

*УДК 621.313.333:621.3.016.37*

**Рожков Андрей Игоревич**

**УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

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

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Луковников В.И.

доктор технических наук,  
профессор Вербовой П.Ф.

кандидат технических наук, доцент  
Прокопчик В.В.

Оппонирующая организация: Могилевский государственный  
технический университет

Защита состоится 30 ноября 2001 г. в 10<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» по адресу: 246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48, корп. 1, ауд. 516.

тацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения об-  
ьский государственный технический университет имени

зн 29 октября 2001 г.



Е. А. Храбров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Пускотормозные режимы определяют максимальные значения токов и моментов, а значит ударные силовые и температурные воздействия на систему электроснабжения, электродвигатель, рабочую машину и их элементы.

Наличие этих величин выше допустимых приводит к поломкам, остановкам производственных процессов, авариям и даже гибели людей.

Наиболее тяжёлым является пуск турбомеханизмов, поскольку он без принятия специальных мер длится 100...150 с из-за больших моментов инерции вращающихся масс в условиях нарастания по мере разгона момента нагрузки.

Исследования пусковых режимов, проведённые Ульяновым С. А., Петровым И. И., Петровым Л. П., Копыловым И. П., Трещевым И. И., Беспаловым В. Я., Вербовым П. Ф., показали, что использование предвключённых активно-индуктивных элементов или переключение обмоток статора асинхронного электродвигателя с «треугольника» на «звезду» на момент пуска, снижает остроту проблемы, но полностью её не решает. Только управление режимом пуска позволяет прогнозировать и реализовывать желаемые величины пусковых токов, моментов и времени разгона.

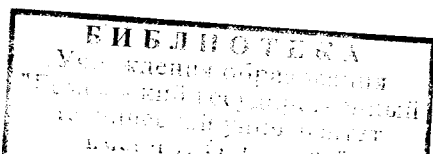
Большинство турбомеханизмов, используемых в Республике Беларусь, имеют разомкнутый электропривод без системы управления пуском.

Использование замкнутых по частоте вращения автоматизированных электроприводов с задатчиками интенсивности пуска может принести успех, но их применение нерентабельно, поскольку пуски турбомеханизмов сравнительно редки, а регулирование их частоты вращения в рабочем режиме не требуется.

Отсюда видна актуальность создания способов и схемных реализаций управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов, отличающихся от известных простотой, экономичностью и высокими показателями качества процесса пуска.

В последнее время наибольшее внимание уделяется частотному и параметрическому способам управления пуском.

Повышенные требования к надёжности электроприводов питательных насосов ТЭЦ и АЭС, перекачивающих насосов нефтепроводов и компрессорных станций магистральных газопроводов, вентиляторов воздуходувок металлургического производства заставляют отказываться от использования частотных способов управления только для пуско-тормозных режимов из-за большого количества элементов, сложности схемы и необходимости резервирования блоков преобразователя частоты. Частотный способ управления пуском целесообразнее заменить на более экономичное управление пуском с помощью тиристорных преобразователей напряжения (ТПН).



лр. 2011

8 / 920, bar=2000001434901

По своим массогабаритным и стоимостным показателям преобразователи частоты значительно уступают ТПН (примерно в 5-10 раз в зависимости от выполняемых функций). Современные ТПН выполняются в габаритах, сопоставимых с соответствующими им по мощности обычными контактными коммутационными аппаратами (контакторами, пускателями), и в тоже время обладают значительно более широкими возможностями для управления асинхронным двигателем (АД). Так, например, для электроприводов мощностью от 20 кВт и более удельные масса и объём серийных ТПН лежат в пределах, соответственно, 0,2-0,4 кг/кВт и 0,25-0,5 дм<sup>3</sup>/кВт, а стоимость составляет порядка 10-20 долларов за кВт.

В последнее время появились серийные тиристорные пускатели, которые построены по схеме программируемого разомкнутого пуска, что не позволяет отслеживать процесс пуска, своевременно компенсировать автоколебания тока и момента, минимизировать время разгона АД при заданном токоограничении.

Вышесказанное убеждает в актуальности исследований параметрического управляемого пуска асинхронных электроприводов турбомеханизмов, основное содержание которых сформулировано в цели и задачах настоящей работы.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в соответствии с темами научно-исследовательских работ кафедр «Автоматизированный электропривод» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» № Гос. рег.19942156 «Математическое моделирование системы: обобщённый управляемый вентильный коммутатор – обобщённый электромеханический преобразователь», № Гос. Рег. 1998838 «Анализ и синтез автоколебательных процессов в электромеханических системах с периодической нелинейностью» и хозяйственным договором № 3/94/0441821 от 1.11.94г. «Разработка и изготовление системы плавного пуска асинхронного электропривода» с Республиканским унитарным предприятием «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин).

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке оптимальных по быстродействию при заданном ограничении тока или момента способов и схемных реализаций управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Построить обобщённую математическую модель трёхфазного асинхронного электродвигателя с коммутируемой продольно-поперечной несимметрией линии его электропитания.

2. На основе обобщённой математической модели АД разработать математическое и программное обеспечение анализа параметрического пуска по замкнутой схеме.

3. С помощью численного моделирования определить способы управления параметрическим пуском трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, оптимальные по быстродействию при ограничении тока, или момента.

4. Осуществить схемную реализацию разработанных способов управляемого параметрического пуска трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов с помощью тиристорного преобразователя напряжения.

5. Провести промышленные испытания и внедрить в производство систему управляемого плавного параметрического пуска асинхронного электропривода воздуходувки.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является асинхронный электропривод турбомеханизмов, а предметом – система управления пуском этих электроприводов.

