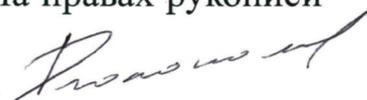


На правах рукописи



**Голоколос Дмитрий Анатольевич**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
СОВМЕСТИМОСТИ ЭКРАНИРОВАННЫХ  
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.09.03 —  
«Электротехнические комплексы и системы»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ»)

**Научный руководитель:** **Гринфельд Григорий Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Бурков Алексей Федорович,**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Судовая энергетика и автоматика» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)

**Малышева Ольга Александровна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС)

Защита состоится 2 июля 2018 г. в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «КнАГУ», [http://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/](http://sovet.knastu.ru/diss_defense/).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 999.086.03, канд. техн. наук, доцент



А.С. Гудим

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Стратегическим направлением развития электротехнических комплексов (ЭТК) и систем для самых разнообразных областей применения является разработка высокопроизводительного универсального энергетического оборудования с высокими эксплуатационными свойствами. На практике для специализированных технологических процессов часто имеет место необходимость в устройствах, одновременно соответствующих жестким требованиям стандартов и способных работать в условиях существенно отличающихся от проектных. Примерами таких устройств являются транспортное и морское оборудование, работающее в агрессивной среде при повышенной влажности; установки для металлургии, использующиеся в широком диапазоне температур и давлений; строительное и сельскохозяйственное оборудование, которое должно обеспечивать непрерывную эксплуатацию в течении многих лет вследствие ограниченных возможностей по его ремонту.

Обеспечить требуемый уровень надежности и работоспособность в нестандартных условиях эксплуатации при сохранении высоких регулировочных показателей могут частотно-управляемые экранированные асинхронные электроприводы. Однако, применение таких приводов вызывает необходимость обеспечения их электромеханической совместимости с остальными элементами комплекса. Анализ имеющихся в литературе данных показал, что на сегодняшний день вопросы обеспечения электромеханической совместимости экранированных асинхронных электродвигателей (АД) в ЭТК практически не рассматривались. Отсутствие адаптированных методик проектирования подобных устройств и их применения в составе ЭТК для специализированных технологических процессов подтверждает актуальность данной работы.

**Целью** данной работы является исследование вопросов электромеханической совместимости частотно-управляемого экранированного асинхронного электродвигателя (АД) для работы в составе ЭТК для специализированных технологических процессов и обеспечение критериев электромеханической совместимости за счет обоснованного выбора основных проектных параметров электропривода.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Провести анализ структурной схемы ЭТК на основе экранированного АД с учетом особенностей его применения и разработать критерии электромеханической совместимости электродвигателя с элементами ЭТК.
2. Определить и классифицировать основные проектные параметры, влияющие на эксплуатационные характеристики ЭТК и обеспечивающие электромеханическую совместимость экранированного АД.
3. Разработать математическую модель экранированного АД, интегрированного в ЭТК.
4. Исследовать влияние проектных параметров экранированного АД на выходные характеристики в соответствии с критериями электромеханической совместимости.

5. Синтезировать систему управления применительно к математической модели, учитывающей основные проектные параметры экранированного АД.

6. Исследовать различные режимы работы и разработать рекомендации по обеспечению электромеханической совместимости экранированного АД, интегрированного в ЭТК для специализированных технологических процессов.

**Объектом исследования** является электротехнический комплекс на основе частотно-управляемого экранированного асинхронного двигателя.

**Предметом исследования** являются процессы электромеханического преобразования энергии в экранированном АД, интегрированном в ЭТК для специализированных технологических процессов.

**Методы исследования:** научные исследования диссертационной работы основаны на использовании теории дифференциальных уравнений, современных методах математического моделирования, теории обобщенного электромеханического преобразователя, теории автоматического управления и экспериментальных исследований. В теоретических исследованиях применялись аналитические и численные методы расчета.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Критерии электромеханической совместимости экранированного АД, обеспечивающие заданные показатели эффективности ЭТК.

2. Результаты математического моделирования частотно-управляемого экранированного АД в составе электротехнического комплекса.

3. Методика синтеза адаптированной системы векторного управления и алгоритм предварительной идентификации ненаблюдаемых параметров экранированного АД.

4. Результаты исследования выходных характеристик экранированного АД в различных режимах работы ЭТК.

**Научная новизна:**

1. Критерии электромеханической совместимости экранированного АД для ЭТК специализированных технологических процессов.

2. Модифицированная математическая модель и результаты моделирования выходных характеристик экранированного АД с учетом характера нагрузки.

3. Алгоритм предварительной идентификации ненаблюдаемых параметров экранированного АД, используемый в адаптированной системе управления и позволяющий обеспечить заданные критерии электромеханической совместимости.

4. Методы исследования влияния параметров экранированного АД на выходные характеристики ЭТК в различных режимах работы.

**Практическая значимость** полученных результатов и выводов заключается в обосновании критериев электромеханической совместимости экранированного АД для ЭТК; параметрической и математической модели экранированного АД; определении основных параметров экранированного АД, обеспечивающих его электромеханическую совместимость с ЭТК в различных режимах работы.

**Апробация работы.** Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались на:

1. Международной научно-практической конференции «Стратегические вопросы мировой науки», Перемышль, 2013 г;
2. Международной научно-технической конференции «Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий», КнАГТУ, 2013 г;
3. Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод на транспорте и в промышленности», ДВГУПС, 2013 г;
4. Международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности «Дальневосточная весна-2014», КнАГТУ, 2014.
5. Научной конференции с международным участием XLVI «Неделя науки СПбПУ», СПбПУ, 2017.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 в научно-технических журналах и сборниках, 5 — в тезисах докладов и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 168 страниц текста с 86 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 96 наименований.

## **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цели, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** выполнен обзор современного состояния в области электротехнических комплексов на основе герметичных электромеханических преобразователей; проанализированы известные и перспективные конструкции герметичных электромеханических преобразователей, их преимущества и недостатки; рассмотрена структурная схема ЭТК с экранированным асинхронным двигателем; разработаны критерии электро-механической совместимости; определены и классифицированы проектные параметры комплекса.

Современный электротехнический комплекс, структурная схема которого представлена на рисунке 1, представляет собой совокупность взаимодействующих между собой устройств, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики.

Электротехнический комплекс, в первую очередь, предназначен для преобразования электрической энергии в другие её виды и передачи механической энергии к исполнительному механизму, поэтому электромеханический преобразователь является

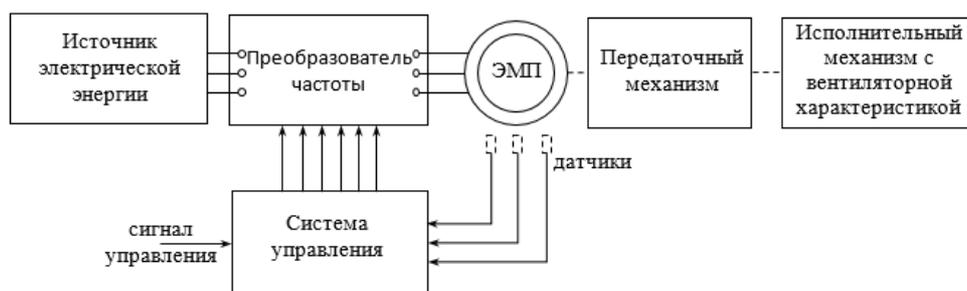


Рисунок 1 — Общая структурная схема электротехнического комплекса

базовым элементом комплекса. Обеспечение требуемого уровня надежности при работе в сложных условиях специализированных технологических процессов, возможно при использовании экранированного АД в качестве электромеханического преобразователя. Особенностью таких двигателей является наличие в зазоре между статором и ротором экранирующего элемента из немагнитного конструкционного материала (рисунок 2) надежно герметизирующего статор с обмоткой и защищающего их от воздействия окружающей среды.

