5. Экспериментально исследовать и внедрить созданный опытный образец комплекса.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследований является электромеханический комплекс для испытания ЭП. Предмет исследова-

ния – инвариантный электромеханический комплекс на основе МПТ для испытания АВЭП.

Гипотеза. Создание инвариантного по угловой скорости вращения УНЭ и построение физической модели АВЭП на базе безредукторного асинхронного ЭП позволит существенно расширить диапазон нагрузочных воздействий и повысить качество нагрузочных испытаний.

Методология и методы проведения исследований. Аналитические исследования статических и динамических режимов УНЭ и АВЭП выполнены на основе теории автоматического управления и электропривода с использованием методов интегро-дифференциального и операционного исчисления. Численный анализ осуществлялся на ПЭВМ с использованием как типовых пакетов программ, так и с помощью оригинальной программы, разработанной автором. Проверка справедливости теоретических результатов проводилась экспериментальным путем на лабораторном стенде.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Разработаны новые структуры УНЭ на основе контуров стабилизации нагрузочного момента и компенсации влияния на него угловой скорости вращения вала испытуемого АД с возможностью регулирования момента инерции, а также предложены принцип построения и структура физической модели АВЭП.

Для этих структур УНЭ получены аналитические соотношения между параметрами элементов последнего, обеспечивающие инвариантность нагрузочного момента по отношению к угловой скорости вращения вала АД в статическом режиме и возможность регулирования момента инерции.

Разработаны методики, рекомендации и получены соотношения для выбора типоразмера МПТ, а также для синтеза элементов САУ УНЭ максимального быстродействия при ограничениях на перерегулирование и скорость нарастания тока якоря МПТ.

Создано новое программное обеспечение анализа характеристик инвариантного электромеханического комплекса для испытания АВЭП.

Полученные результаты способствуют повышению точности и расширению диапазона нагрузочных воздействий, что позволяет с большей достоверностью проводить исследования процессов в АВЭП, например при определении областей практического использования математических моделей АД.

Практическая и экономическая значимость полученных результатов. Практическая значимость работы заключается в создании инженерных методик выбора МПТ и синтеза элементов САУ УНЭ для статического и динамического режимов, в разработке нового программного обеспечения анализа характеристик инвариантного электромеханического комплекса для испытания АВЭП и схемной реализации инвариантного электромеханического комплекса на основе МПТ для испытания АВЭП.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных в работе, внедрены на Белорусском металлургическом

заводе г. Жлобин, при определении оптимальных режимов работы электропривода канатных машин ТД-2/202, Ri-10, Rir-15, исключающих выход из строя электродвигателей постоянного тока, а также используются в лабораторном практикуме по дисциплинам «Системы управления электроприводами» и «Наладка и диагностика систем управления» для студентов специальности Т.11.02.00 – «Автоматизированный электропривод» в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого».

*Экономическая значимость* работы заключается в повышении сроков службы двигателя и более рациональном использовании его мощности за счет максимального приближения условий нагрузочных испытаний к реальным условиям эксплуатации на стадии разработки новых современных АВЭП, что позволяет исключить выбор неадекватной модели АД и более точно учитывать энергетические процессы в нем.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Новые структуры УНЭ и физической модели АВЭП в составе инвариантного электромеханического комплекса для испытания АВЭП.

2. Аналитические соотношения между параметрами элементов УНЭ, обеспечивающие инвариантность момента сопротивления по отношению к угловой скорости вращения вала испытуемого АД и регулируемость момента инерции.

3. Инженерные методики, рекомендации и соотношения для выбора МПТ, а также синтеза элементов САУ УНЭ для статического и динамического режимов.

4. Схемная реализация инвариантного электромеханического комплекса на основе МПТ для испытания АВЭП.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его участии. Гипотеза, общие направления исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на:

– межрегиональном научно-техническом семинаре «Автоматизация и прогрессивные технологии» (г. Новоуральск, 1996 г.);

– международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 1998 г.);

– международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития транспортных систем» (г. Гомель, 1998 г.);

– международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2002 г.);

– межкафедральном семинаре «Энергетика и промышленная электроника» УО «ГГТУ им. П.О. Сухого» в 2003 г.

Опубликованность результатов. Результаты выполненных исследований опубликованы в одной статье журнала «Известия ВУЗов. Энергетика», двух статьях журнала «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого», двух статьях материалов международной конференции, шести тезисах докладов. Получены один патент Республики Беларусь на изобретение и одно решение на выдачу патента Республики Беларусь. Всего объем опубликованных материалов составляет 29 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем работы составляет 127 страниц, в том числе 41 рисунок на 27 страницах, 2 приложения на 13 страницах и список из 98 использованных источников на 7 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показано, что в связи с возрастающей ролью АВЭП в современном промышленном производстве и необходимостью разработки новых, современных отечественных АВЭП, актуальной является проблема разработки методов синтеза, структур и схемных решений для создания электромеханического комплекса испытания АВЭП, способного физически моделировать различного рода нагрузки, получать необходимые режимы работы АД, измерять требуемые координаты ЭП.