Гипотеза. Предполагалось, что параметрическое управление пуском с обратной связью по току трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов позволит получить при заданном ограничении тока или момента пуск, оптимальный по быстродействию.

Методология и методы проведения исследования. При проведении исследований использовались: основные положения теории электрических машин, автоматического управления и математического моделирования. Для проведения аналитического исследования была создана обобщённая аналитическая математическая модель управляемого параметрического пуска асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, учитывающая несинусоидальность тока статора асинхронного двигателя, дискретность работы и зависимость выходного напряжения ТПН от скольжения и коэффициента мощности АД. Численный анализ математической модели осуществлялся с использованием современных математических пакетов программ на персональных ЭВМ.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается производственными испытаниями и внедрением системы управляемого параметрического пуска электропривода воздуходувки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин).

Научная новизна и значимость полученных результатов. Создана обобщённая аналитическая математическая модель трёхфазного асинхронного электродвигателя с коммутируемой продольно-поперечной несимметрией линии его электропитания. С её помощью построено по блочному принципу математическое обеспечение анализа управляемого параметрического пуска асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, учитывающее несинусоидальность тока статора, дискретность работы и зависимость выходного напряжения тиристорного преобразователя напряжения от скольжения и коэффициента мощности АД.

Проведено комплексное численное исследование пуска трёхфазных асинхронных электроприводов турбомеханизмов, что позволило найти способ управления пуском, оптимальный по быстродействию при заданном ограничении тока или момента.

Поставлена и решена задача синтеза новой системы управляемого параметрического пуска трёхфазных асинхронных электроприводов турбомеханизмов с помощью ТПН, позволяющей ограничить максимальные величины и амплитуды колебаний токов статора, момента двигателя и ускорения при пуске турбомеханизмов.

*Практическая и экономическая значимость полученных результатов.*

*Практическая значимость полученных результатов* заключается в разработке программного обеспечения анализа математической модели, позволяющей проводить разносторонние исследования различных систем управления пуском трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, а также оптимизировать структуры и параметры различных систем управления пуском; в реализации на базе тиристорной станции управления ТСУ-2 новой принципиальной схемы системы плавного пуска трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов; внедрении в эксплуатацию системы управляемого плавного пуска трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов с помощью тиристорных преобразователей напряжения для электропривода воздуходувки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин). При соответствующей настройке система управляемого плавного пуска вентилятора может быть применена для широкого спектра турбомеханизмов мощностью до 200 кВт включительно, где необходимо ограничить максимальные величины и амплитуды автоколебаний токов, моментов двигателя и ускорения при оптимальном времени пуска турбомеханизма.

*Экономическая значимость заключается* во внедрении в эксплуатацию системы управляемого плавного пуска трёхфазного асинхронного короткозамкнутого электропривода воздуходувки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин), что повысило его надёжность, уменьшило нагрузку на шинопровод, увеличило срок эксплуатации всего оборудования воздуходувки.

*Основные положения диссертации, выносимые на защиту.* Автором защищаются:

1. Обобщённая аналитическая математическая модель симметричного АД при электропитании от симметричной сети через линию электропередачи с коммутируемой обобщённой продольно-поперечной несимметрией.

2. Математическая модель управляемого параметрического пуска асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, учитывающая несинусоидальность тока статора, дискретность работы, зависимость выходного напряжения тиристорного преобразователя напряжения от скольжения и коэффициента мощности АД.

3. Результаты исследования с помощью численного моделирования основных существующих способов управляемого пуска.

4. Результаты теоретического определения способов управляемого параметрического пуска трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, оптимальных по быстрдействию и ограничению тока, или момента.

5. Система управления параметрическим пуском трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов с помощью ТПН, позволяющая ограничить максимальные величины и амплитуды колебаний токов статора, момента двигателя и ускорения при их пуске.

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

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на:

- республиканской научно-технической конференции «Автоматизированный электропривод промышленных установок» (г. Минск, 1994 г.);
- международной 51-ой научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов Белорусской государственной политехнической академии (г. Минск, 1995 г.);
- межвузовской конференции аспирантов и студентов (г. Гомель, 1997 г.);
- международной научно-технической конференции (научные чтения, посвящённые 105 годовщине со дня рождения Павла Осиповича Сухого) (г. Гомель 2000 г.);
- международной научно-технической конференции молодых специалистов «Металл-2001» (г. Жлобин 2001 г.)

Опубликованность результатов. Результаты выполненных исследований опубликованы в двух статьях научных журналов Российской Федерации, двух статьях материалов международных конференций, четырёх тезисах докладов. Всего объём опубликованных материалов составляет 12 страниц.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав, выводов и при-

ложений. Общий объём работы составляет 110 страниц, в том числе 52 рисунка на 34 страницах, таблицы на 2 страницах, приложения на 13 страницах и список используемых источников на 8 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* дана оценка современного состояния управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов, обоснована необходимость проведения работ по созданию математической системы «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель».

*В общей характеристике работы* обоснована актуальность темы, приведён перечень проблем, которые до сих пор оставались недостаточно изученными, сформулированы цель и задачи исследований.

*В первой главе* рассмотрены основные особенности турбомеханизмов, с точки зрения работы электропривода. Редкие пуски, большой момент инерции и вентиляторная механическая характеристика позволяют предъявить к системе управления пуском требования, подходящие к большинству турбомеханизмов. Сравнительный анализ существующих способов пуска их электроприводов позволяет заключить, что в настоящее время отсутствует удовлетворительный способ пуска электроприводов турбомеханизмов. Выявлено, что наиболее перспективным является параметрический пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения.

