

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

---

УДК 621.313.1:629.458

**Брель  
Виктор Валерьевич**

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ  
СО ВСТРАИВАЕМЫМ КОМБИНИРОВАННЫМ  
ТОРМОЗНЫМ УСТРОЙСТВОМ В СОСТАВЕ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТЫМИ  
ПУСКО-ТОРМОЗНЫМИ РЕЖИМАМИ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Гомель 2008

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» на кафедре «Теоретические основы электротехники»

Научный руководитель: Соленков Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, декан энергетического факультета учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Официальные оппоненты: Тариков Георгий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Мои́ла Влади́мир Степа́нович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» (г. Гомель)

Оппонирующая организация: Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» (г. Могилев)

Защита состоится 18 марта 2008 г. в 10:00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 при учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» по адресу: 246746, г. Гомель, проспект Октября, 48, корпус 2, аудитория 329. Телефон ученого секретаря (0232) 48-07-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Автореферат разослан 15 февраля 2008 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



В. В. Логвин

© Брель В. В., 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значение тормозных устройств в электроприводах возрастает в связи с постоянным увеличением движущихся масс, скоростей перемещения и частоты торможений в производственных процессах. В течение короткого периода времени тормозные устройства должны преобразовать в тепловую энергию значительное количество механической энергии, не снижая работоспособности как устройства, так и машины в целом.

В случае совместного выполнения асинхронного двигателя и механического тормоза (управляемого с помощью электромагнитного поля базового электродвигателя, специального встроенного электродвигателя или электромагнита) привод быстрого останова является более компактным и удобным. Такие устройства в дальнейшем будем называть асинхронными двигателями с электромеханическими тормозными устройствами (АД с ЭМТУ).

Существующие конструкции АД с ЭМТУ обладают рядом недостатков: пониженная износостойкость фрикционных накладок тормоза (требуют частой регулировки, смены тормозных накладок), не обеспечивают плавности торможения, имеющей важное значение для многих механизмов, и в ряде случаев рассчитанную конструкцию невозможно встроить в базовый АД без удлинения его вала. Решение данных проблем позволит создавать в условиях обычного электроремонтного цеха простые и дешевые конструкции АД с ЭМТУ, отвечающие современным техническим требованиям.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа являлась составной частью государственной программы прикладных исследований «Приборостроение» (ГБ № 76/04 от 16.01.04), выполняемой на кафедре «Теоретические основы электротехники» ГГТУ им. П. О. Сухого в соответствии с заданием «Приборостроение 1.09» (научный руководитель – канд. техн. наук П. П. Изотов).

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является разработка конструкции, методов расчета и проектирования асинхронного двигателя со встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ) в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

Для достижения этой цели были определены и решены следующие задачи:

– разработать принципиально новую конструкцию АД с ВКТУ на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения, обладающую повышенной износостойкостью и плавностью торможения;

– математически описать и исследовать электромеханические переходные процессы, протекающие в АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами;

– создать инженерный метод расчета и проектирования тормозных устройств с учетом проведенных теоретических исследований и требований, предъявляемых к АД с тормозными устройствами (АД с ТУ);

– экспериментальными исследованиями и практическим использованием проверить правильность полученных результатов.

**Положения диссертации, выносимые на защиту.** Автором защищаются:

– разработанная конструкция АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами, изготовленная на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения, обладающая повышенной износостойкостью и плавностью торможения;

– математическая модель, описывающая процессы электромеханического преобразования энергии в АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами;

– инженерные методы расчета и проектирования АД с ВКТУ;

– схема управления АД с ВКТУ.

**Личный вклад соискателя.** Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем [4-А], [6-А].

Научные результаты, полученные в соавторстве:

В [1-А], [8-А] соискатель совместно с канд. техн. наук Соленковым В. В. разработали обобщенную математическую модель АД с ТУ и исследовали различные электромеханические переходные процессы в них.

В [2-А], [3-А], [9-А] соискатель совместно с канд. техн. наук Соленковым В. В. исследовали различные конструкции АД с ТУ и разработали инженерные методы расчета и проектирования АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

В [5-А], [7-А] соискатель совместно с канд. техн. наук Соленковым В. В. исследовали различные схемы управления АД с ТУ и разработали новые схемы, отвечающие современным техническим требованиям.

**Апробация результатов диссертации.** Основное содержание, теоретические положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих международных и республиканских конференциях:

– международные научно-технические конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2002, 2004);

– международная научно-техническая конференция «Электроэнергия и будущее цивилизации» (г. Томск, 2004);

– международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2004);

– межкафедраальный семинар «Энергетика и промышленная электроника» УО «ГГТУ им. П. О. Сухого» (г. Гомель, 2005).

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе статей в журналах – 3 (одна в журнале «Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика», две в журнале «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого»), тезисов докладов – 6.

Всего объем опубликованных материалов составляет 1,12 авторского листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы составляет 125 страниц, в том числе 57 рисунков на 27 страницах, 7 таблиц на 3 страницах, 4 приложения на 9 страницах и библиографический список из 65 использованных источников на 5 страницах и списка 9 публикаций соискателя на 2 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая и экономическая ценность результатов проведенных исследований, перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ внешних и внутренних способов торможения в электроприводе. В результате выяснено, что как внешние, так и внутренние способы торможения электроприводов обладают рядом достоинств и недостатков. Из этого следует, что для каждого типа электроприводов необходим анализ тормозного режима, и, соответственно, выбор наиболее оптимального способа или системы торможения.

В диссертационной работе уделяется внимание широко распространенным электроприводам с частыми пуско-тормозными режимами на базе обычных АД с короткозамкнутым ротором (АД с КР) малой и средней мощности (электропривод конвейеров, вентиляторов, насосов, подъемных механизмов, станков и т. д.). В таких электроприводах применяются все электрические способы торможения, электромеханические тормоза и электромагнитные тормоза скольжения.

Сравнение способов торможения АД с КР показало:

– данные способы не всегда удовлетворяют современным требованиям торможения АД с КР. Каждый из них обладает недостатком, который

не позволяет при большом количестве торможений быстро, точно, надежно и плавно тормозить АД с КР;

– все электрические способы торможения при частых торможениях ведут к перегреву АД с КР и не обеспечивают точной и надежной остановки, так как вблизи нулевой скорости тормозной момент у них мал либо нестабилен;

– электромеханический тормоз, обеспечивая быстрое, точное и надежное торможение АД с КР, не обеспечивает плавное торможение, так как не позволяет регулировать величину тормозного момента, что приводит к большим ударным моментам при торможении, ограничивая его применение в электроприводах. Кроме того, электромеханический тормоз при частых торможениях подвержен быстрому износу фрикционных накладок;

– торможение АД с КР электромагнитным тормозом (муфтой), обеспечивая большой тормозной момент в диапазоне высоких скоростей и плавность торможения, на низких скоростях не обеспечивает быстрого, точного и надежного торможения без существенного увеличения конструкции муфты по сравнению с размерами двигателя.