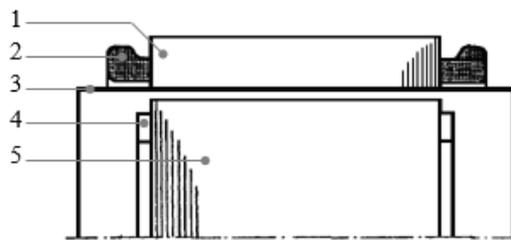


Рисунок 2 — Герметизации электродвигателя с помощью экранирования статора:

- 1 – магнитопровод статора; 2 – лобовые части обмотки статора;
- 3 – экранирующий/капсулирующий элемент статора; 4 – короткозамкнутая обмотка ротора; 5 – магнитопровод ротора.

Неотъемлемой частью ЭТК является система управления, которая должна обеспечивать необходимое качество регулирования. Современные системы управления ЭТК предполагают наличие математической модели объекта управления. Параметрическое или структурное несоответствие математической модели объекта управления эталонной модели, используемой преобразователем частоты, влияет на качество выходных характеристик ЭТК. Для синтеза эффективной системы управления экранированным АД необходимо исследовать процессы происходящие в его элементах и определить их влияние на электромеханическую совместимость с остальными элементами ЭТК.

Под электромеханической совместимостью понимается отсутствие существенного влияния экранированного АД на рабочие характеристики ЭТК в различных режимах работы. Конструктивной особенностью экранированного АД является наличие экранирующего элемента в зазоре между статором и ротором. Для обеспечения электромеханической совместимости экранированного АД достаточно учесть влияние этой конструктивной особенности на характеристики ЭТК. Таким образом, необходимо определить и

классифицировать проектные параметры экранированного АД, влияющие на его выходные характеристики. Поскольку номинальные параметры ЭМП и параметры нагрузки считаются заданными, можно выделить следующие параметры, теоретически влияющие на выходные характеристики экранированного АД:

1. Материал экранирующего элемента, который должен обеспечивать высокую теплопроводность, высокую коррозионную стойкость и низкие удельные электрические потери.

2. Размерные соотношения, определяемые геометрией ЭМП и экранирующего элемента – диаметром внутренней расточки статора  $D$ , длиной воздушного зазора  $l_\delta$ , длиной вылета лобовых частей обмоток статора  $l_b$  и толщиной экрана  $\Delta$ .

Во **второй главе** рассмотрено влияние основных проектных параметров на выходные характеристики ЭТК; получена эмпирическая зависимость, связывающая проектные параметры ЭТК с величиной электрических потерь в экранирующем элементе; проведено экспериментальное исследование экранированного АД; разработаны рекомендации по выбору основных проектных параметров, обеспечивающих электромеханическую совместимость.

Анализ литературных источников показал, что для экранированных АД не существует апробированных методик расчета, позволяющих учесть влияние приведенных проектных параметров на его выходные характеристики. Основной причиной этого является сложность преобразования энергии в герметичных устройствах с экранирующим элементом, связанная с необходимостью одновременного учета и взаимного влияния физических процессов, происходящих в его элементах. Теоретические исследования Фуллера, Трикея, Брука, Вевюрко, Поклонова основаны на гипотезах о распределении вихревого тока в экранирующем элементе или связаны с аналитическим решением задач о распределении поля и вихревого тока. Предложенные аналитические решения дают приближенную сравнительную оценку потерь возникающих в экранирующем элементе и не могут быть использованы для практических целей. Для более точного определения зависимости потерь от определяющих параметров комплекса, необходимо использовать численные методы.

Для решения поставленной задачи численным методом может быть использован метод конечных элементов, позволяющий избавиться от допущения о распределении плотности тока в экранирующем элементе. Постановка и решение полевой задачи, связанной с вычислением векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$ , магнитной индукции  $\vec{B}$ , напряжённости магнитного поля  $\vec{E}$  и плотности тока  $\vec{J}$  в каждой точке расчётной области  $V$ , приводит к выражению, позволяющему экспериментально найти потери, возникающие в экранирующем элементе:

$$P_{\text{э,эксп}} = \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} \, dV = \rho \int_V \vec{J}^2 \, dV. \quad (1)$$

Результаты расчёта потерь в экранирующем элементе методом имитационного численного моделирования в пакете Ansys Maxwell при вариации параметров как самого экранированного АД так и экрана, для двигателей в диапазоне мощностей от 1,1 до 110 кВт для частоты 50 Гц представлены на рисунке 3. Толщина и удельное электрическое сопротивление экрана задавались в следующих диапазонах:  $\Delta = 0,05 \cdot 10^{-3} \div 0,2 \cdot 10^{-3}$  и  $\rho = 0,097 \cdot 10^{-6} \div 1,05 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Значения рассчитанных потерь в экранирующем элементе приведены в относительных единицах. В качестве базисной мощности выбрана номинальная мощность двигателя. Как видно из графиков, потери в экране пропорци-

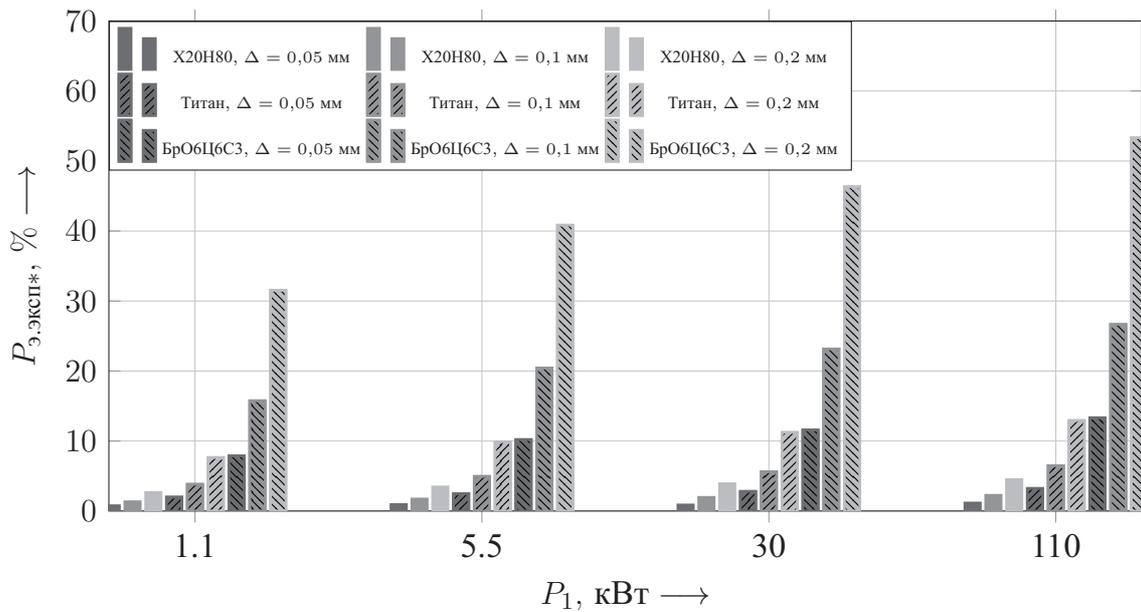


Рисунок 3 — Потери мощности в экране для экранированных АД в диапазоне мощностей от 1,1 до 110 кВт

ональны толщине экранирующего элемента  $\Delta$  и обратно пропорциональны удельному электрическому сопротивлению материалу экрана  $\rho$ . Данные параметры оказывают значительное влияние на величину потерь в экранирующем элементе, изменяя её в широком диапазоне: до 60 % при том же конструктивном исполнении двигателя.