*Во второй главе* разработано математическое и программное обеспечение анализа параметрического пуска асинхронных электроприводов турбомеханизмов.

Поскольку при управлении пуском в общем случае предполагалось иметь замкнутую систему, то была принята концепция блочного построения общей математической модели параметрического управляемого пуска, в которой аналитически описывались во временной области блоки прямого канала: задатчик программы пуска, сравнивающее устройство, регулятор, тиристорный преобразователь переменного напряжения, асинхронный электродвигатель и блоки канала обратной связи: датчик тока и узел отсечки тока.

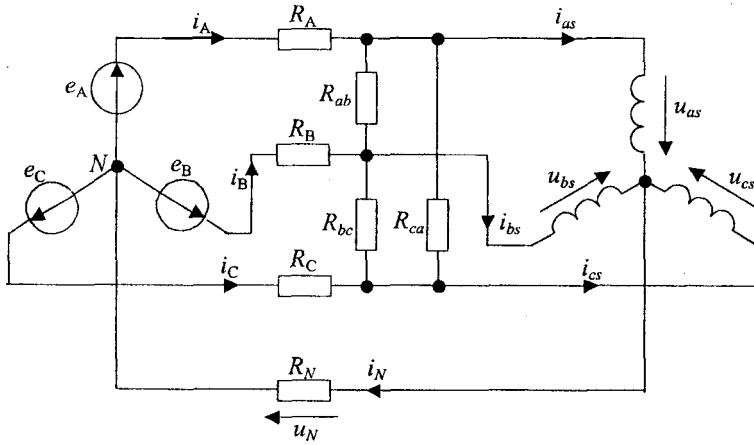
Такой подход был вызван ещё и тем, что перечисленные блоки удобно описываются разнохарактерными частными математическими моделями: нелинейные и линейные обыкновенные дифференциальные уравнения, логические уравнения, алгебраические уравнения, временные функции.

Наиболее принципиальным являлся выбор метода аналитического описания силового блока «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель».

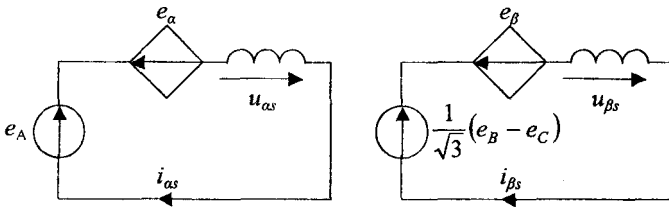
Считая электрическую сеть и асинхронный двигатель симметричными и заменяя тиристорный преобразователь линией передачи электроэнергии с коммутируемой продольно-поперечной несимметрией, можно элек-



трехфазную схему рассматриваемого силового блока «ТПН – АД» представить в виде, изображённом на рис. 1а, где ротор условно не показан.



а)



б)

Рис. 1. Исходная трехфазная (а) и преобразованная двухфазная (б) электрические схемы силового блока «симметричная сеть – ТПН – симметричный АД»

Активные сопротивления  $R_A, R_B, \dots, R_{ca}$ , переключаемые в соответствии с функциями естественной или искусственной коммутации, принимают значения прямого  $R_{\Pi}$  и обратного  $R_{\text{ОБР}}$  сопротивлений тиристоров и тем самым в комплексе представляют обобщенную схему замещения вентильного коммутатора. Сопротивление  $R_N$  определяет наличие или отсутствие в схеме нулевого провода.

Сложность рассматриваемой задачи заключается в том, что при симметричной сети электропитания ( $e_A, e_B, e_C$ ) система токов  $i_A, i_B, \dots, i_{ca}, i_N$  и статорных напряжений  $u_{AS}, u_{BS}, u_{CS}$  несимметричны не только из-за продольно-поперечной несимметрии линии электропитания, но и из-за того, что активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора различны для разных симметричных последовательностей токов.

Возможны два принципиально различных подхода к решению этой задачи, в зависимости от того, куда отнести ТПН: к электросети или к асинхронному двигателю.

В первом случае задача сводится к описанию симметричного трехфазного АД при несимметричном и несинусоидальном электропитании статорных обмоток, а во втором – несимметричного АД при симметричном электропитании.

Профессорами Ульяновым С. А., Щедриным Н. Н., Ждановым П. С. обосновывается и используется применимость метода симметричных временных составляющих для первого класса задач, что впоследствии привело профессорами Копылова И. П. к построению многообмоточной двухфазной обобщенной электрической машины.

Профессор Беспалов В. Я. доказывает возможность исследования несимметричных режимов без перехода к симметричным составляющим в математической модели АД, записанной в координатах  $\alpha$ - $\beta$ , но при этом не рассматриваются предвключенные элементы и не учитывается различие сопротивлений обмоток статора и ротора для разных последовательностей токов.

Второй класс задач решался профессорами Копыловым И. П., Вербовым П. Ф., Беляевым В. П. в трёхкоординатной математической модели методом припасовывания решений частных задач, соответствующих состояниям ТПН, определяемым различным числом открытых тиристоров в различных фазах.

Такой подход приводил к очень громоздким математическим моделям с использованием логических функций.

Профессор Трещев И. И. использовал в этом случае метод обобщенных пространственных векторов с описанием условий несимметрии с помощью дополнительных уравнений в пространственных векторах, что позволило ему успешно исследовать ряд несимметричных аварийных режимов в более простой двухкоординатной математической модели.

В рассматриваемой диссертационной работе, с целью устранения вышеуказанных недостатков, использовался комплексный подход к построению двухкоординатной математической модели АД на базе метода пространственных обобщающих векторов с учётом условий несимметрии по Трещеву И. И. и метода симметричных составляющих, распространённого на мгновенные значения пространственных и временных переменных по Луковникову В. И.