В общей характеристике работы обоснована актуальность темы, ее связь с научно-исследовательскими работами Республики Беларусь, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе проведен сравнительный анализ основных способов физического моделирования нагрузок на валу АВЭП с точки зрения реализации нагрузочных устройств (НУ), их статических и динамических характеристик.

Показано, что для испытаний АВЭП в статических режимах, когда особых требований в отношении быстродействия не предъявляется, нагрузка может быть реализована одним из описанных ниже способов. Так, например, момент нагрузки, не зависящий от координат движения или близкий к нему может быть реализован с помощью фрикционных муфт или тормозов. Момент вязкого трения – при использовании электромашинных тормозов в режиме динамического торможения. Вентиляторный момент – на основе гидравлических и аэродинамических тормозов и т. д. Основным критерием для выбора НУ при этом является возможность получения требуемого характера нагрузки. Кроме того, эти и другие из рассмотренных выше моментов сопротивления могут быть реализованы в схеме «управляемый преобразователь – машина постоянного тока».

При необходимости кроме статических исследовать также и динамические режимы, наряду с указанным критерием необходимо учитывать быстрейшее действие нагрузочного устройства и возможность моделирования динамического момента. Обычные электромеханические, гидравлические тормоза, электрические машины в тормозных режимах работы и т. п.) для указанной цели непригодны, по причине невозможности моделирования динамического момента. Более всего для этих целей подходит система «управляемый преобразователь – машина постоянного тока». Поскольку использование управляемых преобразователей с естественной коммутацией ограничивает быстрейшее действие системы, то предлагается применять широтно-импульсные преобразователи с искусственной коммутацией.

Значительно приблизить условия проводимых исследований к реальным условиям эксплуатации приводов можно за счет введения в состав испытательного стенда управляемого устройства для физического моделирования нагрузок, воспроизводящего на валу испытуемого двигателя момент сопротивления в соответствии с выражением

$$M_{\text{нм}} = M_c + J_k \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} + R \cdot i \cdot (v - u_x) \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления (статический момент);  $J_k = J - J_\Sigma$  – корректирующий момент инерции при моделировании;  $J$  – требуемый момент инерции;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции роторов исследуемого двигателя и нагрузочной машины;  $R$  – приведенный радиус шкива двигателя;  $i$  – передаточное число редуктора между объектом управления и двигателем;  $v$  – поступательная скорость рабочего органа объекта управления в точке изменения массы;  $u_x$  – составляющая скорости присоединяющихся или уходящих частей массы вдоль направления  $x$  движущейся системы;  $m$  – масса движущихся частей системы.

С целью повышения точности исследований целесообразно использовать в составе испытательного стенда информационно-измерительный блок, содержащий измерительные преобразователи как электрических, так и механических величин, и блок цифровой обработки результатов, выполненные с применением микро-ЭВМ и ПК. Выяснено, что ввиду необходимости измерения низких угловых скоростей вращения (менее  $0,1 \text{ с}^{-1}$ ), наиболее приемлемым является частотный метод измерения скорости. Использование этого метода должно лежать в основе работы измерительного преобразователя угловой скорости вращения.

Во второй главе рассмотрены вопросы создания УНЭ, основным назначением которого является физическое моделирование (имитация) момента нагрузки на валу исследуемого двигателя.



В силу сказанного более приемлемым является регулирование по каналу якоря (см. рис. 1б).

Для предложенных схем определены аналитические соотношения между параметрами элементов УНЭ, при которых момент сопротивления, создаваемый исполнительной машиной УНЭ, инвариантен (не зависит) по отношению к угловой скорости вращения вала, и определяется лишь сигналом задания момента.

Для схемы рис. 1б таким условием является равенство

$$k_{oc} = \frac{c\Phi}{k_{п}}, \quad (2)$$

где  $k_{oc}$  – коэффициент передачи канала обратной связи по скорости вращения;  $c\Phi$  – произведение конструктивной постоянной машины ( $c$ ) на поток возбуждения ( $\Phi$ );  $k_{п}$  – коэффициент передачи преобразователя UZ1.

При этом момент сопротивления на валу УНЭ определяется выражением

$$M_c = U_{зм} \frac{k_p k_{п} c\Phi}{R_{я.ц.} + k_p k_{п} k_T}, \quad (3)$$

где  $U_{зм}$  – напряжение задания момента нагрузки;  $R_{я.ц.}$  – активное сопротивление якорной цепи исполнительной машины УНЭ;  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора А;  $k_T$  – коэффициент передачи канала обратной связи по току.

В схеме по рис. 1а момент сопротивления, создаваемый нагрузочной машиной, описывается выражением

$$M_c = U_{зм} \frac{(k_p k_{п} k_B c)^2}{k_{oc} R_{я.ц.} R_B + k_M (k_p k_{п} k_B c)^2}, \quad (4)$$

где  $k_B$  – коэффициент пропорциональности между током возбуждения и потоком;  $R_B$  – сопротивление обмотки возбуждения;  $k_M$  – коэффициент передачи канала обратной связи по моменту.