Следовательно, можно предположить, что если увеличить износостойкость и плавность торможения, то оптимальным способом торможения АД с КР является торможение с использованием электромеханического тормоза. Износостойкость (допустимое число торможений) электромеханического тормоза можно увеличить, если торможение производить на пониженной скорости. Плавностью торможения обладает электромагнитный тормоз. Значит необходимо объединить электромеханический тормоз, торможение которого происходит на пониженной скорости, с электромагнитным тормозом (муфтой), которая будет обеспечивать большой тормозной момент в диапазоне высоких скоростей, а также плавность торможения.

Итак, если электропривод с частыми пуско-тормозными режимами, содержащий АД с КР малой или средней мощности, требует быстрого, точного, надежного и плавного торможения, то лучше всего использовать АД с комбинированным тормозным устройством (ТУ) на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты (тормоза) скольжения.

Далее были проанализированы современные технические требования, предъявляемые к подобным устройствам, и выявлены наиболее существенные из них. Была выбрана наиболее приемлемая конструкция электромеханического ТУ (ЭМТУ) для АД с комбинированным ТУ. Также были рассмотрены способы построения схем управления АД с ТУ.

На основании изложенного в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана принципиально новая конструкция АД с ВКТУ (со встраиваемым комбинированным тормозным устройством) на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения, обладающая повышенной износостойкостью и плавностью торможения.

2. Математически описаны и исследованы электромеханические переходные процессы, протекающие в АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

3. Создан инженерный метод расчета и проектирования тормозных устройств с учетом проведенных теоретических исследований и требований, предъявляемых к АД с ТУ.

4. Экспериментальными исследованиями и практическим использованием проверена правильность полученных результатов.

**Во второй главе** представлена функциональная схема АД с ВКТУ, а также математическая модель, с помощью которой исследованы электромеханические переходные процессы, протекающие в АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

Функциональная схема АД с ВКТУ представлена на рисунке 1.

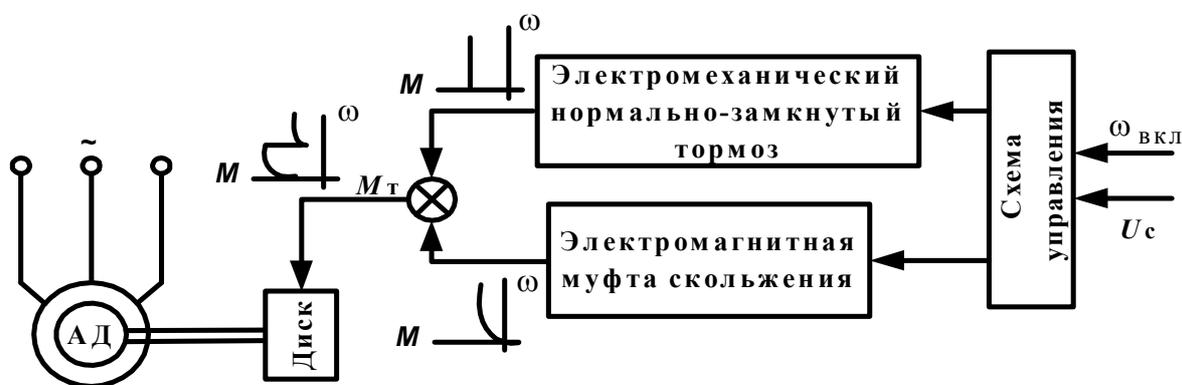


Рисунок 1 – Функциональная схема АД с ВКТУ

В общем случае АД с ВКТУ содержит:

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- электромеханический нормально-замкнутый тормоз;
- электромагнитную муфту скольжения;
- схему управления.

Формирование тормозной механической характеристики происходит таким образом. После отключения двигателя от сети форсирующее напряжение подается на электромагнитную муфту скольжения. Двигатель начинает тормозиться электромагнитным полем, создаваемым вихревыми токами в тормозном диске, который жестко связан с валом двигателя. Чем больше скорость вращения вала двигателя, тем больший тормозной момент создает электромагнитная муфта. В процессе торможения скорость вала замедляется и при достижении заданной скорости включения  $\omega_{\text{вкл}}$ , схема управления размыкает электромеханический тормоз и на вал двигателя действует суммарный тормозной момент от муфты и от электромеханического тормоза. Скорость включения  $\omega_{\text{вкл}}$  определяется необходимой тормозной механической характеристикой электропривода и задается из-

начально в схему управления. Требуемая тормозная механическая характеристика для электропривода определяется в ходе исследования или экспериментально.

С учетом известных допущений и базовых величин процесс электромеханического преобразования энергии в АД с ВКТУ может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений в относительных единицах [1-А]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\alpha}^\circ - \alpha'_s \psi_{s\alpha}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{r\alpha}^\circ - \frac{2}{3} u_{\dot{y}}^\circ; \\ \frac{d\psi_{s\beta}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\beta}^\circ - \alpha'_s \psi_{s\beta}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{r\alpha}^\circ + \alpha'_r k_s \psi_{s\alpha}^\circ - \omega_p^\circ \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{r\beta}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{r\beta}^\circ - \alpha'_r k_s \psi_{s\beta}^\circ + \omega_p^\circ \psi_{r\alpha}^\circ; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_p^\circ}{dt^\circ} = \frac{1}{H} \left[ M^\circ - (M_c^\circ + M_T^\circ \cdot 1t_{\text{тр}} + M_M^\circ(\omega_p^\circ)) \text{sign} \omega_p \right]; \quad (2)$$

$$M^\circ = \frac{k_r}{\sigma x_s^\circ} (\psi_{r\alpha}^\circ \psi_{s\beta}^\circ - \psi_{s\alpha}^\circ \psi_{r\beta}^\circ); \quad (3)$$

$$H = \frac{33,79 J n_1^2}{S_{\text{аз}}}, \quad (4)$$

где  $u_{\dot{y}}^\circ$  – напряжение на обмотке растормаживающего электромагнита, включенной последовательно с одной из фазных обмоток статора электродвигателя (в данном случае, с обмоткой фазы А);  $\dot{I}_\circ^\circ$  – тормозной момент, возникающий в результате трения фрикционных накладок тормозного устройства;  $H$  – момент инерции в относительных единицах;  $S_{\text{аз}}$  – номинальная, полная мощность двигателя, ВА;  $\dot{I}_i^\circ(\omega_\delta^\circ)$  – момент электромагнитной муфты в относительных единицах. Остальные обозначения в уравнениях (1)–(4) общепринятые и раскрыты в литературе.