Это позволило преобразовать исходную трёхфазную электрическую схему «сеть-ТПН-АД» (рис. 1а) к двухфазной (рис. 1б) и получить её математическую модель в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{as1} = e_a - e_{a1} = R_{s1} i_{as1} + L_{s1} \frac{di_{as1}}{dt} + M \frac{di_{ar1}}{dt}; \\ u_{\beta s1} = \frac{1}{\sqrt{3}}(e_b - e_c) - e_{\beta 1} = R_{s1} i_{\beta s1} + L_{s1} \frac{di_{\beta s1}}{dt} + M \frac{di_{\beta r1}}{dt}; \\ 0 = R_{r1} i_{ar1} + L_{r1} \frac{di_{ar1}}{dt} + M \frac{di_{as1}}{dt} - \omega L_{r1} i_{\beta r1} - \omega M i_{\beta s1}; \\ 0 = R_{r1} i_{\beta r1} + L_{r1} \frac{di_{\beta r1}}{dt} + M \frac{di_{\beta s1}}{dt} - \omega L_{r1} i_{ar1} - \omega M i_{as1}; \\ u_{as2} = -e_{2a} = R i_{as1} + L_{s1} \frac{di_{as1}}{dt} + M \frac{di_{ar1}}{dt}; \\ u_{\beta s2} = -e_{2\beta} = R i_{\beta s1} + L_{s1} \frac{di_{\beta s1}}{dt} + M \frac{di_{\beta r1}}{dt}; \\ 0 = R_{r2} i_{ar2} + L_{r2} \frac{di_{ar2}}{dt} + M \frac{di_{as2}}{dt} - \omega L_{r2} i_{\beta r2} - \omega M i_{\beta s2}; \\ 0 = R_{r2} i_{\beta r2} + L_{r2} \frac{di_{\beta r2}}{dt} + M \frac{di_{\beta s2}}{dt} + \omega L_{r2} i_{ar2} + \omega M i_{as2}; \\ M = (i_{as1} i_{\beta r1} - i_{\beta s1} i_{ar1} - i_{as2} i_{\beta r2} + i_{\beta s2} i_{ar2} + i_{as1} i_{\beta r2} - i_{\beta s1} i_{ar2} - i_{as2} i_{\beta r1} + i_{\beta s2} i_{ar1}) = \\ = J \frac{d\omega}{dt} + M_c(\omega), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $R_{s1}, R_{r1}, R_{s2}, R_{r2}, L_{s1}, L_{s2}, L_{r1}, L_{r2}$  – активные сопротивления и полные индуктивности статорных (индекс s) и роторных (индекс r) обмоток для прямой (индекс 1) и обратной (индекс 2) последовательностей токов  $i_{as1}, i_{\beta s1}, i_{ar1}, i_{\beta r1}, i_{as2}, i_{\beta s2}, i_{ar2}, i_{\beta r2}$ ;  $M$  – коэффициент взаимной индукции;  $\omega$  – угловая скорость;  $J$  – момент инерции;  $M_c(\omega)$  – момент сопротивления нагрузки от турбомеханизма.

Добавочные ЭДС несимметрии (вольтодобавки)  $e_a, e_\beta$  тоже представлены через симметричные составляющие  $e_{a1}, \dots, e_{\beta 2}$ . Они зависят от напряжений  $u_{as}, u_{\beta s}, e_a, e_\beta, e_c$ ; токов  $i_{as}, i_{\beta s}$ ; сопротивления  $R_0$  и индуктивности  $L_0$  статорных обмоток АД для нулевой последовательности тока; сопротивлений тиристоров  $R_a, R_\beta, \dots, R_{ca}$  и нулевого провода  $R_M$ .

Математическая модель (1) будет иметь более широкое применение, чем в данной работе, поскольку она описывает симметричный АД с общей продольно-поперечной несимметрией линии его электропитания от симметричной сети. Эта несимметрия возникает из-за наличия пред-

включённых к АД управляемых вентильных коммутаторов (в том числе и ТПН), релейно-контакторных аппаратов, электромагнитных узлов, обрывов и коротких замыканий.

Далее в диссертации матмодель (1) была конкретизирована к описанию наиболее широко распространённого ТПН без нулевого провода ( $R_{\sigma}=0$ ,  $L_{\sigma}=0$ ) с синхронной системой импульсно-фазового управления (СИФУ) по вертикальному принципу.

Если идеализировать тиристоры  $R_{\Gamma}=0$ ,  $R_{\text{обр}}=\infty$  и принять равными сопротивлению обмоток АД токам прямой и обратной последовательностей, что имеет место для серийных общепромышленных электродвигателей, то выражения для ЭДС несимметрии  $e_{\alpha}$ ,  $e_{\beta}$  существенно упрощаются. При этом систему уравнений (1) удаётся записать в потокосцеплениях, что повышает её устойчивость при компьютерном анализе, а работу ТПН свести к выработке функций естественной коммутации ЭДС сети  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$ .

Последнее описывалось математической моделью ТПН, имитирующей логику переключения его тиристоров с помощью неравенств и алгебраических уравнений условий перехода тиристоров из закрытого состояния в открытое и обратно по напряжениям управления (задания) и сети.

С этой целью, для каждой из фаз вводится своё условное время  $T_y$ , изменяющееся только внутри каждого полупериода сетевого напряжения с частотой  $f$  так, что:

$$T_y = t - \frac{n-1}{2f}, \quad (2)$$

где  $T_y$  – условное время;  $t$  – текущее время;  $n$  – номер периода;  $f$  – частота сети.