Следующим по значимости параметров является соотношение длины вылета экрана к величине полюсного деления  $l_b/\tau$  для всего рассмотренного диапазона мощностей (рисунок 4).

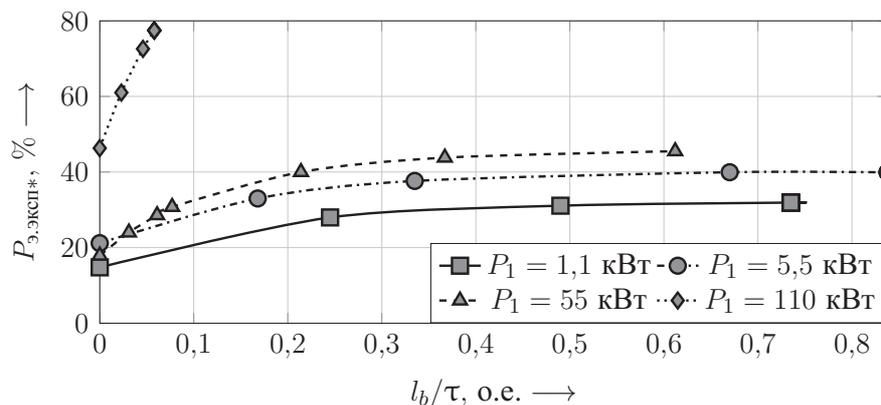


Рисунок 4 — Потери мощности в экране при разном  $l_b/\tau$  (БрО6Ц6С3,  $\Delta = 0,2$  мм)

Зависимости, представленные на графике, имеют вид близкий к параболическому, а асимптота графиков обратно коррелирует с величиной  $\lambda$  – соотношением длины активной части экрана к полюсному делению.

На рисунке 5 приведена зависимость потерь в экране при различной частоте питающего напряжения  $f$  для экранированного АД мощностью 1,1 кВт с экранирующим элементом из бронзы марки БрО6Ц6С3 толщиной  $\Delta = 0,2$  мм. Сопротивление экрани-

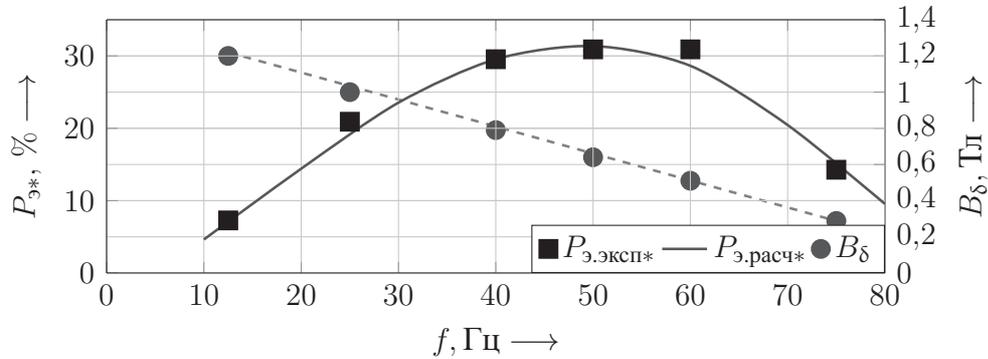


Рисунок 5 – Зависимость потерь в экране и индукции в воздушном зазоре от частоты для экранированного АД мощностью 1,1 кВт (БрО6Ц6С3,  $\Delta = 0,2$  мм)

рующего элемента  $Z_x$  пропорционально индукции в магнитном зазоре и обратно пропорционально частоте питающего напряжения:

$$Z_x \sim m_x \frac{(B_\delta f)^2}{P_{э,эксп}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) с учетом рисунка 5 можно сделать вывод, что сопротивление экранирующего элемента остаётся неизменным с увеличением частоты питающего напряжения. Такая зависимость означает, что сопротивление экрана имеет чисто активный характер.

Результаты расчёта потерь в экранирующем элементе для рассмотренного диапазона мощностей можно с достаточной точностью аппроксимировать следующим выражением:

$$P_{э,расч} = p_n B_\delta^2 \tau^3 f^2 l_t \Delta \rho^{-1} \left( 1 + \frac{1}{\frac{\lambda}{2} (cth \frac{\pi \lambda}{2} + cth \frac{\pi l_b}{\tau})} \right). \quad (3)$$

где  $p_n$  – количество полюсов ЭМП;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре, Тл;  $\tau$  – величина полюсного деления, м;  $f$  – частота питающего напряжения, Гц;  $l_t$ ,  $\Delta$  – длина и толщина активной части экранирующего элемента соответственно, м;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала экранирующего элемента, Ом · м.

Поскольку потери в экране имеют нелинейную зависимость от входных переменных, для оценки корреляции между экспериментально полученными значениями  $P_{э,эксп}$  и значениями, полученными расчётным способом  $P_{э,расч}$ , используется индекс корреляции  $R$ :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_P^2}} = 0,998. \quad (4)$$

Полученное значение индекса корреляции означает, что эмпирическая зависимость (3) с высокой точностью описывает результаты численного эксперимента.

Экспериментальная проверка полученного выражения проводилась на опытном экранированном АД мощностью 1,1 кВт с использованием лабораторного стенда и измерительного оборудования. Структурная схема стенда изображена на рисунке 6.

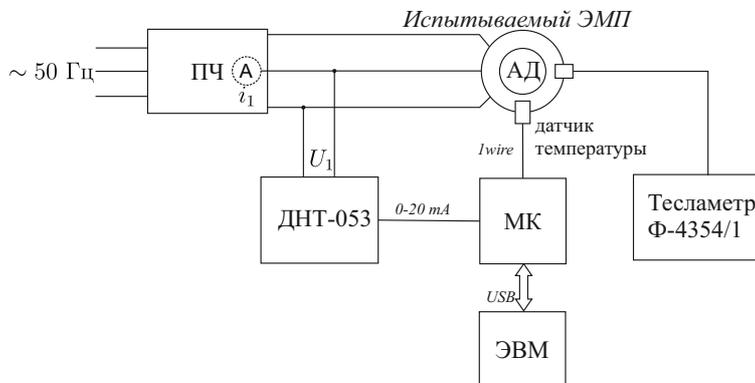


Рисунок 6 — Структурная схема стенда для испытаний экранированного АД

Наведенные вихревые токи в экранирующем элементе ведут к его нагреву. Оценить величину потерь в экране можно, согласно уравнению теплового баланса (5), по превышению его температуры над температурой окружающей среды.

$$P_3 = \lambda S_3 \Theta_{уст}. \quad (5)$$

На стенде получены кривые нагрева (рисунок 7а) экранированного АД при разных частотах питающего напряжения, по которым рассчитывалась установившаяся температура. Зависимости расчетных и экспериментально полученных потерь в экране приведены на рисунке 7б.