Смоделированные переходные процессы торможения АД с ВКТУ (АИР90  $J_{\text{аз}} = 2J_{\text{дв}}$ ,  $\dot{I}_{\text{н}} = 0,1\dot{I}_i$ ) при  $\omega_{\text{аз}}^\circ = 0,25; 0,75$  представлены на рисунке 2.

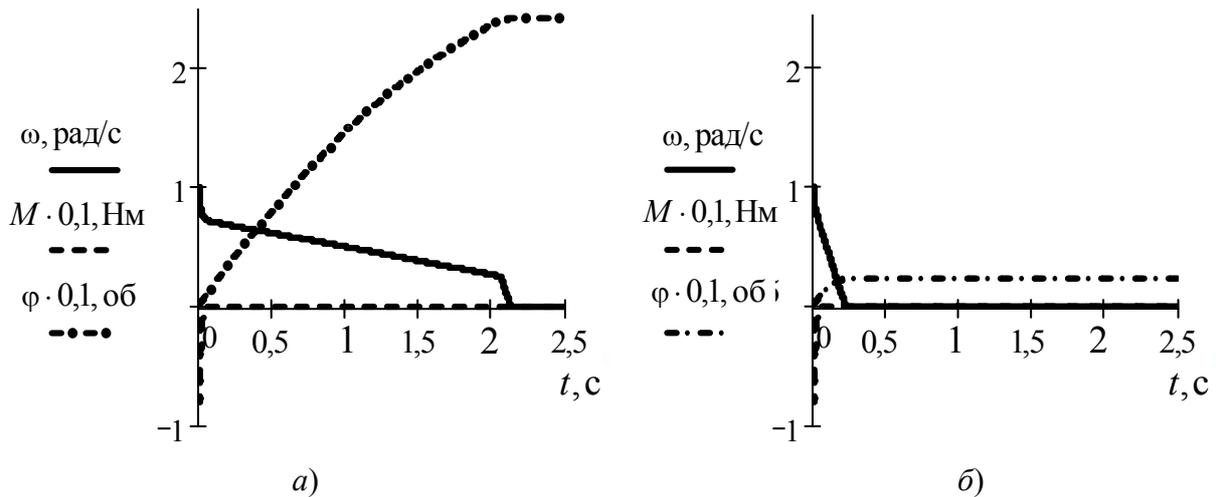


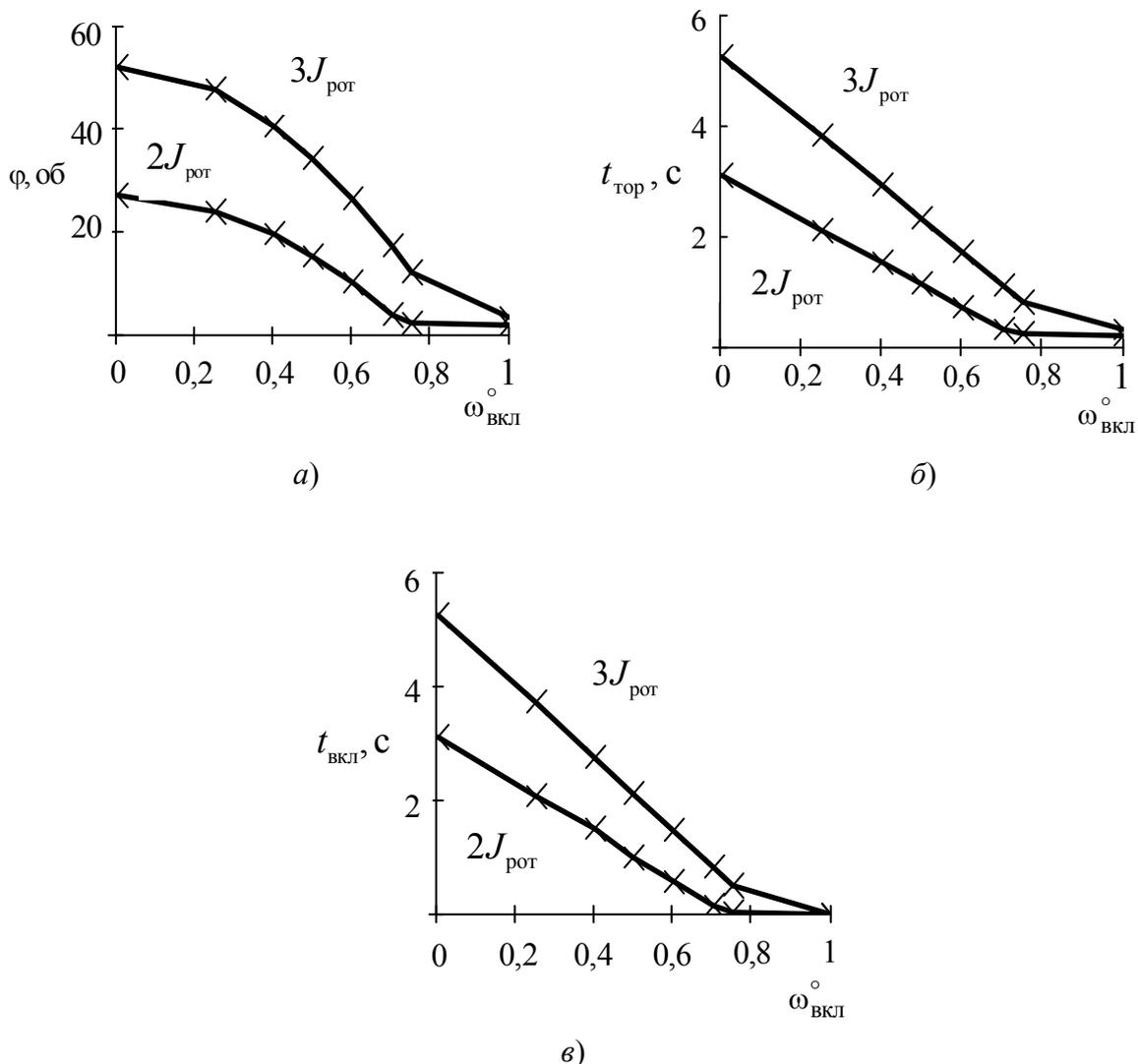
Рисунок 2 – Графики переходных процессов в АД с ВКТУ при  $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,25$  (а);  $0,75$  (б)