Выбор типоразмера исполнительной машины УНЭ определяется:

- максимальной угловой скоростью вращения  $\omega_{max}$  АВЭП;
- требуемыми значениями статического  $M_{c.тр.}$  и динамического

$M_{дин.тр.}$  моментов;

– желаемым временем быстрогодействия  $t_{\text{жел}}$  для исследования динамических процессов асинхронного АВЭП.

При этом должны выполняться следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\text{н}} \geq \omega_{\text{max}}; \\ \lambda M_{\text{н}} \geq M_{\text{с.тр.}} + M_{\text{дин.тр.}}; \\ M_{\text{н}} \geq \frac{M_{\text{с.тр.}} + M_{\text{дин.тр.}}}{t_{\text{жел}} \cdot (di_{\text{я}}/dt)_{\text{доп.}}} \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\omega_{\text{н}}$ ,  $M_{\text{н}}$  номинальные значения угловой скорости вращения и момента исполнительнй машины УНЭ;  $\lambda$  – допустимая кратковременная перегрузка по току якоря исполнительнй машины УНЭ.

При длительных испытаниях в статическом режиме необходимо также, чтобы  $M_{\text{н}} \geq M_{\text{с.тр.}}$ .

Анализ динамических свойств УНЭ произведен по структурной схеме рис. 2а, соответствующей функциональной схеме рис. 1б.

Для возможности регулирования суммарного момента инерции без смены вращающихся масс введена дополнительная обратная связь по скорости (показана пунктиром). Однозначно определить постоянную времени  $T_{\text{д}}$ , определяющую степень коррекции результирующего момента инерции, возможно лишь в случае, когда регулятор момента является безынерционным с передаточной функцией  $k_{\text{р}}$ . Тогда результирующий момент инерции определяется выражением

$$J_{\text{рез.}} = J_{\Sigma} \mp \frac{T_{\text{д}} k_{\text{п}} c_{\text{Ц}}}{R_{\text{я.ц.}} + k_{\text{т}} k_{\text{р}} k_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я.ц.}}}{R_{\text{я.ц.}}}$  – постоянная времени якорной цепи исполнительнй машины;  $L_{\text{я.ц.}}$  – индуктивность якорной цепи исполнительнй машины.

При выполнении условия (2) структурная схема (см. рис. 2а) преобразуется к виду рис. 2б. В этом случае быстрогодействие системы при вос-произведении момента сопротивления  $M_{\text{с}}$  определяется лишь достаточно малой электромагнитной постоянной времени якорной цепи  $T_{\text{я}}$  исполнительнй двигателя, а переходной процесс по заданию является аperiodическим (рис. 3), что соответствует требованию получения минимального перерегулирования.

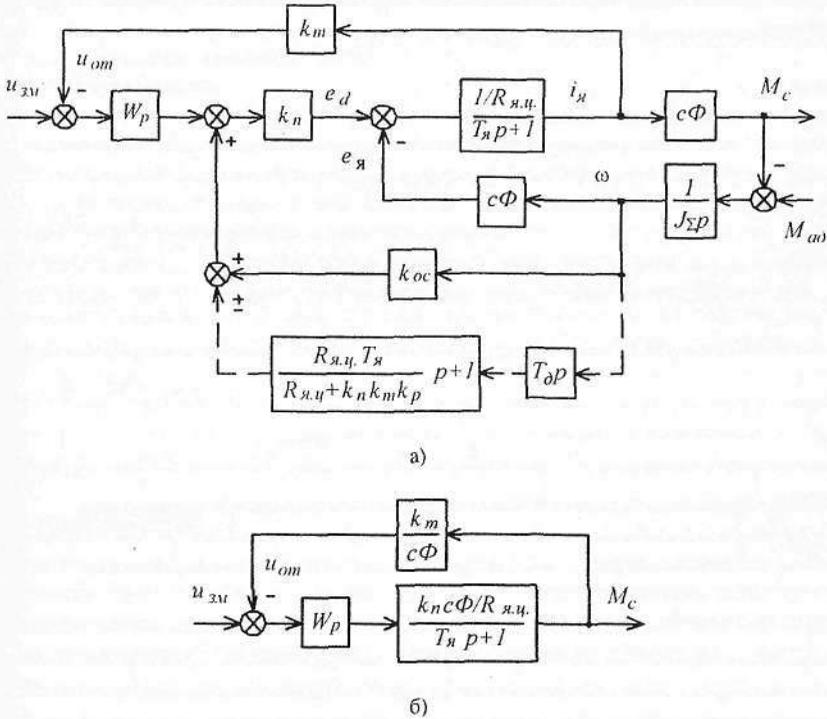


Рис. 2. Структурные схемы УНЭ

В то же время максимально возможное быстрдействие нагрузочного электропривода на основе машины постоянного тока ограничено величиной допустимой скорости нарастания тока якоря  $di_a/dt$ . Для машин малой и средней мощности величина  $di_a/dt = (30 \div 40) I_{я.н.}$ , а для машин большой мощности —  $di_a/dt = (15 \div 20) I_{я.н.}$ . Как видно из рис. 3 допустимое значение  $di_a/dt$  превышено в 100 раз ( $I_{я.н.} = 4,1 \text{ A}$ ). Для поддержания величины  $di_a/dt$  на допустимом уровне процесс установления момента сопротивления должен протекать под контролем задатчика интенсивности тока якоря (см. рис. 3).