Найденная экспериментальная зависимость хорошо согласуется с результатами полученными расчетным путем. Погрешность вычислений находится в пределах 20 %, что свидетельствует об адекватности предложенного подхода по определению электро-механической совместимости экранированного АД.

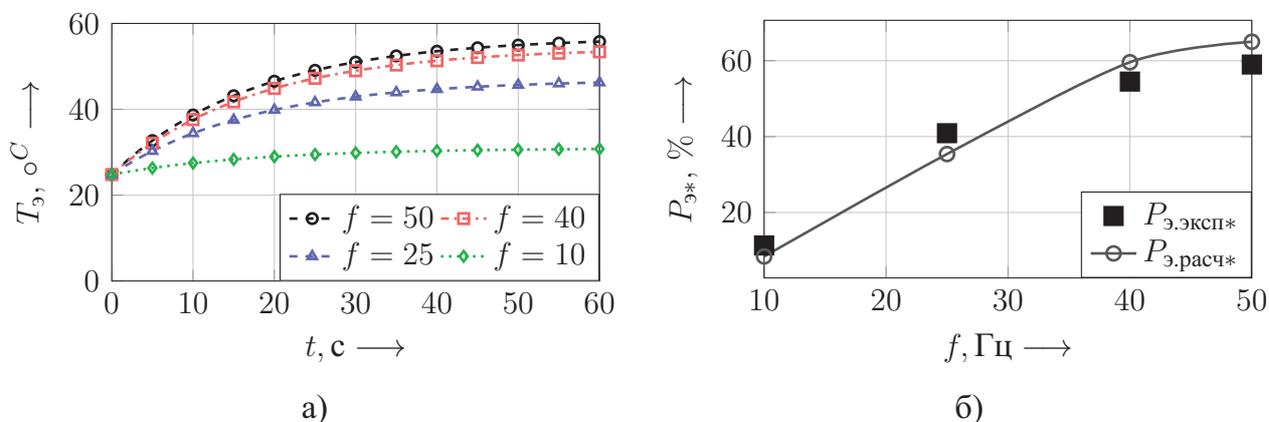


Рисунок 7 — Нагрев экранированного АД при различных частотах питающего напряжения (а) и зависимость потерь в экранирующем элементе от частоты (б)

В третьей главе исследуется влияние параметров экранирующего элемента на характеристики экранированного АД, для чего составлена его математическая модель; определены эксплуатационные характеристики экранированного АД применительно к ЭТК и обоснован диапазон изменения параметров экранирующего элемента, определяющий необходимость адаптации системы управления ЭТК.

Экранированный АД может рассматриваться с позиции классической теории электромеханического преобразователя как трёхобмоточный электромеханический преобразователь, в котором экранирующий элемент представляется заторможенным полым ротором в виде распределенной эквивалентной короткозамкнутой обмотки с активным и индуктивным сопротивлением  $R_x, L_x$ . В этой случае уравнения равновесия электродвижущей силы (ЭДС) для обмоток экранированного АД по второму закону Кирхгофа имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (R_1 + j\bar{\omega}_0 x_{1\sigma})\dot{I}_1 + j\bar{\omega}_0 x_m \dot{I}_m, \\ 0 = \left(\frac{\bar{\omega}_0 R'_2}{\bar{\omega}_2} + j\bar{\omega}_0 x'_{2\sigma}\right)\dot{I}'_2 + j\bar{\omega}_0 x_m \dot{I}_m, \\ 0 = (R'_x + j\bar{\omega}_0 x'_{x\sigma})\dot{I}'_x + j\bar{\omega}_0 x_m \dot{I}_m, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\bar{\omega}_0 = \omega_0/\omega_{0н}$  – относительная частота напряжения статора  $\omega_0$ ;  $\bar{\omega}_2 = \omega_2/\omega_{0н}$  – относительная частота ЭДС ротора  $\omega_2$ ;  $\omega_{0н}$  – номинальная частота напряжения статора;  $x_m$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания;  $x_{1\sigma}, x'_{2\sigma}, x'_{x\sigma}$  – индуктивные сопротивления рассеяния статора, ротора и экранирующего элемента соответственно (штрихами обозначены приведенные величины);  $R_1, R'_2, R'_x$  – активные сопротивления статора, ротора и экранирующего элемента соответственно;  $I_1, I'_2, I'_x, I_m$  – ток статора, ротора, экранирующего элемента и контура намагничивания соответственно.

Системе уравнений (6) соответствует Т-образная схема замещения экранированного АД (рисунок 8) для одной фазы, которая включает элементы, зависящие от частоты вращения ротора. Величины всех сопротивлений при заданном значении питающего напряжения  $\dot{U}_1$  определяют токи  $\dot{I}_1, \dot{I}'_2, \dot{I}'_x$ .

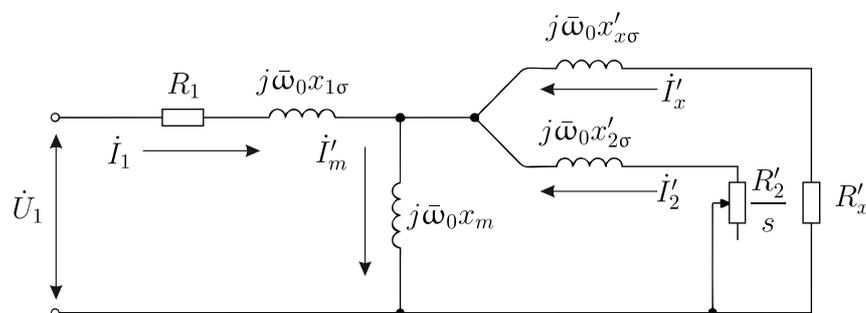


Рисунок 8 – Т-образная схема замещения экранированного асинхронного двигателя

Для учета влияния нагрузки и исследования динамических процессов, протекающих в ЭТК, разработана математическая модель экранированного АД в виде систе-

мы дифференциальных уравнений обобщённых пространственных векторов во вращающейся с синхронной скоростью системе координат  $\alpha - \beta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{\Psi}_1}{\partial t} = \vec{U}_1 - R_1 \vec{I}_1 - j\omega_0 \vec{\Psi}_1, \quad \frac{\partial \vec{\Psi}_x}{\partial t} = -R_x \vec{I}_x - j\omega_0 \vec{\Psi}_x, \quad \frac{\partial \Psi_{2a}}{\partial t} = -R_2 i_{2a} \\ \vec{I}_1 = \frac{1}{L_{1\sigma}} (\vec{\Psi}_1 - \vec{\Psi}_m), \quad \vec{I}_2 = \frac{1}{L_{2\sigma}} (\vec{\Psi}_2 - \vec{\Psi}_m), \quad \vec{I}_x = \frac{1}{L_{x\sigma}} (\vec{\Psi}_x - \vec{\Psi}_m), \\ M_{эм} = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\vec{I}_2 \times \vec{\Psi}_m), \quad \frac{\partial}{\partial t} \omega = \frac{1}{J} (M_{эм} - M_c), \quad \omega_0 = -\frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_{\Pi} \omega, \\ \vec{\Psi}_m = L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x. \end{array} \right. \quad (7)$$

При таком математическом описании внешними управляющими воздействиями являются только компоненты пространственного вектора напряжения на статоре, а частота напряжения на статоре  $\omega_0$  как управляющее воздействие не рассматривается и определяется через скорость двигателя  $\omega$  и частоту роторной ЭДС  $\omega_2$ , которая, в свою очередь, рассчитывается через значения составляющей тока ротора по оси  $\beta$  и потокосцепление статора.