Как видно из рисунка 2, растормаживание электромеханического тормоза при различной скорости  $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$  привело к разным значениям времени  $t_{\hat{o}\hat{i}\hat{o}}$  и путей торможения  $\varphi$ . Различные электроприводы производственных механизмов требуют оптимальных характеристик торможения. Поэтому выбор  $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$  для каждого привода должен производиться на основе требований к времени торможения и пути торможения, к износостойкости тормозных накладок и плавности торможения. Например, если привод является электроприводом подачи, то важна точная остановка (путь торможения). Для быстрых производственных процессов важно время торможения. Однако наиболее быстрая и точная остановка не всегда является наилучшей. Следует учитывать, что для многих производственных механизмов максимальное значение ускорения при замедлении (плавности торможения) ограничено.

На рисунке 3 для двигателя АИР90 ( $J_{\hat{i}\hat{a}\hat{o}} = 2J_{\hat{o}\hat{i}\hat{o}}$  è  $3J_{\hat{o}\hat{i}\hat{o}}$ ,  $\hat{I}_{\hat{n}} = 0,1\hat{I}_{\hat{i}}$ ) приведены зависимости пути торможения  $\varphi$ , времени торможения  $t_{\hat{o}\hat{i}\hat{o}}$  и времени включения тормоза  $t_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$  от скорости включения  $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}$  электромеханического тормоза.

Анализируя графики, можно сделать полезный практический вывод, что оптимальным моментом включения электромеханического тормоза, обеспечивающим малый путь и малое время торможения, является момент при скорости  $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,6 \div 0,8$  от номинальной. При этом допустимое число торможений для фрикционной накладки (по сравнению с механическим торможением) увеличиться в  $N = \frac{1}{\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}}^2} = \frac{1}{0,6^2} \div \frac{1}{0,8^2} = 1,6 \div 2,8$  раза. Если

для АД с ВКТУ требуется определенная плавность торможения (замедления), то ее формируют механической характеристикой.



**Рисунок 3 – Графики зависимости пути торможения  $\varphi$  (а), времени торможения  $t_{\text{тор}}$  (б) и времени включения тормоза  $t_{\text{вкл}}$  от скорости включения  $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$  электромеханического тормоза (в)**

Чтобы определить эффективность использования АД с ВКТУ в промышленности, необходимо сравнить различные способы торможения электроприводов по их тормозным показателям: времени торможения и пути торможения. Сравнение целесообразно производить для электроприводов, в которых используется АД с ЭМТУ и АД с ВКТУ, а также динамическое торможение АД с ФР и АД с КР.

Были произведены исследования при различном моменте инерции электропривода и различной нагрузке на валу. Полученные данные представлены в таблицах 1, 2, 3 ( $I_{\text{н.д}}$  – трехфазный ток статора холостого хода).

Таблица 1 – Сравнение времени и пути торможения

$$(I_{\hat{A}} = 3I_{\hat{n},\delta}, J_{i\hat{a}\delta} = 2J_{\delta i\delta}, \dot{I}_{\hat{n}} = 0,1\dot{I}_{\hat{i}})$$

| Двигатель АИР90<br>(2,2 кВт, 1420 об/мин)                           | Сопротивление<br>цепи ротора | Время<br>торможения, с | Путь тормо-<br>жения, об |
|---|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| АД с фазным ротором<br>(динамическое торможение)                    | $0,4R_{p,i}$                 | 1,1                    | 9,6                      |
| АД с короткозамкнутым ротором<br>(динамическое торможение)          | Внутреннее<br>ротора         | 2,0                    | 18                       |
| Механическое торможение АД<br>( $\hat{E}_{\hat{e}\delta} = 1,5$ )   | –                            | 0,19                   | 1,75                     |
| АД с ВКТУ ( $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,6\omega_{\hat{m}})$ | –                            | 0,71                   | 10                       |

Таблица 2 – Сравнение времени и пути торможения

$$(I_{\hat{A}} = 3I_{\hat{n},\delta}, J_{i\hat{a}\delta} = 3J_{\delta i\delta}, \dot{I}_{\hat{n}} = 0,1\dot{I}_{\hat{i}})$$

| Двигатель АИР90<br>(2,2 кВт, 1420 об/мин)                           | Сопротивление<br>цепи ротора | Время<br>торможения, с | Путь тормо-<br>жения, об |
|---|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| АД с фазным ротором<br>(динамическое торможение)                    | $0,4R_{p,i}$                 | 1,85                   | 18,3                     |
| АД с короткозамкнутым ротором<br>(динамическое торможение)          | Внутреннее<br>ротора         | 3,5                    | 34,7                     |
| Механическое торможение АД<br>( $\hat{E}_{\hat{e}\delta} = 1,5$ )   | –                            | 0,32                   | 3,28                     |
| АД с ВКТУ ( $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,6\omega_{\hat{m}})$ | –                            | 1,69                   | 26,4                     |
| АД с ВКТУ ( $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,7\omega_{\hat{m}})$ | –                            | 1,09                   | 17,1                     |

Таблица 3 – Сравнение времени и пути торможения

$$(I_{\hat{A}} = 3I_{\hat{n},\delta}, J_{i\hat{a}\delta} = 3J_{\delta i\delta}, \dot{I}_{\hat{n}} = \dot{I}_{\hat{i}})$$