*В третьей главе* рассмотрены вопросы синтеза структуры физической модели АВЭП периодического движения.

Основным ее назначением является получение различных режимов работы исследуемого АД, а именно: шагового, колебательного, режима "ползучей" скорости, а также при питании от вентильных преобразователей с управлением скоростью вращения и током.

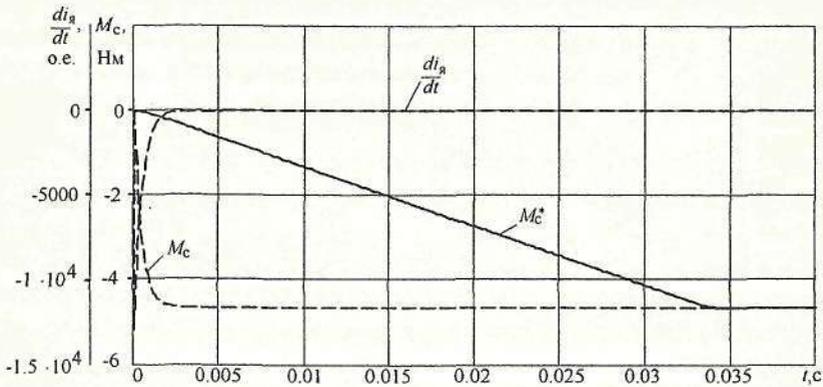


Рис. 3. Диаграммы работы управляемого нагрузочного электропривода при моделировании момента сухого трения:  $M_c$ ,  $di_a/dt$  — момент сопротивления и производная тока якоря при работе без задатчика интенсивности;  $M_c^*$  — момент сопротивления при работе с задатчиком интенсивности

Предложено реализовать такую модель на основе серийной тиристорной станции управления ТСУ-2, в которой, изменяя углы отпирания вентилей, можно реализовать принцип электрического дробления шага, а питание обмоток пульсирующим (выпрямленным) током повысит надежность фиксации положения ротора в конце шага. Для исключения вибрации ротора, вызванной наличием вращающей составляющей момента при питании от трехфазной сети, необходимо подключить все фазы двигателя к одной фазе сети.

Функциональная схема физической модели АВЭП периодического движения представлена на рис. 4.

Кроме силовой части (СЧ), гальванической развязки (ГР) и логического устройства (ЛУ), входящих в состав ТСУ-2, модель АВЭП включает фазосдвигающее устройство (ФСУ), распределитель импульсов (РИ) и генератор тактовых импульсов (ГТИ).

Проблему, связанную с измерением инфранизких угловых скоростей вращения (менее  $0,1 \text{ с}^{-1}$ ), возникающую при исследовании электроприводов со сложными законами движения, предлагается решить путем использования фотоэлектрических датчиков (ФЭД), например, типа ПДФ, ВЕ и измерительного преобразователя скорости вращения, выходной аналоговый сигнал которого соответствует значению угловой скорости вращения, а его знак — направлению вращения.

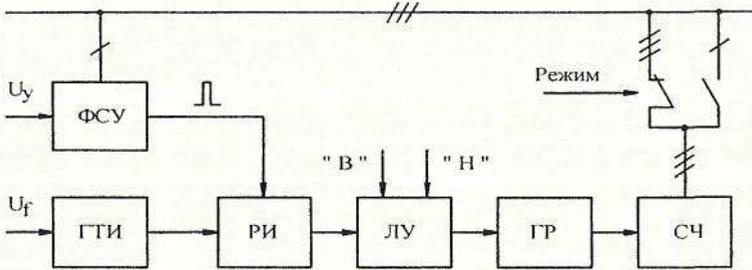


Рис. 4. Функциональная схема физической модели асинхронного вентильного электропривода периодического движения

При этом угловую скорость вращения можно измерить либо прямым, либо косвенным методом. В первом случае производится подсчет количества импульсов, поступающих от ФЭД за определенный интервал времени. Это количество импульсов оказывается прямо пропорционально скорости вращения. Во втором случае подсчитывается число импульсов тактовой частоты за период сигнала с выхода ФЭД. В этом случае число импульсов оказывается обратно пропорционально скорости вращения.

В четвертой главе приводится математическое и программное обеспечение анализа характеристик испытательно-измерительного комплекса. Ввиду того, что основные допущения для двухфазной модели ограничивают ее использование для анализа специальных режимов, предложено расчет специальных режимов АД проводить по трехфазной модели (в фазной системе координат).