Тогда условие открывания (закрывания) тиристора, например в фазе А, можно записать в виде:

$$i_{\alpha S} = \begin{cases} i_{\alpha S} = 0 \text{ при } 0 \leq T_y \leq T_3, \\ i_{\alpha S} \neq 0 \text{ при } T_3 \leq T_y \leq \frac{1}{2f} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $i_{\alpha S}$  – ток статора в фазе А.

Здесь условное время задержки отпирания тиристора:

$$T_3 = \frac{\alpha_{\max}}{2f\pi} \left( 1 - \frac{u_3}{U_{\max}} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\max}$  – максимальное значение угла отпирания тиристора;  $u_3$ ,  $U_{\max}$  – текущее и максимальное значения напряжения задания открывания тиристора.

В промежутки времени, когда тиристоры фазы А отключены, напряжение  $u_{as}$  на этой фазной статорной обмотке АД формируется за счёт трансформации напряжений других фаз, если  $\omega \neq 0$ .

Когда же тиристоры фазы А открыты, то напряжение  $u_{as}$  создаётся с помощью ЭДС сети  $e_A, e_B, e_C$  и напряжения смещения нейтрали  $u_N$ .

Таким образом:

$$u_{as} = \begin{cases} u_{as1} & \text{при } i_{as} = 0, \\ e_a - u_N & \text{при } i_{as} \neq 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $u_{as1} = k_r \frac{d\psi_{\omega}}{dt}$  – напряжение трансформации фазы А;

$u_N = \frac{1}{3}(u_{as1} + e_B + e_C)$  – напряжение смещения нейтрали;  $\psi_{\omega}$  – потокосцепление роторной обмотки по оси  $\alpha$ ;  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – коэффициент связи ротора и статора.

Аналогично (2)-(5), но со сменой индексов, определяются фазные напряжения  $u_{bs}$  и  $u_{cs}$ , а далее через  $u_{as}, u_{bs}$  и  $u_{cs}$  вычисляются статорные напряжения  $u_{\alpha s}, u_{\beta s}$  по уравнениям перехода к двухфазной модели  $\alpha$ - $\beta$ .

Математические модели остальных блоков системы управления параметрическим пуском записаны традиционно, без принципиальных особенностей и поэтому здесь в автореферате не приводятся.

Программное обеспечение математической модели базируется на языке программирования FORTRAN – 77. При разработке программы была использована универсальная программа DO2 – BAE, разработанная корпорацией NAG, которая решает систему из нескольких дифференциальных уравнений.

Программа состоит из 17 элементов – основной программы и 16 подпрограмм.

В третьей главе была определена численным анализом оптимальная по быстродействию система управления пуском при ограничении тока или момента. Поскольку математическая модель параметрического пуска является нелинейной и использует функции многих независимых аналоговых и дискретных переменных, то была выбрана стратегия оптимизации системы управления пуском на компьютере, базирующаяся на решении указанной задачи нелинейного математического программирования методом упорядоченного перебора, который является наиболее подходящим в данной ситуации. Его относят к наиболее простым и надежным методам оптимизации, не требующим сложных предварительных преобразований целевой функции и ограничений. Данный метод эффективен при решении задач минимизации (максимизации) небольшой размерности – не более 4, поскольку при большем числе параметров объем и время вычислительной работы резко возрастают.

В рассматриваемом случае этот подход реализован путём численного исследования различных вариантов управляемого пуска и сравнения их

между собой по динамическим показателям по отношению к прямому пуску АД, в качестве которых были выбраны:

$\tau = t/t_n$  – отношение длительности исследуемого пуска к длительности прямого пуска;

$\mu = M_{max}/M_n$  – показатель максимального момента – отношение максимального момента к номинальному моменту двигателя;

$i_n = i_{max}/i_n$  – отношение максимального тока к номинальному току двигателя.

С целью конкретизации, исследования проводились для электропривода воздуходувки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод», который имеет следующие номинальные технические характеристики: напряжение 380В; ток 200 А; частота вращения 1480 об/мин; момент 1300 Н·м; механическая мощность 200 кВт; коэффициент полезного действия 0,94; коэффициент мощности 0,92. Момент инерции воздуходувки составляет 119 кг·м<sup>2</sup>, а момент инерции электродвигателя – 3,6 кг·м<sup>2</sup>.

После чего были построены зависимости двух последних показателей от кратности времени  $\tau$  прямого пуска.

На рис. 2 представлены зависимости динамических показателей от относительного времени при различных способах пуска, использованы следующие обозначения: Р – реакторный пуск; Н – пуск с изменением напряжения; ТПН – пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения без обратных связей; ОС – пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения с обратной связью по току; ОТС – пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения с обратной связью по току с отсечкой.

Как видно из рис. 2а, наилучшей по быстродействию и токоограничению является САУ с программируемым задатчиком интенсивности и обратной связью по току, так как из рассмотренных способов пуска в этом случае пусковой ток поддерживается на минимальном уровне максимально точно.

Ограничения максимального момента при наибольшем быстродействии лучше всего обеспечивает САУ с программируемым задатчиком интенсивности и обратной связью по току с отсечкой (см. рис. 2б).

*В четвертой главе* изложены результаты экспериментальных исследований системы управления тиристорного преобразователя напряжения для пусков турбомеханизмов.