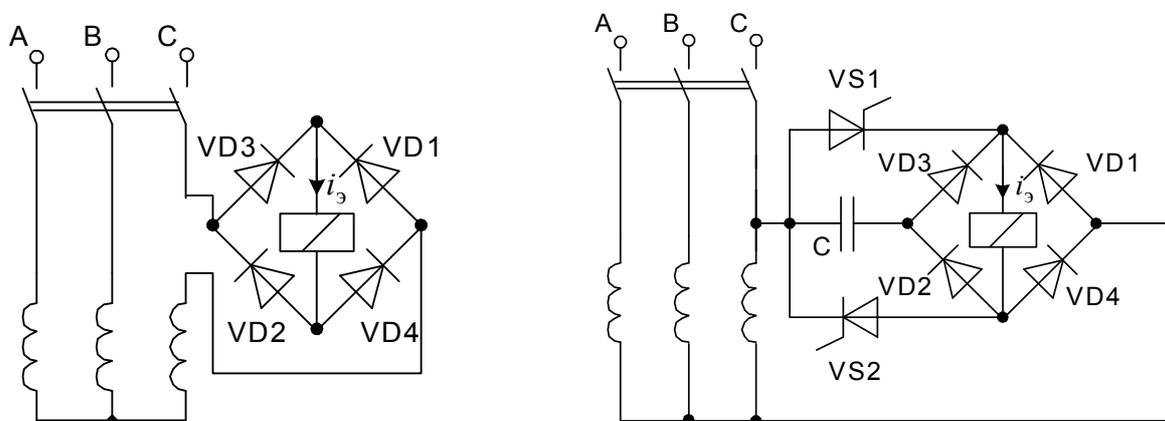
| Двигатель АИР90<br>(2,2 кВт, 1420 об/мин)                           | Сопротивление<br>цепи ротора | Время<br>торможения, с | Путь тормо-<br>жения, об |
|---|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| АД с фазным ротором<br>(динамическое торможение)                    | $0,4R_{p,i}$                 | 0,43                   | 4,25                     |
| АД с короткозамкнутым ротором<br>(динамическое торможение)          | Внутреннее<br>ротора         | 0,48                   | 4,78                     |
| Механическое торможение АД<br>( $\hat{E}_{\hat{e}\delta} = 1,5$ )   | –                            | 0,2                    | 2,0                      |
| АД с ВКТУ ( $\omega_{\hat{a}\hat{e}\hat{e}} = 0,6\omega_{\hat{m}})$ | –                            | 0,28                   | 3,38                     |

Анализ данных в приведенных таблицах показывает, что для большинства электроприводов тормозные показатели АД с ВКТУ являются допустимыми при  $\omega_{\text{аэс}} = (0,6 \div 0,7)\omega_{\text{нн}}$ . Следовательно, АД с ВКТУ является альтернативой широко распространенному динамическому торможению в АД с ФР и АД с КР малой и средней мощности.

В процессе пуска АД с ВКТУ схема форсировки растормаживает нормально-замкнутый электромеханический тормоз. При недостаточном быстродействии происходит подтормаживание электродвигателя в момент пуска. Подтормаживание АД ведет к появлению больших электромагнитных ударных моментов и увеличенному времени разгона. Закон изменения и длительность влияния тормозного момента в общем случае зависят от схемы форсировки и параметров тормозного устройства.

С точки зрения рационального проектирования АД с ВКТУ определенный интерес представляет исследование влияния несимметричных схем управления на пуск АД с ВКТУ и выявление возможных вариантов их совершенствования, а также исследование и разработка быстродействующей симметричной схемы управления, исключающей недопустимое подтормаживание АД.

При участии автора были исследованы различные схемы форсировки, а также разработаны и исследованы новые схемы, представленные на рисунке 4 ( $i_3$  – ток электромагнита).



**Рисунок 4 – Разработанные схемы форсировки силового электромагнита**

Исследование влияния форсирующих схем управления на пуск АД с ВКТУ показало, что в настоящее время более целесообразным является применение для АД с ВКТУ малой мощности несимметричных двухполупериодных схем форсировки, а для АД с ВКТУ средней мощности – симметричных двухполупериодных схем форсировки.

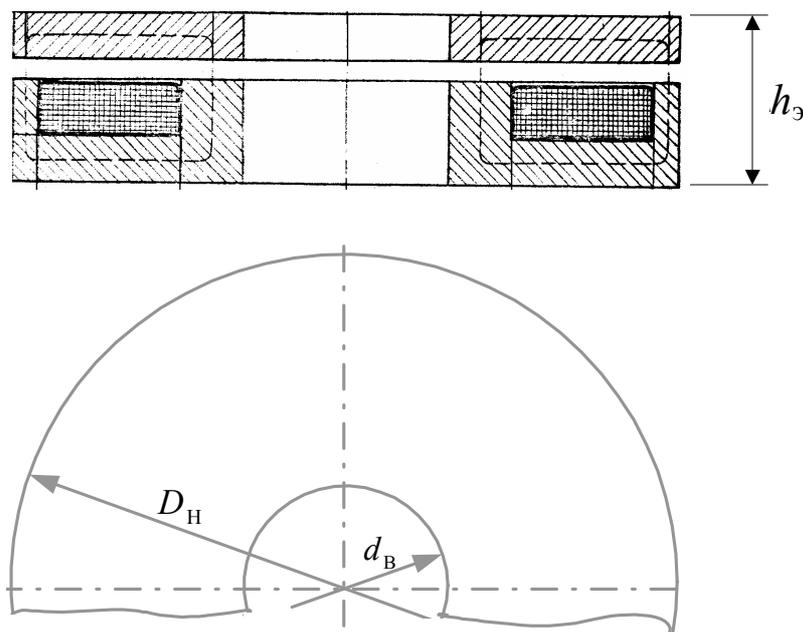
**В третьей главе** приводятся инженерные методы расчета и проектирования тормозных устройств с учетом проведенных теоретических исследований и требований, предъявляемых к АД с ВКТУ.

Электромеханический тормоз является одним из основных узлов АД с ВКТУ. Возрастающая потребность в электродвигателях с электромеханическими тормозами приводит к тому, что повышаются требования, в частности, к растормаживающим электромагнитам.

Наиболее полно сочетается с основными узлами асинхронного двигателя общепромышленного исполнения электромагнит цилиндрического типа с дисковым якорем (рисунок 5).

В общем виде задачу проектного расчета электромагнита формулируем следующим образом. По заданному усилию, ходу якоря, тепловому режиму и ограниченными габаритами электродвигателя рассчитать размеры магнитопровода и параметры катушки. При этом геометрические размеры и параметры электромагнита должны удовлетворять требованию минимальной высоты электромагнита  $h_э$  (рисунок 5). Выбор этого требования в качестве основного критерия оптимальности объясняется стремлением максимально приблизить осевую длину тормозного электродвигателя к соответствующей длине базового АД.

Исследования показали, что с увеличением внутреннего диаметра электромагнита  $d_А$  уменьшается  $h_э$  (рисунок 6). При этом значительно уменьшается объем активных материалов (меди и стали) электромагнита.