Система дифференциальных уравнений, описывающая модель в фазной системе координат, имеет вид:

$$\begin{cases} d\psi_A/dt = -R_1 i_A + u_{\phi A}; \\ d\psi_B/dt = -R_1 i_B + u_{\phi B}; \\ d\psi_C/dt = -R_1 i_C + u_{\phi C}; \\ d\psi_a/dt = -R_2' i_a'; \\ d\psi_b/dt = -R_2' i_b'; \\ d\psi_c/dt = -R_2' i_c', \end{cases} \quad (7)$$

где  $\psi_A, \psi_B, \psi_C, R_1, i_A, i_B, i_C, u_{\phi A}, u_{\phi B}, u_{\phi C}$  — соответственно, потокосцепления, активное сопротивление, токи и напряжения фаз А, В и С статора;

$\psi_a, \psi_b, \psi_c, R_2, i_a, i_b, i_c$  - соответственно, потокосцепления, приведенное к статору активное сопротивление и токи фаз а, б и с ротора.

Электромагнитный момент определяется выражением

$$M_{эм} = -L_m p \left[ \begin{aligned} & i_a (i_a' \sin \gamma_{эл} + i_b' \sin(\gamma_{эл} + 120) + i_c' \sin(\gamma_{эл} - 120)) + \\ & + i_b (i_b' \sin \gamma_{эл} + i_c' \sin(\gamma_{эл} + 120) + i_a' \sin(\gamma_{эл} - 120)) + \\ & + i_c (i_c' \sin \gamma_{эл} + i_a' \sin(\gamma_{эл} + 120) + i_b' \sin(\gamma_{эл} - 120)) \end{aligned} \right], \quad (8)$$

где  $L_m$  - главная взаимная индуктивность между обмотками фазы статора и фазы ротора;  $p$  - число пар полюсов двигателя.

Алгебраические уравнения потокосцеплений имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \psi_A &= L_1 i_A - \frac{1}{2} L_{11} (i_B + i_C) + L_m [i_a' \cos \gamma_{эл} + i_b' \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_c' \cos(\gamma_{эл} - 120)]; \\ \psi_B &= L_1 i_B - \frac{1}{2} L_{11} (i_A + i_C) + L_m [i_b' \cos \gamma_{эл} + i_c' \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_a' \cos(\gamma_{эл} - 120)]; \\ \psi_C &= L_1 i_C - \frac{1}{2} L_{11} (i_B + i_A) + L_m [i_c' \cos \gamma_{эл} + i_a' \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_b' \cos(\gamma_{эл} - 120)]; \\ \psi_a &= L_2 i_a' - \frac{1}{2} L_{22} (i_b' + i_c') + L_m [i_A \cos \gamma_{эл} + i_C \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_B \cos(\gamma_{эл} - 120)]; \\ \psi_b &= L_2 i_b' - \frac{1}{2} L_{22} (i_a' + i_c') + L_m [i_B \cos \gamma_{эл} + i_A \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_C \cos(\gamma_{эл} - 120)]; \\ \psi_c &= L_2 i_c' - \frac{1}{2} L_{22} (i_b' + i_a') + L_m [i_C \cos \gamma_{эл} + i_B \cos(\gamma_{эл} + 120) + i_A \cos(\gamma_{эл} - 120)], \end{aligned} \right. \quad (9)$$

где  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  - собственная индуктивность обмотки фазы статора;  $L_{1\sigma}$  - индуктивность рассеивания обмотки фазы статора (по Т-образной схеме замещения);  $L_{11}$  - взаимная индуктивность между обмотками фаз статора;  $\gamma_{эл}$  - угол поворота ротора, в эл. рад.;  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  - приведенная к статору индуктивность обмотки фазы ротора;  $L_{2\sigma}$  - приведенная к статору индуктивность рассеивания обмотки фазы ротора (по Т-образной схеме замещения);  $L_{22}$  - приведенная к статору взаимная индуктивность между обмотками фаз ротора.

Уравнения механической части имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{\text{эл.}}}{dt} = \frac{(M - M_{\text{с}}) \cdot p}{J_{\Sigma}}; \\ \frac{d\gamma_{\text{эл.}}}{dt} = \omega_{\text{эл.}}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\omega_{\text{эл.}}$  – угловая скорость вращения ротора, в эл. рад/с;  
 $M = M_{\text{эм}} - \Delta M_{\text{мех.}}$  – момент на валу двигателя;  $\Delta M_{\text{мех.}}$  – механические потери в двигателе.

На базе программного обеспечения Turbo Pascal 7.0 и математического пакета MathCAD7 разработана программа Motor расчета вращательного и шагового режима АД, которая производит следующие операции:

- выбор режима работы АД (вращательный или шаговый);
- ввод параметров АД по Г-образной схеме замещения;
- выбор параметров нагрузки АД;
- расчет характеристик АД;
- вывод результатов расчета в файл с возможностью дальнейшего просмотра содержимого файла в математическом пакете MathCAD7.

Результаты расчета характеристик АД в шаговом режиме с углом поворота 30 эл. град представлены на рис. 5.