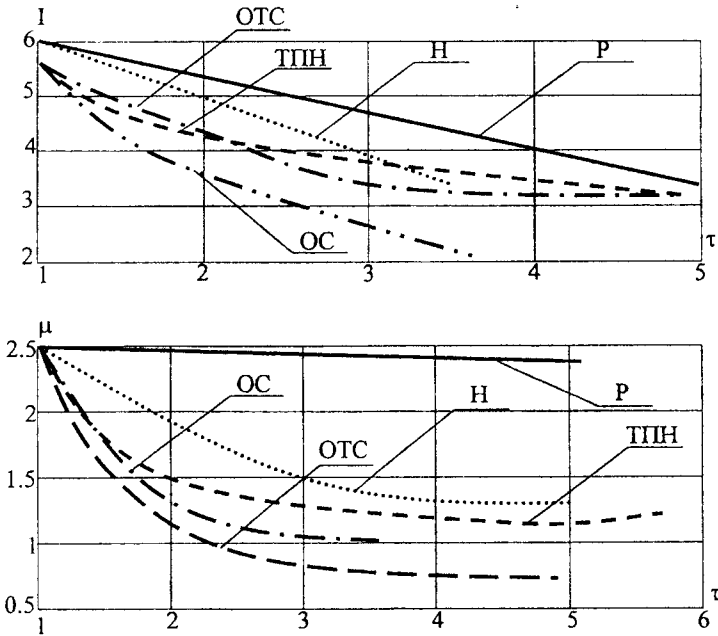


Рис. 2. Зависимости кратности максимального  $\mu$  момента (а) и кратности пускового  $i_n$  тока (б) от кратности  $\tau$  времени пуска при различных способах пуска

С этой целью создана новая универсальная плата, которую можно использовать для схемной реализации трёх разработанных систем управления на базе комплектной тиристорной станции управления ТСУ-2, если стандартную панель пуска заменить на новую плату управления пуском. Схема платы представлена на рис. 3.

Она формирует временную диаграмму напряжения управления из четырех участков: первоначальное нарастание по экспоненте, снижение до минимального значения по экспоненте, выдержка на постоянном уровне, заключительное нарастание по линейному закону до максимального значения.

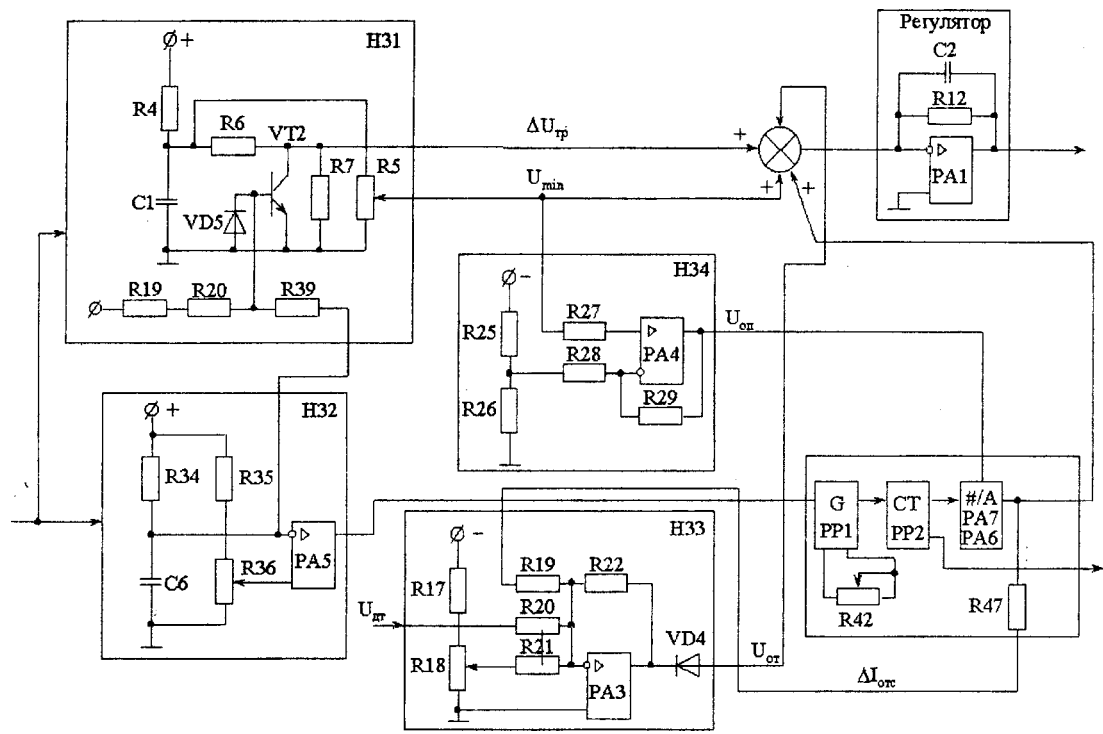


Рис. 3. Схема платы плавного пуска



Диапазоны регулирования параметров временной диаграммы напряжения системы импульсно-фазового управления таковы:

напряжение пика, В	0-10;
напряжение полки, В	0-8;
время нарастания пикового напряжения, с	0-4;
время уменьшения пикового напряжения, с	0-4;
длительность полки, с	0-6,5;
время пуска, мин	0,5-4,5.

Формирование линейно-нарастающей части диаграммы осуществляется с помощью цифроаналогового задатчика интенсивности, а остальных участков с помощью RC-цепей.

Время первоначального нарастания сигнала задания определяется постоянной времени  $R4, C1$  – цепи в звене НЗ-1. Напряжение трогания является суммой сигналов  $U_{\text{мин}}$ , регулируемого потенциометром  $R5$ , и напряжения  $\Delta U_{\text{тр}}$  с делителя  $R6, R7$ . Снижение сигнала задания от напряжения трогания до напряжения выдержки выполняется транзистором  $VT2$ , который при открывании шунтирует резистор  $R7$ . Требуемое время спада и интенсивность снижения сигнала задания обеспечивается напряжением смещения базы транзистора  $VT2$  через резисторы  $R19, R20$ . Время, требуемое для затухания электромагнитных переходных процессов, задаётся в звене НЗ2 потенциометром  $R36$ . Обеспечение требуемого уровня и фронта сигнала разрешения работы задатчика интенсивности  $ЗИ$  производится компаратором на операционном усилителе  $DA 5$ .