**Рисунок 5 – Электромагнит цилиндрического типа с дисковым якорем**

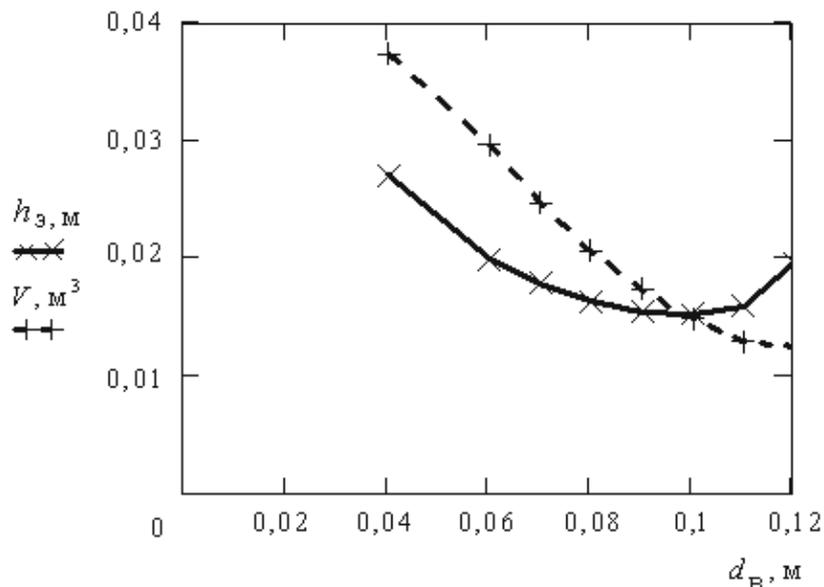
Максимальное увеличение  $d_А$  ограничено условиями прочности конструкции электромагнита и насыщением участков магнитопровода.

Учет данной оптимизации при проектировании встраиваемого электромагнита для двигателя АИР100L4У3 позволил уменьшить высоту электромагнита  $h_э$  с 27 мм до 15 мм, что является существенным, так как дли-

на вала электродвигателя со стороны вентилятора, задействованного под электромагнит, должна быть не более 20 мм, при этом объем активных материалов электромагнита уменьшился в 2 раза.

Полученные результаты были экспериментально подтверждены в лаборатории кафедры «Теоретические основы электротехники» УО «ГГТУ им. П. О. Сухого».

На рисунке 6 для двигателя АИР100L4У3 ( $D_i = 0,15$  м) приведены зависимости  $h_y$  и объема активных материалов электромагнита от  $d_A$ .

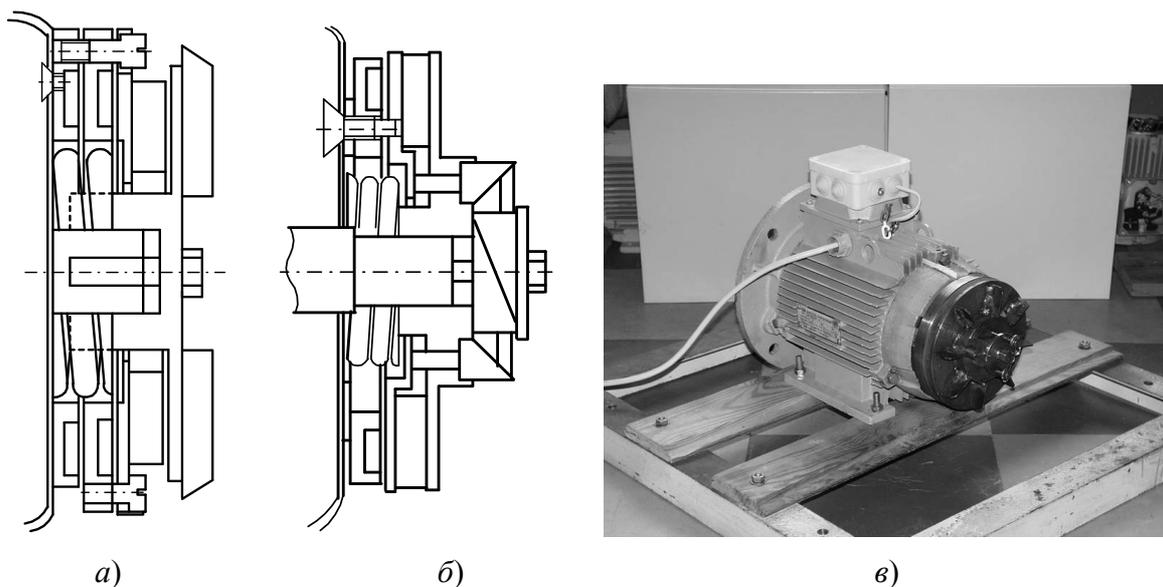


**Рисунок 6 – Зависимости  $h_y$  и объема активных материалов от  $d_A$  электромагнита**

Использование оптимизации при проектировании электромагнита, позволило также создавать простые встраиваемые электромеханические тормозные устройства с компенсацией воздушного зазора, что для некоторых производственных механизмов, не требующих плавной остановки или обладающих скоростью вращения вала АД  $n_{\text{н}} < 1500$  об/мин, является наиболее простым решением, по сравнению с конструкцией АД с ВКТУ. Данные устройства позволяют за счет компенсации воздушного зазора электромагнита неограниченно долго (полностью) стирать материал фрикционной накладки. Раньше фрикционная накладка стиралась на глубину максимально допустимого воздушного зазора (обычно 1...2 мм) электромагнита, и поэтому АД с ЭМТУ требовали частой регулировки.

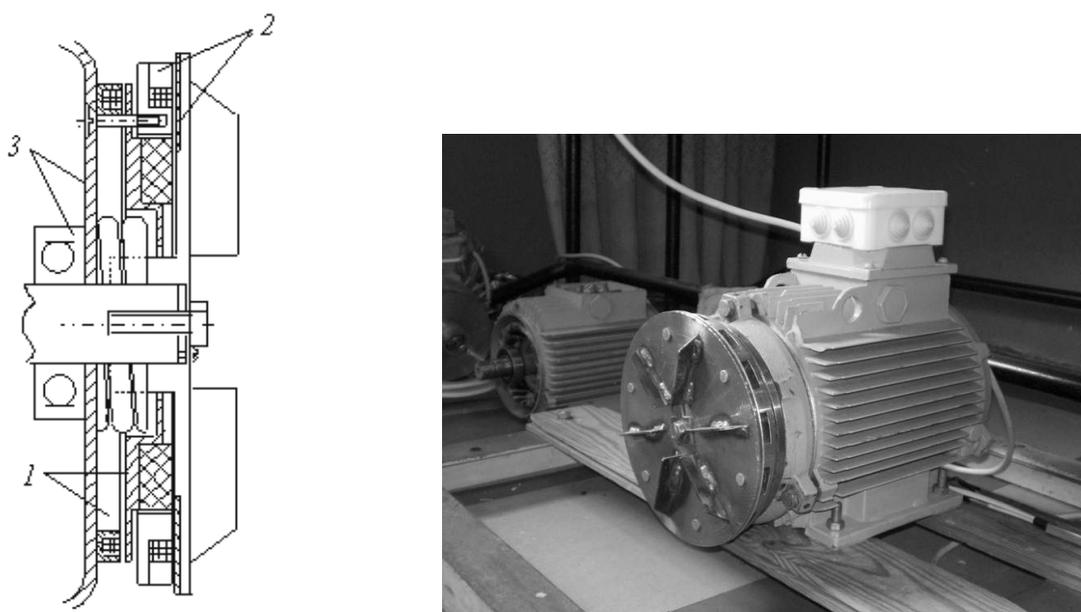
На рисунке 7, а представлена разработанная конструкция, использующая увеличенный ход якоря при рядом расположении электромагнитов.