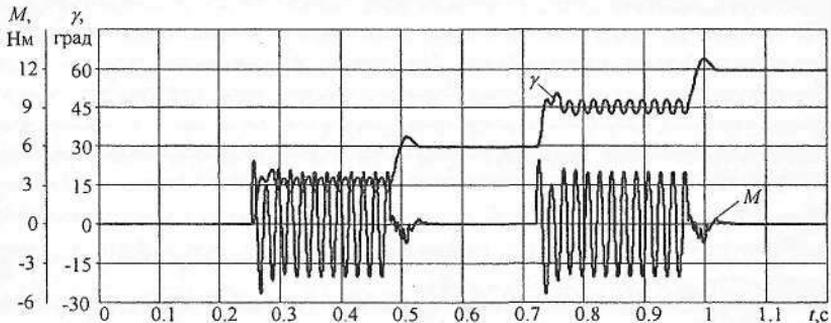
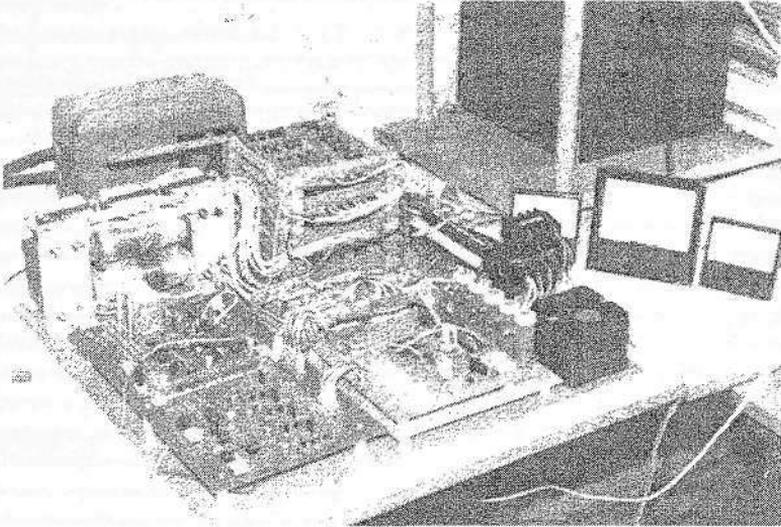
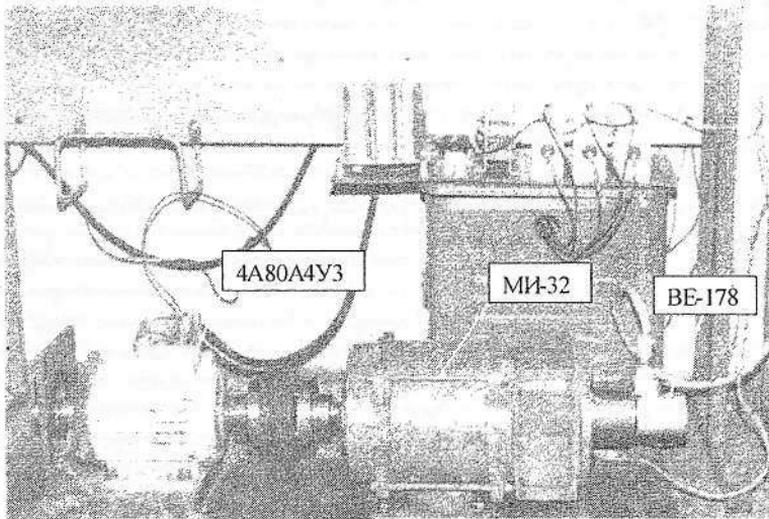


Рис. 5. Диаграммы работы асинхронного двигателя в шаговом режиме:  $M$  – момент на валу двигателя;  $\gamma$  – пространственный угол поворота ротора

В соответствии с изложенными подходами разработан и изготовлен электромеханический нагрузочный стенд для испытания АВЭП. Внешний вид стенда представлен на рис. 6. Стенд позволяет физически моделировать нагрузки типа вязкого трения, сухого трения, вентиляторную нагрузку, изменять момент инерции и комбинировать указанные виды нагрузок.



а)



б)

Рис. 6. Внешний вид нагрузочного стенда: а) преобразовательная часть; б) электромеханическая сборка

При этом исследуемый АВЭП может работать во вращательном режиме при питании от тиристорного регулятора напряжения, в шаговом режиме с шагом 30 эл. град и в колебательном режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научно-прикладная задача разработки структур, методов синтеза и схемных реализаций инвариантного электромеханического комплекса испытания АВЭП на основе машины постоянного тока. Это подтверждается следующими результатами, полученными в данной диссертационной работе:

1. Разработаны новые структуры УНЭ, что позволило обеспечить инвариантность момента сопротивления по отношению к угловой скорости вращения вала исследуемого АД и возможность регулирования момента инерции, а также предложены принцип построения и структура физической модели АВЭП [1, 2, 12, 13].

2. Для указанных структур УНЭ определены аналитические соотношения между параметрами элементов УНЭ, выполнение которых обеспечивает требуемый характер нагрузочного момента и исключает влияние на него возмущающего воздействия со стороны угловой скорости вращения вала АД [1, 5, 12, 13].