При исследовании математической модели использовался пакет MATLAB Simulink. Активное и индуктивное сопротивления экрана задавались в относительных единицах (базовое значение – сопротивление статорной обмотки). Двигатель имеет мощность 1,1 кВт и работает на вентиляторную нагрузку. На основании математической модели, были получены пусковые и рабочие характеристики экранированного АД. На рисунке 9 приведены механические характеристик при различных параметрах экранирующего элемента. Для сравнения на том же рисунке приведены зависимости полученные в пакете Ansys Maxwell. Совпадение механических характеристик, полученных различными методами обосновывают возможность использования предложенной математической модели для исследования характеристик экранированного АД.

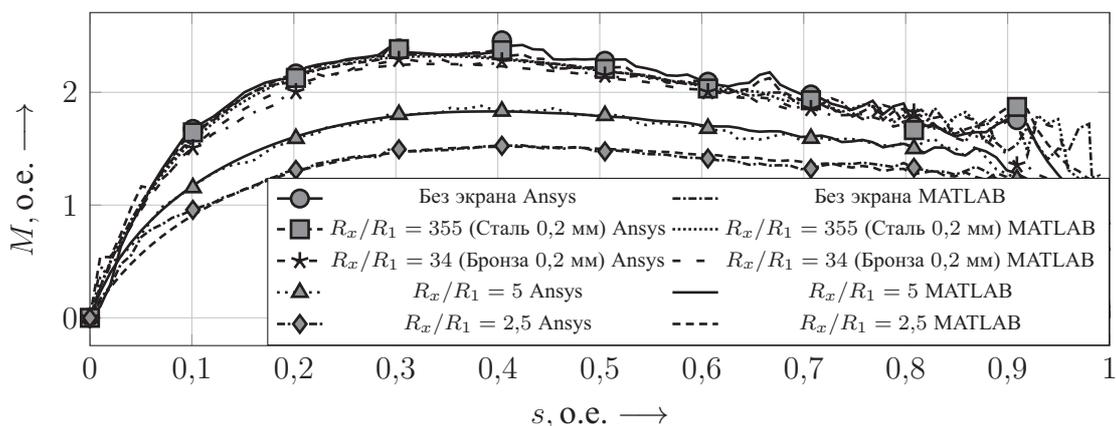


Рисунок 9 – Механические характеристики  $M = f(s)$  экранированного АД мощностью 1,1 кВт при разном сопротивлении экрана  $R_x$

Пусковые и рабочие характеристики приведены на рисунках 10, 11а и 11б. Результаты показывают, что при уменьшении активного сопротивления экрана (при использовании материала с меньшим удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ , и увеличении

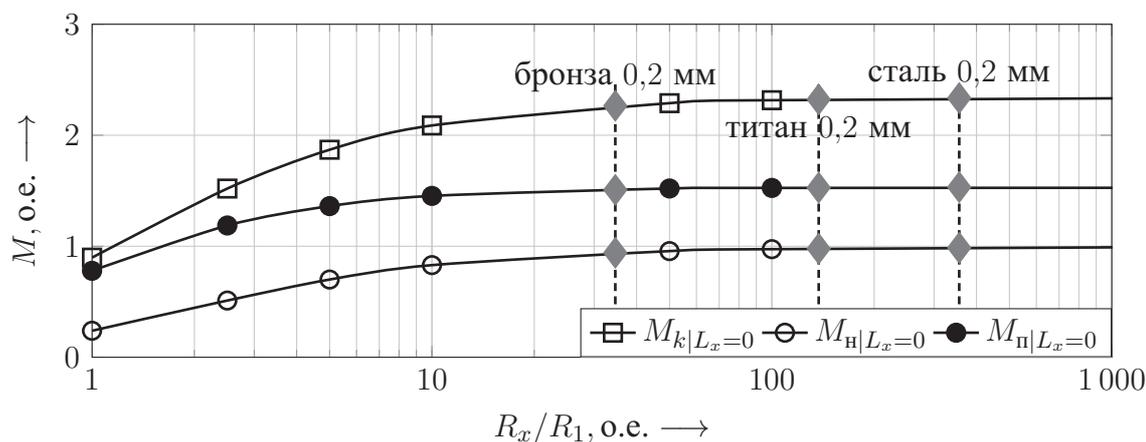


Рисунок 10 — Графики зависимостей критического, пускового и номинального моментов от активного сопротивления экрана  $R_x$

толщины  $\Delta$ ), ухудшаются рабочие характеристики экранированного АД. Использование же экрана из немагнитного материала с относительно высоким электрическим сопротивлением ( $R_x/R_1 > 100$ ) позволяет приблизить рабочие характеристики экранированного АД к характеристикам традиционного. При этом снижение КПД не превышает 3 %; отклонение частоты вращения – 1 %; величин номинального, пускового и критического момента не более 10 %.

Из рисунка 11а следует, что при  $R_x/R_1 > 100$  активное сопротивление слабо влияет на величину критического скольжения  $s_k$  (разница в пределах 1 %). Однако, при больших вихревых токах в экране ( $R_x/R_1 < 100$ ) критическое скольжение смещается значительно, достигая разницы в 25 %.

На рисунке 11б изображена зависимость времени пуска двигателя от сопротивления экрана. Из графика видно, что при  $R_x/R_1 > 100$  реактивное сопротивление экрана не оказывает заметного влияния на время пуска электродвигателя. При малом активном сопротивлении экрана ( $R_x/R_1 < 100$ ) время пуска существенно увеличивается, достигая значения превышающее номинальное более чем в 2 раза при  $R_x/R_1 = 1$ .

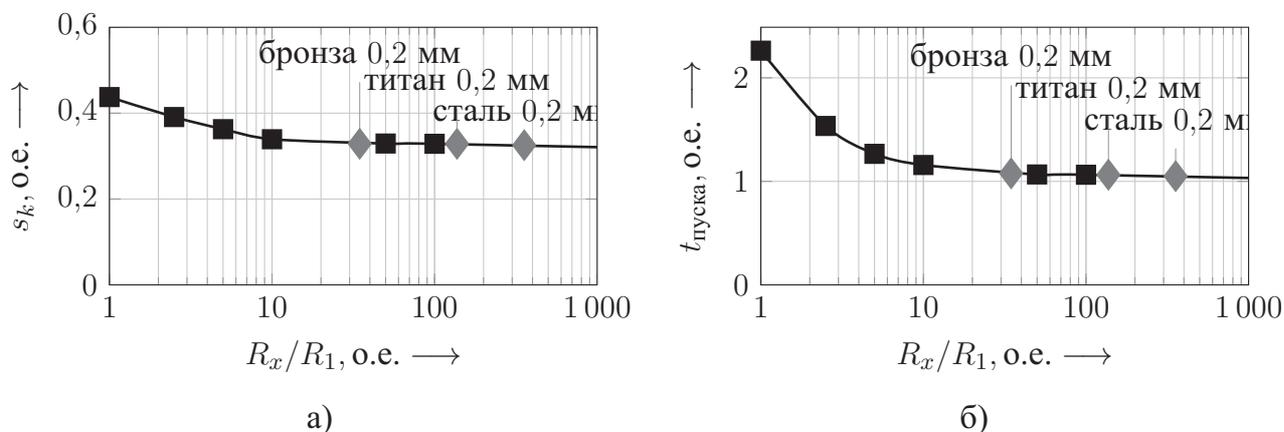


Рисунок 11 — Зависимость критического скольжения (а) и времени пуска (б) от активного сопротивления экранирующего элемента  $R_x$

Результаты математического моделирования экранированного АД показывают, что экранирующий элемент может оказывать значительное влияние на эксплуатацион-

ные и динамические характеристики экранированного АД. Таким образом, для обеспечения электромеханической совместимости при малом активном сопротивлении экранирующего элемента ( $R_x/R_1 < 100$ ), параметры экрана должны учитываться при синтезе системы управления ЭТК.