На рисунке 7, б, в представлена разработанная конструкция и ее фотография, в которой компенсация воздушного зазора из-за износа фрикционных накладок осуществляется за счет использования клиновых передач.



**Рисунок 7 – Конструкции, использующие электромеханическое тормозное устройство с компенсацией воздушного зазора**

На рисунке 8 приведена конструкция электромеханической части АД с ВКТУ со стороны вала вентилятора и ее фотография.



**Рисунок 8 – Конструкция электромеханической части АД с ВКТУ**

В момент пуска АД с КР от схемы управления подается форсирующее напряжение на электромеханический тормоз *1*, фрикционные наклад-ки размыкаются, и двигатель начинает вращаться. Через небольшой промежуток времени после срабатывания электромеханического тормоза напряжение на обмотке электромагнита уменьшается до напряжения удержания.

В момент начала остановки АД от схемы управления подается форсирующее напряжение на электромагнитную муфту 2, под действием которой скорость двигателя уменьшается и в определенный момент (при пониженной скорости вращения АД) схема управления размыкает электромагнит, тем самым фрикционные накладки дополнительно затормаживают двигатель 3.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям разработанной конструкции АД с ВКТУ.

Был разработан и изготовлен стенд для экспериментального исследования переходных процессов, протекающих в АД с ВКТУ. Стенд состоит из ПЭВМ (Athlon 1.6GHz), цифрового датчика пути и блока сопряжения между ними. Стенд позволяет измерять путь торможения, время торможения и скорость вращения вала двигателя в конкретный момент времени.

Экспериментальные исследования на стенде переходных процессов в АД с ВКТУ подтвердили адекватность математической модели (1)–(4).

Экспериментальное исследование электромеханического тормоза и муфты скольжения подтвердило целесообразность применения разработанного инженерного метода расчета и рекомендаций.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

В результате проведенных исследований решена научно-прикладная задача разработки, исследования и проектирования АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

Это подтверждается следующими основными результатами, полученными в данной диссертационной работе:

1. Разработана принципиально новая конструкция АД с ВКТУ (со встраиваемым комбинированным тормозным устройством) на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения, обладающая повышенной износостойкостью и плавностью торможения [2-А], [5-А].

2. Математически описаны и исследованы электромеханические переходные процессы, протекающие в АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами [1-А], [7-А], [8-А].

3. Создан инженерный метод расчета и проектирования тормозных устройств с учетом проведенных теоретических исследований и требований, предъявляемых к АД с ТУ [3-А], [4-А].

4. Создано новое программное обеспечение для анализа переходных процессов, происходящих в АД с ВКТУ, и инженерных расчетов конструкций АД с ВКТУ. Экспериментальные исследования опытных образцов тормозных устройств и АД с ВКТУ на базе электромеханического тормоза, электромагнитной муфты скольжения и АД с короткозамкнутым ротором

убеждают в целесообразности применения при проектировании разработанных рекомендаций и методов расчета, приведенных в настоящей диссертационной работе [6-А], [9-А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанную математическую модель АД с ВКТУ можно использовать для исследования переходных процессов в большинстве видов АД с ТУ на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения.

2. Полученные в работе результаты позволяют изготавливать простые и дешевые конструкции АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами в обычном электроремонтном цехе.

3. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в работе, внедрены в электропривод подмостей ППЭ 12.01 ТУ36–1991-76 на ОАО «Добрушская бумажная фабрика «Герой труда», в электропривод накопителя шасси с мостами № 101.12.24.000000 на филиале РУП «Гомсельмаш» «ГЗСК» и в конструкцию исполнительного пункта управления городским освещением г. Гомеля (ГППИ «Приборостроение» ГБ № 76/04 от 16.01.04).

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

#### **Статьи в научных журналах**

1-А Соленков, В.В. Электромеханические переходные процессы в асинхронных двигателях с тормозными устройствами / В.В. Соленков, В.В. Брель // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 67–71.

2-А Соленков, В.В. Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами / В.В. Соленков, В.В. Брель // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2004. – № 4. – С. 28–32.

3-А Соленков, В.В. Оптимизация параметров электромагнита в двигателях с тормозными устройствами / В.В. Соленков, В.В. Брель // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2004. – № 3. – С. 33–36.

#### **Материалы конференций**

4-А Брель, В.В. Асинхронный электродвигатель со встроенным электромагнитным тормозом / В.В. Брель // Сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 25–26 апр. 2002 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2002. – С. 129–131.

5-А Соленков, В.В. Форсировка тормозного устройства с электромагнитным приводом / В.В. Соленков, С.А. Грачев, В.В. Брель // Электроэнергия и будущее цивилизации: сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф., Томск, 19–21 мая 2004 г. / Томск. гос. ун-т, 2004. – С. 321–322.

6-А Брель, В.В. Влияние несимметричных схем управления на переходные процессы в АД с тормозным устройством / В.В. Брель // Сб. материалов IV Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 8–9 апр. 2004 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2004. – С. 134–137.

7-А Соленков, В.В. Влияние начальной фазы сетевого напряжения на переходные процессы в АД с электромеханическим тормозным устройством / В.В. Соленков, В.В. Брель // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2004. – С. 295–296.

#### **Тезисы докладов**

8-А Соленков, В.В. Электромеханические переходные процессы в асинхронных двигателях с тормозными устройствами / В.В. Соленков, В.В. Брель // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 4–6 июля 2002 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2002. – С. 113.