3. Получены рекомендации по выбору типоразмера исполнительной машины УНЭ, а также инженерные методики синтеза элементов САУ УНЭ в статике и динамике исходя из требований обеспечения максимального быстродействия, при ограничениях на перерегулирование и скорость нарастания тока якоря МПТ [3, 10, 11].

4. Разработано математическое и программное обеспечение анализа характеристик инвариантного электромеханического комплекса для испытания АВЭП [4, 6, 9].

5. На основе предложенных схемных решений создан опытный образец испытательного комплекса, позволяющий физически моделировать нагрузки типа сухого трения, вязкого трения, вентиляторную нагрузку, изменять момент инерции и комбинировать указанные виды нагрузок. При этом исследуемый АВЭП может работать во вращательном режиме при питании от тиристорного регулятора напряжения, в шаговом режиме с шагом 30 эл. град и в колебательном режиме. Результаты исследований внедрены на Белорусском металлургическом заводе г. Жлобин, а также в учебный процесс по специальности Т.11.02.00 Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» [1, 5, 7, 8].

## 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 //Известия ВУЗов. Энергетика. – 1999. – № 1. – С. 33-37.
2. Савельев В.А. Выбор способа торможения при формировании статических характеристик нагрузочного электропривода //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2002. – № 3-4. – С. 82-87.
3. Савельев В.А. Характеристики нагрузочного электропривода в динамике //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2002. – № 3-4. – С. 88-92.
4. Захаренко В.С., Савельев В.А. Принципы построения испытательных стендов //Современные проблемы машиноведения: Материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – Т. 1. – С. 113-114.
5. Савельев В.А. Универсальный испытательный стенд //Современные проблемы машиноведения: Материалы международной науч.-техн. конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – Т. 1. – С. 111-113.
6. Захаренко В.С., Савельев В.А. Расчет на ПЭВМ переходных процессов по структурным схемам электроприводов //Тез. докл. науч.-техн. конф. студентов вузов РБ. – Минск: БГУ, 1996. – С. 94.
7. Захаренко С.И., Савельев В.А., Борисов А.В. Автоматизированный комплекс испытаний безредукторных приводов //Тез. докл. межрегионального семинара-выставки. – Новоуральск: МИФИ-2, 1996. – С. 107.
8. Автоматизированный стенд испытания механических трансмиссий /С.И. Захаренко, В.В. Тодарев, В.С. Захаренко, В.А. Савельев //Актуальные проблемы развития транспортных систем: Тез. докл. международной науч.-техн. конф. – Гомель: БелГУТ, 1998. – С. 38.
9. Савельев В.А. Влияние способов торможения на характеристики нагрузочного электропривода //Современные проблемы машиноведения: Тез. докл. международной науч.-техн. конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002. – С. 112.
10. Савельев В.А. Особенности динамики нагрузочного стенда //Современные проблемы машиноведения: Тез. докл. международной науч.-техн. конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002. – С. 115.
11. Использование электрических машин постоянного и переменного тока в нагрузочной части испытательных стендов с рекуперацией энергии /С.И. Захаренко, В.В. Тодарев, В.С. Захаренко, В.А. Савельев //Современные проблемы машиноведения: Тез. докл. международной науч.-техн.

конф., посвящ. П.О. Сухому. – Гомель: «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002. – С. 116.

12. Пат. 5370 ВУ, МПК7 H02P 5/00, H04R 29/00. 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. 30.09.2003 //Афіцыйны бюлетэнь /Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2003. – № 3. – С 50.

13. Решение от 06.02.2003 г. о выдаче патента на изобретение по заявке № а19990325; Заявл. 06.04.1999. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда /В.И. Луковников, С.И. Захаренко, В.С. Захаренко, В.А. Савельев

## РЕЗЮМЕ

Савельев Вадим Алексеевич

Методы синтеза, структуры и схемные реализации инвариантного электромеханического комплекса на основе машины постоянного тока для испытания асинхронных вентильных электроприводов

Ключевые слова: испытательный комплекс, инвариантность, машина постоянного тока, асинхронный электропривод, система управления, синтез, математическое обеспечение, программное обеспечение.

Объект исследования: электромеханический комплекс для испытания электроприводов.

Предмет исследования: инвариантный электромеханический комплекс на основе машины постоянного тока (МПТ) для испытания асинхронных вентильных электроприводов (АВЭП).

Цель работы: разработка структур, методов синтеза и схемных реализаций инвариантного электромеханического комплекса на основе МПТ для испытания АВЭП, направленных на повышение качества и расширение диапазона нагрузочных испытаний.

Методы исследования и аппаратура: применялись теория автоматического управления и электропривода, а также численные методы решения дифференциальных и алгебраических уравнений. Проверка теоретических результатов проводилась экспериментальным путем на лабораторном стенде.