В **четвертой главе** синтезирована система векторного управления ЭТК на основе математической модели экранированного АД; предложен алгоритм оценки ненаблюдаемых параметров экранированного АД; проведено моделирование и получены характеристики экранированного АД интегрированного в ЭТК; даны рекомендации по выбору параметров комплекса для обеспечения электромеханической совместимости экранированного АД с элементами ЭТК.

При синтезе системы управления ЭТК за основу может быть взята типовая система векторного управления, реализующая закон управления  $\vec{\Psi}_2 = \text{const}$ . Если принять, что система управления поддерживает потокосцепление ротора постоянным, а ориентация системы координат всегда соответствует положению вектора потокосцепления ротора, то механическая характеристика экранированного АД имеет вид:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_n \vec{I}_2 \times \vec{\Psi}_m = \frac{3}{2} p_n i_{2\beta} \Psi_{2\alpha} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \Psi_{2\alpha} (i_{1\beta} + i_{x\beta}). \quad (8)$$

Потокосцепление ротора выражается через токи статора и экранирующего элемента:

$$\Psi_{2\alpha} = L_m (i_{1\alpha} + i_{x\alpha}). \quad (9)$$

Полученные уравнения показывают, что на регулируемые величины оказывают влияние токи в экранирующем элементе.

Поскольку в векторной системе управления регулятор тока использует в качестве обратной связи измеренный и преобразованный в систему  $\alpha - \beta$  реальный вектор тока статора, для того чтобы определить требуемые значения регулируемых величин, необходимо иметь информацию о токах протекающих в экране  $i_{x\alpha}$  и  $i_{x\beta}$ . Эти токи выражаются из уравнения динамического равновесия экранирующего элемента:

$$\begin{cases} i_{x\alpha} = -\frac{1}{R_x} \frac{\partial \Psi_{2\alpha}}{\partial t} + \omega_0 \frac{\Psi_{x\beta}}{R_x} = -\frac{1}{R_x} \frac{\partial \Psi_{2\alpha}}{\partial t} + \omega_0 \omega_2 \frac{L_{2\sigma} \Psi_{2\alpha}}{R_2 R_x}, \\ i_{x\beta} = -\frac{1}{R_x} \frac{\partial \Psi_{x\beta}}{\partial t} - \omega_0 \frac{\Psi_{x\alpha}}{R_x} = -\frac{L_{2\sigma}}{R_2 R_x} \frac{\partial \Psi_{2\alpha}}{\partial t} \frac{\partial \omega_2}{\partial t} - \omega_0 \frac{\Psi_{2\alpha}}{R_x}. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, при использовании типовой системы векторного управления с экранированным АД при расчёте требуемых значений регулируемых величин в установившемся режиме возникают ошибки по каналу регулирования потокосцепления ротора и момента:

$$\begin{cases} e_\Psi = \omega_0 \omega_2 \frac{L_{2\sigma} L_m}{R_2 R_x} \Psi_{2\alpha}, \\ e_M = -\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \omega_0 \frac{1}{R_x} \Psi_{2\alpha}^2. \end{cases} \quad (11)$$

При этом, если пренебречь индуктивностью рассеяния обмотки ротора  $L_{2\sigma}$ , то можно считать статическую ошибку по каналу потокосцепления близкой к нулю  $e_\psi \approx 0$ , откуда следует, что ток экрана  $i_{x\alpha}$  оказывает влияние на характеристики электропривода только в динамических режимах. В то же время, ток экранирующего элемента по оси  $\beta$  с увеличением частоты питающего напряжения и уменьшением активного сопротивления экрана, вносит статическую ошибку в значение момента электродвигателя  $M_{зад}$ .

Структурная схема модифицированной системы векторного управления экранированного АД, компенсирующей влияние токов экранирующего элемента, приведена на рисунке 12.

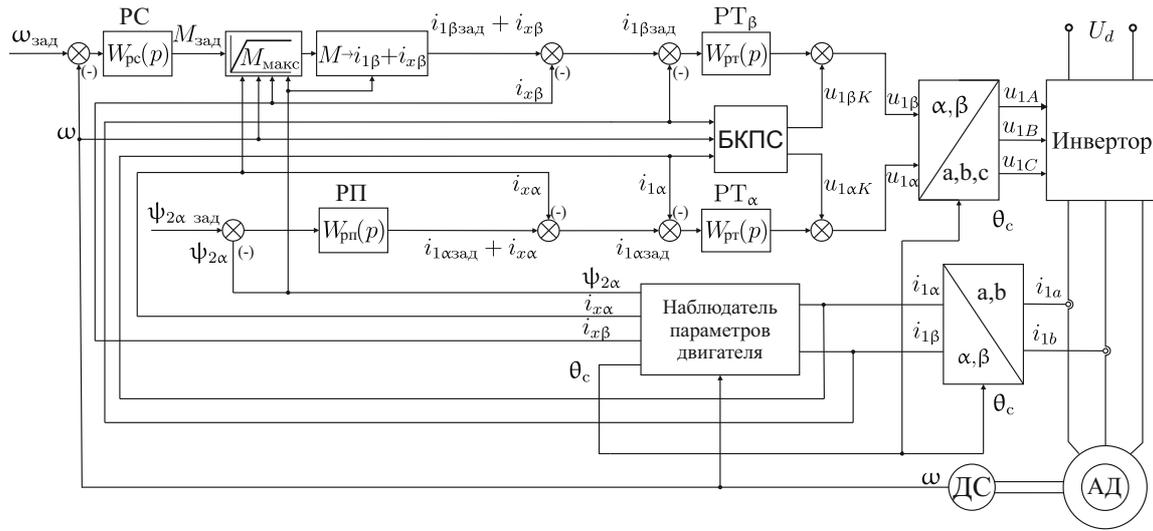


Рисунок 12 — Структурная схема системы регулирования скорости при векторном управлении экранированным асинхронным двигателем

Для исключения взаимной связи  $i_{1\alpha}$  и  $i_{1\beta}$  производится компенсация ЭДС вращения блоком компенсации перекрестных связей (БКПС), что позволяет разделить каналы управления потокосцеплением ротора и моментом/скоростью двигателя. Компенсационные составляющие каналов управления  $i_{1\alpha}$  и  $i_{1\beta}$ :

$$\begin{cases} u_{1\alpha К} = k_2 \frac{\partial \psi_{2\alpha}}{\partial t} - L_m(k_2 - 1) \frac{\partial i_{x\alpha}}{\partial t} + \omega_0(L_m(k_2 - 1)i_{x\beta} - \sigma R_1 T_1 i_{1\beta}), \\ u_{1\beta К} = k_2 \omega_0 \psi_{2\alpha} - L_m(k_2 - 1) \frac{\partial i_{x\beta}}{\partial t} - \omega_0(L_m(k_2 - 1)i_{x\alpha} - \sigma R_1 T_1 i_{1\alpha}). \end{cases} \quad (12)$$

где  $k_2 = L_m/L_2$ ;  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_1 L_2)$ ;  $T_1 = L_1/R_1$ .