Установка отсечки тока в нелинейном звене НЗ3 больше пускового превращает САУ в разомкнутую. Обратную связь без отсечки можно рассматривать как отсечку с нулевой уставкой, которую реализуют в этом же блоке.

Датчик тока статора в ТСУ-2 выполнен в виде трёхфазного трансформатора тока, работающего на выпрямитель. В подобной системе измеряется среднее значение тока, поэтому при уменьшении угла отпирания тиристоров рост процентного отношения первой гармоники тока статора не фиксируется датчиком тока.

Для компенсации увеличения первой гармоники тока статора в системе пуска предусмотрено суммирование сигнала датчика тока с сигналом задатчика интенсивности.

Для того чтобы при пуске двигателя не сработала имеющаяся в ТСУ-2 защита преобразователя от перегрузки по току, она на время пуска блокируется сигналом с выхода счётчика  $DD2$  и разблокируется только по окончании пуска с задатчика интенсивности.

Производственные испытания описанной системы пуска подтвердили предсказанный теоретический результат, что в разомкнутой системе управляемого пуска возникают автоколебания тока статора с частотой нескольких герц и амплитудой, равной по величине пусковому току (рис. 4).

С целью исключения автоколебаний и обеспечения заданного токоограничения при минимально возможном времени пуска, в соответствии с рекомендациями численного анализа была введена отрицательная обратная связь по току с отсечкой. Это позволило задавать величину пускового тока статора с существенно меньшей амплитудой его автоколебаний.

На рисунке 5 показаны зависимости кратности пускового тока от времени пуска, полученные теоретическим и экспериментальным путём. Как видно из графиков, результаты, полученные моделированием, дают по сравнению с практикой пессимистическую оценку возможности ограничения пускового тока.

Система плавного пуска была внедрена на асинхронном электроприводе воздухоудки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин).

В процессе эксплуатации описанной системы управления пуском электропривода была установлена почти пропорциональная зависимость между временем пуска и максимальным значением пускового тока. Так, например, при пусковом токе, в 3 раза превышающем номинальный, время разгона составило 47 с, а при токе в 1,25 раза больше номинального – 123 с. В пределе удаётся снизить пусковой ток почти в 5 раз по сравнению с пуском по схеме «звезда – треугольник», правда, при более чем двукратном увеличении времени разгона.

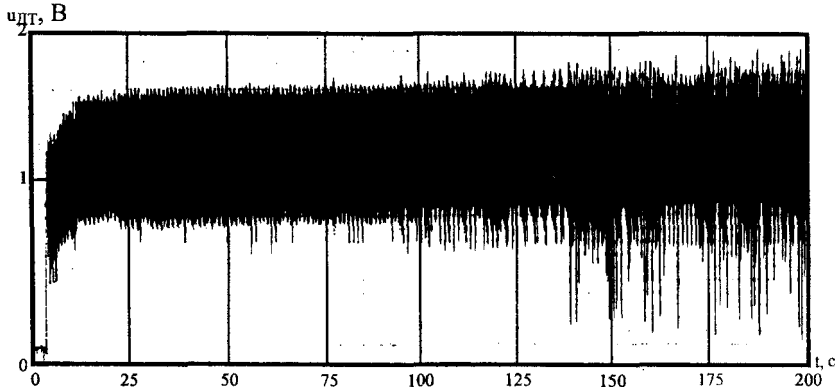


Рис. 4. Сигнал датчика тока ( $u_{ДТ}$ ), при пуске с помощью разомкнутой САУ (угол отпирания тиристоров  $100^\circ$ )

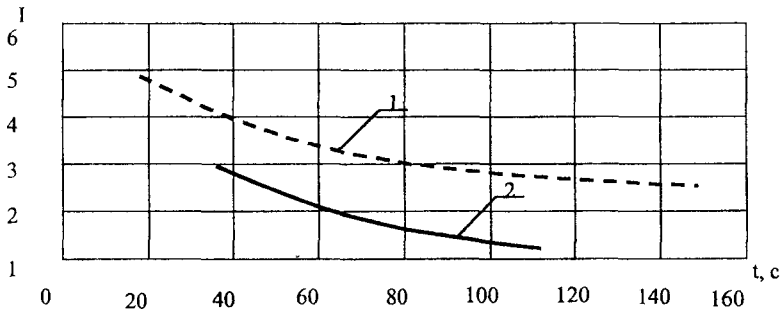


Рис. 5. Зависимости кратности пускового тока от времени пуска: 1 — полученная теоретическим путем; 2 — экспериментальным

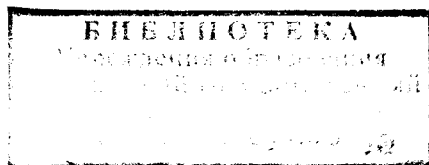
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований решена важная научно-прикладная задача по разработке оптимальных по быстродействию при заданном ограничении тока или момента способов и схемных решений систем управляемого пуска трёхфазных, короткозамкнутых асинхронных электроприводов турбомеханизмов. Это подтверждается следующими результатами, полученными в работе:

1. Построена обобщённая математическая модель трёхфазного асинхронного электродвигателя с коммутируемой продольно-поперечной несимметрией его питания, позволяющая анализировать различные режимы работы АД с вентильными и другими коммутаторами различных типов [1, с. 94-96].