Разработаны новые принципы построения, структуры и схемные реализации управляемого нагрузочного электропривода (УНЭ) и физической модели АВЭП. Для указанных структур УНЭ найдены аналитические соотношения, обеспечивающие инвариантность нагрузочного момента по отношению к угловой скорости вращения вала испытуемого АД в статическом режиме. Разработаны рекомендации и получены соотношения для выбора типоразмера МПТ, а также синтеза элементов САУ УНЭ. Создано новое программное обеспечение анализа характеристик инвариантного электромеханического комплекса для испытания АВЭП. Результаты работы использованы на Белорусском металлургическом заводе, г. Жлобин.

Результаты и материалы исследований могут быть использованы при разработке электромеханических комплексов для испытания широкого класса приводов, при проведении пуско-наладочных работ, в инженерной практике при создании новых асинхронных электроприводов, в исследовательской деятельности и в учебном процессе.

Область применения: испытательная техника, автоматизированный электропривод.

## РЭЗЮМЭ

Савельёў Вадзім Аляксеевіч

Метады сінтэзу, структуры і схемныя рэалізацыі інварыянтнага электрамеханічнага комплексу на аснове машыны пастаяннага току для выпрабавання асінхронных вентыльных электрапрывадаў

Ключавыя словы: выпрабавальны комплекс, інварыянтнасць, машына пастаяннага току, асінхронны электрапрывад, сістэма кіравання, сінтэз, матэматычнае забеспячэнне, праграмае забеспячэнне.

Аб'ект даследавання: электрамеханічны комплекс для выпрабавання электрапрывадаў.

Прадмет даследавання: інварыянтны электрамеханічны комплекс на аснове машыны пастаяннага току (МПТ) для выпрабавання асінхронных вентыльных электрапрывадаў (АВЭП).

Мэта працы: распрацоўка структур, метадаў сінтэзу і схемных рэалізацый інварыянтнага электрамеханічнага комплексу на аснове МПТ для выпрабавання АВЭП, накіраваных на павышэнне якасці і пашырэнне дыяпазону нагрузачных выпрабаванняў.

Метады даследавання і апаратура: выкарыстоўваліся тэорыя аўтаматычнага кіравання і электрапрывада, а таксама лічбавыя метады рашэння дыферэнцыяльных і алгебраічных ураўненняў. Праверка тэарэтычных вынікаў праводзілася эксперыментальным шляхам на лабараторным стэндзе.

Распрацаваны новыя прынцыпы пабудовы, структуры і схемныя рэалізацыі кіруемага нагрузачнага электрапрывада (КНЭ) і фізічнай мадэлі АВЭП. Для указаных структур КНЭ знойдзены аналітычныя суадносіны, якія забяспечваюць інварыянтнасць нагрузачнага моманту ў адносінах да вуглавой хуткасці вярчэння вала выпрабуемага АД у статычным рэжыме. Распрацаваны рэкамендацыі і атрыманы суадносіны для выбару тыпаразмеру МПТ, а таксама для сінтэзу элементаў САК КНЭ. Створана новае праграмае забеспячэнне аналіза характарыстык інварыянтнага электрамеханічнага комплексу для выпрабавання АВЭП. Вынікі даследаванняў выкарыстаны на Беларускай металургічным заводзе, г. Жлобін.

Вынікі і матэрыялы даследаванняў могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы электрамеханічных комплексаў для выпрабавання шырокага класу прывадаў, пры правядзенні пуск-наладчых работ, у інжынернай практыцы пры стварэнні новых асінхронных электрапрывадаў, у даследчай дзейнасці і ў вучэбнам працэсе.

Галіна выкарыстання – выпрабавальная тэхніка, аўтаматызаваны электрапрывад.

## SUMMARY

Saveliev Vadim Alekseevich

Methods of syntheses, structures and circuitual realizations of invariant electromechanic complex on the base of direct current machine for testing asynchronous valve electric drives

Keywords: test complex, invariance, machine of direct current, asynchronous electric drive, managerial system, syntheses, mathematical provision, software.

Object of study: an electromechanic complex for testing an electric drives.

Subject of studies: an invariant electromechanic complex on the base of direct current machine (DCM) for asynchronous valve electric drives (AVED) testing.

Purpose of work: a structure development, methods of syntheses and circuitual realization of invariant electromechanic complex on the base of DCM for testing AVED, directed on quality increase and range expansion of load test.

Methods of study and equipment: the theories of automatic control and electric drives, as well as numerical methods of deciding of differential and algebraic equations were used. Checking up the theoretical results was conducted by the experimental way on the laboratory stand.

New principles of building, structures and circuitual realizations of operated loading electric drives (OLED) and physical models of AVED were designed. For mentioned structures of OLED analytical correlations, ensuring invariance of load moment related to angular velocities of rotating of testing AC drive in the steady-state mode were found. Recommendations and correlations for the choice of type DCM, as well as syntheses of elements SAC OLED were received. The new software for analysis of invariant electromechanic complex for testing AVED features was developed. Results of the work are used on the Belorussian metallurgical plant, Zhlobin.

Results and materials can be used at the electromechanic complex development for testing a broad class of drives, when conducting a starting-adjustment works and in the engineering practice when making new asynchronous electric drives, in research work and in the process of teaching.

Application – test technology, automated electric drive.