Так как каналы регулирования в системе векторного управления разделены, то анализ канала регулирования потокосцепления ротора двигателя производится по классической теории электропривода – в режиме короткого замыкания, а канала регулирования момента и частоты вращения двигателя – в режиме холостого хода, когда электромагнитные переходные процессы в канале регулирования потокосцепления ротора уже завершились. Синтез САУ выполнен при допущении, что параметры объекта управления в процессе работы остаются постоянными.

Контур регулирования потокосцепления настраивается на технический оптимум, при этом передаточная функция регулятора потокосцепления принимает вид пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{T_2 + 2T_{\mu}}{2L_m T_{\mu}} + \frac{1}{2L_m T_{\mu} p}, \quad (13)$$

где  $T_{\mu}$  – некомпенсируемая малая постоянная времени.

Контур регулирования скорости настраивается на симметричный оптимум, передаточная функция регулятора скорости принимает вид ПИ-регулятора скорости:

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{3J}{4T_{\mu}} + \frac{J}{8T_{\mu}^2 p}. \quad (14)$$

В процессе эксплуатации ЭТК система управления должна иметь возможность оценить активное сопротивление экранирующего элемента и учесть его влияние на параметры ротора заторможенного двигателя. Система управления, использующая алгоритм идентификации параметров традиционного АД, не может оценить параметры экранированного. В этом случае схема замещения экранированного АД для заторможенного двигателя ( $s = 1$ ) представляется с эквивалентными параметрами ротора  $L_{2\sigma\text{экв}}$ ,  $R_{2\text{экв}}$  зависящими от параметров экранирующего элемента и в действительности не равными соответствующим реальным:

$$\begin{cases} L_{2\sigma\text{экв}} = \frac{1}{\omega_0} \text{Im}(z_{2\text{экв}}) = \frac{1}{\omega_0} \frac{\bar{\omega}_0 x_{2\sigma} R_x'^2}{(\bar{\omega}_0 x_{2\sigma})^2 + (R_2 + R_x)^2}, \\ R_{2\text{экв}} = \text{Re}(z_{2\text{экв}}) = \frac{R_x (R_2'^2 + R_x R_2 + (\bar{\omega}_0 x_{2\sigma})^2)}{(\bar{\omega}_0 x_{2\sigma})^2 + (R_2 + R_x)^2}. \end{cases} \quad (15)$$

где  $z_{2\text{экв}} = \frac{(R_2 + j\bar{\omega}_0 x_{2\sigma}) R_x}{(R_2 + R_x) + j\bar{\omega}_0 x_{2\sigma}}$  – эквивалентное сопротивление роторной ветви при  $s = 1$ .

Оценку параметров статора экранированного АД можно производить по известным методикам – рассчитывая по переходной функции тока при намагничивании двигателя, питая одну фазу статора широтно-модулируемым напряжением.

Для корректного разделения  $R_{2\text{экв}}$  на сопротивление ротора  $R_2$  и экранирующего элемента  $R_x$  предложен численный алгоритм, основанный на расчете функционала невязки нормированных известных номинальных паспортных параметров – коэффициента мощности  $\cos \varphi_{\text{н}}$ , коэффициента полезного действия  $\eta_{\text{н}}$  и тока статора  $I_{1\text{н}}$  двигателя с рассчитываемыми по схеме замещения:

$$F(R_2, R_x) = \left( \frac{\cos \varphi(R_2, R_x)}{\cos \varphi_{\text{н}}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\eta(R_2, R_x)}{\eta_{\text{н}}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{I_1(R_2, R_x)}{I_{1\text{н}}} - 1 \right)^2, \quad (16)$$

где  $\eta(R_2, R_x)$ ,  $\cos \varphi(R_2, R_x)$ ,  $I_1(R_2, R_x)$  – определяются по Т-образной схемы замещения.

Графики оценки параметров экранированного АД при разных сопротивлениях экранирующего элемента приведены на рисунке 13. Результаты идентификационных тестов позволяют судить о приемлемой точности предложенного алгоритма.

В соответствии с предложенной моделью системы векторного управления экранированного АД, был произведен расчёт переходных процессов для экранированного

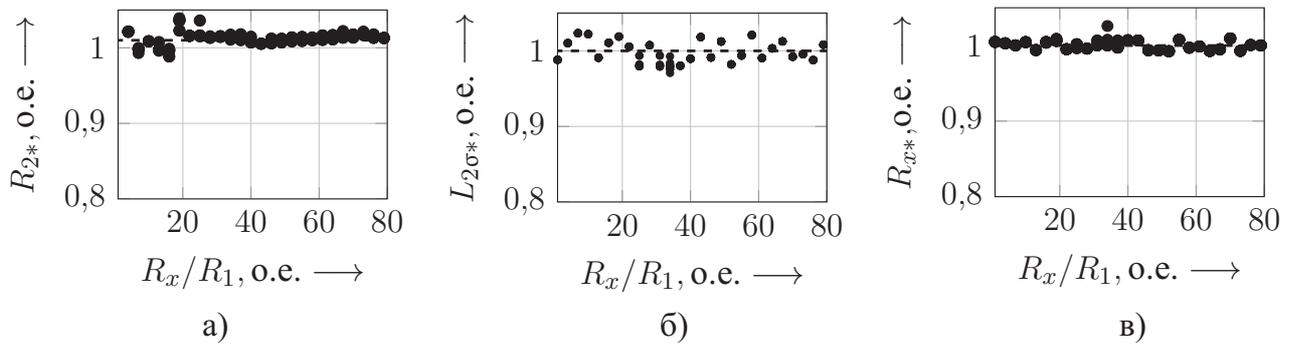


Рисунок 13 – Оценка параметров экранированного АД с разным сопротивлением экрана  $R_x$  по идентификационной модели

двигателя мощностью 1,1 кВт в составе ЭТК. Результаты расчёта представлены на рисунках 14 и 15 в системе относительных единиц. На графиках приняты обозначения: 1 – характеристика традиционного АД под управлением классической САУ; 2 – характеристика экранированного АД под управлением классической САУ; 3 – характеристика экранированного АД под управлением адаптированной САУ.