9-А Соленков, В.В. Оптимизация параметров электромагнита в двигателях с тормозными устройствами / В.В. Соленков, В.В. Брель // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–2 июля 2004 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2004. – С. 105.

## РЕЗЮМЕ

**Брель Виктор Валерьевич**

Асинхронный электродвигатель со встраиваемым комбинированным тормозным устройством в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, встраиваемое тормозное устройство, частые пуски и торможения.

**Цель работы** – разработка конструкции, методов расчета и проектирования АД со встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ) в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

**Методы исследования.** Исследования статических и динамических режимов работы АД с ВКТУ выполнены на основе теории электропривода, электрических машин и теории магнитных цепей с использованием методов дифференциального исчисления. Расчет переходных процессов осуществлялся численными методами на ПЭВМ в программе, разработанной автором, и в типовых пакетах программ. Экспериментальные исследования с целью проверки целесообразности применения при проектировании разработанных рекомендаций и методов расчета проводились на лабораторном стенде.

**Полученные результаты и новизна.** Разработана принципиально новая конструкция АД с ВКТУ на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты скольжения, обладающая повышенной износостойкостью и плавностью торможения, в которой реализован принцип управления моментом включения электромеханического тормоза в процессе торможения. Создана математическая модель, описывающая процесс электромеханического преобразования энергии в АД с ВКТУ. Создано новое программное обеспечение, позволяющее анализировать процессы, протекающие в АД с ВКТУ. Разработаны инженерный метод расчета, оптимизации и проектирования АД с ВКТУ, а также схема управления АД с ВКТУ.

Полученные результаты позволят создавать в условиях обычного электроремонтного цеха простые и дешевые конструкции АД с ВКТУ в составе электропривода с частыми пуско-тормозными режимами.

**Область применения.** Организации и промышленные предприятия, занимающиеся разработкой и эксплуатацией электроприводов на базе асинхронных двигателей с частыми пуско-тормозными режимами.

## РЭЗІЮМЭ

**Брэль Віктар Валер'евіч**

Асінхронны электрарухавік з уладкаваным камбінаваным тармазным устройствам у складзе электрапрывода з частымі пуска-тармазнымі рэжымамі

**Ключавыя словы:** асінхронны электрарухавік, уладкаванае тармазное устройства, частыя пускі і тармажэнні.

**Мэта работы** – распрацоўка канструкцыі, метадаў разліку і праектавання АР з уладкаваным камбінаваным тармазным устройствам (АР з УКТУ) у складзе электрапрывода з частымі пуска-тармазнымі рэжымамі.

**Метады даследавання.** Даследаванні статычных і дынамічных рэжымаў работы АР з УКТУ выкананы на аснове тэорыі электрапрывода, электрычных машын і тэорыі магнітных ланцугоў з выкарыстаннем метадаў дыферэнцыяльнага вылічэння. Разлік пераходных працэсаў ажыццяўляўся лічбавымі метадамі на ПЭВМ у праграме, выкананай аўтарам, і ў тыпавых пакетах праграм. Эксперыментальныя даследаванні з мэтай праверкі мэтазгоднасці прымянення пры праектаванні распрацаваных рэкамендацый і метадаў разліку праводзіліся на лабараторным стэндзе.

**Атрыманыя вынікі і навізна.** Распрацавана прынцыпова новая канструкцыя АР з УКТУ на аснове электрамеханічнага тармаза і электрамагнітнай муфты слізгання, якая валодае павышанай зносастойкасцю і плаўнасцю тармажэння, у якой рэалізаваны прынцып кіравання момантам уключэння электрамеханічнага тармаза ў працэсе тармажэння. Створана матэматычная мадэль, якая апісвае працэс электрамеханічнага пераўтварэння энергіі ў АР з УКТУ. Створана новае праграмнае забеспячэнне, што дазваляе аналізаваць працэсы ў АР з УКТУ. Распрацаваны інжэнерны метады разліку, аптымізацыі і праектавання АР з УКТУ, а таксама схема кіравання АР з УКТУ.

Атрыманыя вынікі дазваляць ствараць ва ўмовах звычайнага электрарамонтнага цэху простыя і танныя канструкцыі АР з УКТУ ў складзе электрапрывода з частымі пуска-тармазнымі рэжымамі.

**Галіна прымянення.** Арганізацыі і прамысловыя прадпрыемствы, якія займаюцца распрацоўкай і эксплуатацыяй электрапрыводаў на аснове асінхронных рухавікоў з частымі пуска-тармазнымі рэжымамі.

## SUMMARY

Brel Victor Valerievich

Asynchronous electric motor with add-in combined arresting arrangement consisting of electrical drive with frequent start-braking conditions

**Key words:** asynchronous electric motor, add-in arresting arrangement, frequent starts and braking.

**The purpose of the research:** working out of the construction, computing and design methods of AM with add-in combined arresting arrangement (AM with ACAA) consisting of electrical drive with frequent start-braking conditions.

**Research methods.** Researches of static and dynamic working conditions of AM with ACAA were fulfilled on the basis of electrical drive and electrical machine theories, magnetic circuit theory with using differential calculus methods. Computation of transient processes was fulfilled by numerical method on computer using software, worked out by author, and standard software packages. Experimental investigations for the purpose of checking the appropriateness of application in designing worked out recommendations and computing methods was fulfilled on laboratory test bench.

**The result obtained.** Worked out the fundamentally new construction of AM with ACAA based on the electromechanical brake and the electromagnetic slipping clutch. This construction possesses heightened wear resistance and evenness deceleration and there is ability to manage the moment of switching the electromechanical brake in braking deceleration. Created mathematical model described the process of electromechanical transformation of energy in AM with ACAA. Created new software, which permit to analyze the processes passed in AM with ACAA. Worked out the engineering computing, design and optimization method of AM with ACAA and control circuit of AM with ACAA are.

The research findings will permit to create simple and cheap constructions of AM with ACAA consisting of electrical drive with frequent start-braking conditions in conditions of ordinary electro repair workshop.

**The area of application.** Organizations and industrial plants working out and operating the electrical drives based on asynchronous motors with frequent start-braking conditions.



Научное издание

**Брель  
Виктор Валерьевич**

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ  
СО ВСТРАИВАЕМЫМ КОМБИНИРОВАННЫМ  
ТОРМОЗНЫМ УСТРОЙСТВОМ В СОСТАВЕ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТЫМИ  
ПУСКО-ТОРМОЗНЫМИ РЕЖИМАМИ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Редактор *С. Н. Санько*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 15.02.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,29.

Тираж 100 экз. Заказ № /13.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.