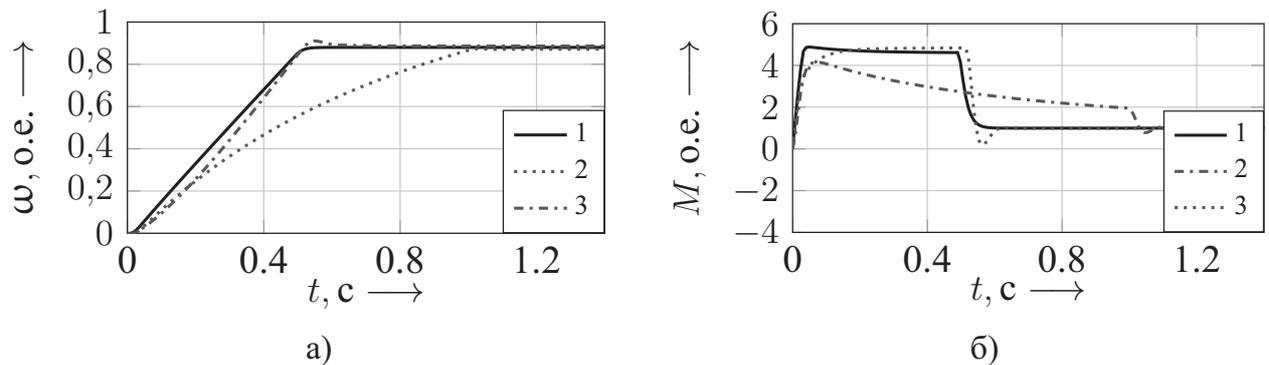


Рисунок 14 – Динамические характеристики экранированного АД в ЭТК в режиме пуска

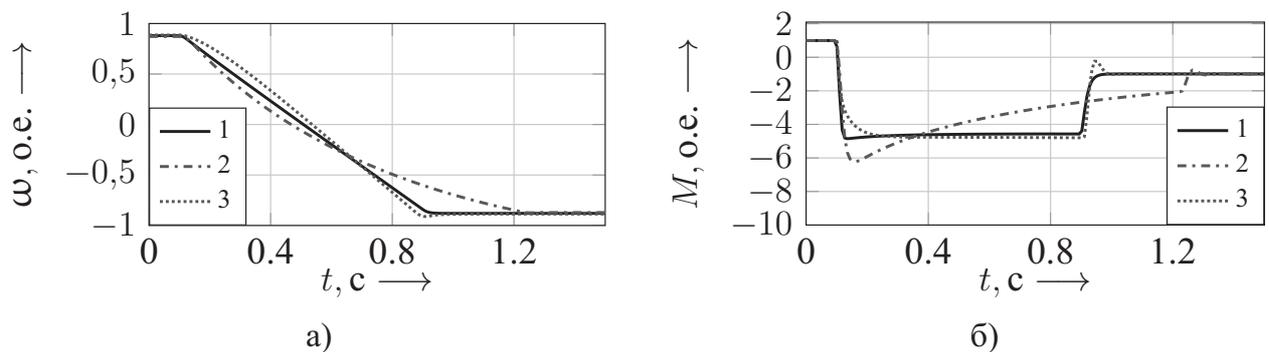


Рисунок 15 – Динамические характеристики экранированного АД в ЭТК в режиме реверса

Как показывают графики, экранирующий элемент имеющий малое значение активного сопротивления ухудшает выходные характеристики ЭТК: уменьшает скорость реакции системы на 20 % и более. Использование адаптированной САУ, учитывающей

параметры экранирующего элемента, обеспечивает требуемые выходные характеристики, а следовательно и электромеханическую совместимость экранированного АД.

В **заключении** приведены основные результаты разработки и исследования ЭТК на основе экранированного АД, которые заключаются в следующем:

1. Проведен анализ структурной схемы ЭТК, показывающий, что основными факторами, влияющими на его эффективность, являются параметры электромеханического преобразователя и системы управления.

2. Разработан комплексный критерий электромеханической совместимости экранированного АД, учитывающий влияние параметров экрана на выходные характеристики ЭТК.

3. Классифицированы основные проектные параметры, определяющие электромеханическую совместимость экранированного АД: удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость материала экранирующего элемента; диаметр внутренней расточки статора; длина воздушного зазора; длина вылета лобовых частей обмотки статора; толщина экрана.

4. Обоснован диапазон параметров экранирующего элемента, обеспечивающий электромеханическую совместимость экранированного АД с элементами ЭТК. Анализ полученных выходных характеристик экранированного АД при различных параметрах экрана показывает, что использование экрана из немагнитного материала с высоким удельным электрическим сопротивлением (например X20H80, Хастеллой В и С) позволяет получить эксплуатационные характеристики ЭТК, сравнимые с характеристиками ЭТК с неэкранированным АД без учета влияния толщины экрана на величину воздушного зазора. При сопротивлении экранирующего элемента  $R_x/R_1 > 100$  снижение КПД не превышает 3 %; отклонение частоты вращения – 1 %; величин номинального, пускового и критического моментов не более 10 %.

5. При использовании экранирующего элемента с низким удельным электрическим сопротивлением ( $R_x/R_1 < 100$ ) вихревые токи, возникающие в экране, могут оказывать значительное влияние на характеристики комплекса, что требует адаптации системы управления. Синтезирована система управления ЭТК на основе математической модели экранированного АД, использующая алгоритм оценки ненаблюдаемых параметров электропривода. При этом предложенная система управления обеспечивает электромеханическую совместимость экранированного АД с ЭТК по выбранным критериям.

6. Экспериментально получены и исследованы характеристики экранированного АД мощностью 1,1 кВт. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенного подхода по определению электромеханической совместимости экранированного АД, интегрированного в ЭТК для специализированных технологических процессов.

## Публикации автора по теме диссертации

### *Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / Д. А. Голоколос [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика: науч.-техн. и учеб.-образов. журнал. — 2017. — Т. 60, № 5 (197). — С. 5–11.

2. Голоколос Д. А., Гринфельд Г. М., Ким К. К. Исследование характеристик экранированного асинхронного двигателя // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 4. — С. 33–36.

3. Голоколос Д. А. Влияние параметров экрана на характеристики капсулированных асинхронных электродвигателей // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2014. — IV–1(20). — С. 4–11.

4. Голоколос Д. А., Гринфельд Г. М., Иванов С. Н. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2014. — III–1(19). — С. 4–10.

5. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2013. — IV–1(16). — С. 29–34.

6. Голоколос Д. А., Гринфельд Г. М. Оценка влияние экранирующих элементов на характеристики герметичных электромеханических преобразователей // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2013. — I–1(13). — С. 18–25.

### *Публикации в других источниках:*

7. Голоколос Д. А. Анализ энергоэффективности совмещенных электроприводов // Дальневосточный энергопотребитель. — 2013. — № 2. — С. 34–37.

8. Голоколос Д. А. Исследование системы управления электротехнического комплекса на основе герметичного электромеханического преобразователя // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. — С. 124–127.

9. Голоколос Д. А. Повышение уровня электромагнитной безопасности за счет экранирования преобразователей энергии // Дальневосточная весна – 2014 : материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 15 мая 2014 г. — Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. — С. 417–419.

10. Голоколос Д. А., Иванов С. Н., Семибратова М. В. Материаловедческие основы повышения надежности совмещенных преобразователей энергии // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий: материалы Международной научно-технической конференции. Т. 1. — Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2013. — С. 210–213.

11. Голоколос Д. А. Оценка влияние экранирующих элементов на характеристики герметичных электромеханических преобразователей // Материалы IX международной научно-практической конференции «Стратегические вопросы мировой науки – 2013», Ч. 20. — Пермь: Наука и студия, 2013. — С. 37–41.

12. Голоколос Д. А., Иванов С. Н. Повышение эффективности совмещенных энергетических комплексов переменного тока средствами управления // Электропривод на транспорте и в промышленности: Труды Всероссийской научно-практической конференции (г. Хабаровск, 25-27 сентября 2013 г.) — Хабаровск: ДВГУПС, 2013. — С. 104–110.

### ***Патенты, программы для ЭВМ:***

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661503 «SAMR» / Д. А. Голоколос. — Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 10.12.13.