2. Создана математическая модель системы управляемого пуска короткозамкнутых трёхфазных асинхронных электроприводов турбомеханизмов, позволяющая наиболее достоверно, по сравнению с известными, проводить анализ и сравнение между собой различных по принципам построения и реализации систем параметрического пуска на основе ТПН [5, с. 54; 6, с. 32].

3. Исследованы с помощью численного моделирования основные существующие способы управляемого пуска и показано, что оптимальным по быстродействию при заданном ограничении тока является пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения с обратной связью по току, а оптимальным по быстродействию при заданном ограничении момента является пуск с помощью тиристорного преобразователя напряжения с обратной связью по току с отсечкой [2, с. 185; 4, с. 97].



4. Осуществлена новая схемная реализация на базе тиристорной станции управления ТСУ-2 одного из вариантов разработанных систем управляемого пуска короткозамкнутых трехфазных асинхронных электроприводов турбомеханизмов [3, с. 56-59].

5. Проведены производственные испытания вышеуказанной системы для плавного пуска короткозамкнутого трехфазного асинхронного электропривода воздушодувки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин). Они показали, что система позволяет почти пропорционально регулировать время пуска и максимальное значение пускового тока. Так, например, при пусковом токе, в 3 раза превышающем номинальный, время разгона составило 47 с, а при токе в 1,25 раза больше номинального – 123 с. В пределе удаётся снизить пусковой ток почти в 5 раз по сравнению с пуском по схеме «звезда – треугольник», правда, при более чем двукратном увеличении времени разгона [7, с. 158-159; 8, с. 159-161].

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Луковников В. И., Вепер Л. В. Логвин В. В., Рожков А. И. Математическая модель трёхфазного асинхронного двигателя с продольно-поперечной несимметрией линии его питания //Электричество. – 1999.- № 8.-С. 94-96.

2. Луковников В. И., Захаренко С. И., Рожков А. И. Колебательные режимы при пуске мощных вентиляторных электроприводов //Материалы междунар. конф. - Минск: БГПА, 1995.-С.185.

3. Луковников В. И., Захаренко С. И., Рожков А. И. Опыт применения комплексной тиристорной станции ТСУ-2 для управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов //Электротехника. - 2000. - № 6. - С. 56-59.

4. Луковников В. И., Захаренко С. И., Рожков А. И. Плавный пуск мощных вентиляторных электроприводов //Автоматизация и прогрессивные технологии: Матер. межрег. семинара-выставки. – Новоуральск: МИФИ-2, 1996.- С. 97.

5. Луковников В. И., Логвин В. В., Рожков А. И. Символический метод анализа систем автоматического управления с модуляцией и переменными параметрами //Автоматизированный электропривод промышленных установок: Тез. Республ. НТК.- Минск: БГПА, 1994.- С. 54.

6. Рожков А. И. Математическая модель пуска асинхронного электропривода вентилятора //Сб. материалов межвузовской конф. аспирантов и студентов. - Гомель: ГКИ – ГПИ, 1997.-С. 32.

7. Рожков А. И. Причины возникновения автоколебаний при пуске асинхронных электроприводов вентиляторов с помощью тиристорных преобразователей напряжения //Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. НТК. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2000.- С. 158-159.

8. Рожков А. И. Система плавного пуска асинхронного электропривода воздухоудвки нагревательной печи стана 850 //Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. НТК. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2000.- С. 159-161.

Рожков Андрей Игоревич

*Управление пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов*

Тиристорный преобразователь напряжения, автоколебания, система управления, обратная связь по току с отсечкой.

Объект исследования – асинхронный электропривод турбомеханизмов.

Предмет исследования – система управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов.

Цель работы заключается в разработке оптимальных по быстродействию при заданном ограничении тока или момента способов и схемных реализаций управления пуском асинхронных электроприводов турбомеханизмов.

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

Создано математическое и программное обеспечение управляемого параметрического пуска асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов, учитывающее несинусоидальность тока статора, дискретность работы, зависимость выходного напряжения тиристорного преобразователя напряжения от скольжения и коэффициента мощности асинхронного двигателя.

Впервые проведено численное комплексное исследование пуска трехфазных асинхронных электроприводов турбомеханизмов, что позволило найти способ управления пуском, оптимальный по быстродействию при ограничении тока или момента.

Результаты исследования: внедрена в эксплуатацию система управляемого плавного пуска трёхфазных асинхронных короткозамкнутых электроприводов турбомеханизмов с помощью тиристорных преобразователей напряжения для электропривода воздухоудвки нагревательной печи стана 850 сортопрокатного цеха Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» (г. Жлобин).

Область применения – организации и предприятия, занимающиеся проектированием, изготовлением и эксплуатацией турбомеханизмов и электроприводов к ним.

Ражкоў Андрэй Ігаравіч

*Кіраванне пускам асінхронных электрапрывадоў турбамеханізмаў*

Тырыстарны пераўтваральнік напружання, аўтавагавання, сістэма кіравання, адваротная сувязь па току з адсечкай.

Аб'ект даследвання – асінхронны электрапрывад турбамеханізмаў.

Прадмет даследвання – сістэма кіравання пускам асінхронных электрапрывадоў турбамеханізмаў.

Мэта работы заключаецца ў распрацоўцы аптымальных па хуткадзеянню пры зададзеным абмежаванні тока або моманту спосабаў і схемных рэалізацый кіравання пускам асінхронных электрапрывадоў турбамеханізмаў.

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

Створана абагульненая аналітычная матэматычная мадэль кіруемага параметрычнага пуску асінхронных коротказамкнутых электрапрывадоў турбамеханізмаў, якая ўлічвае несінусаідальнасць тока статора, дыскрэтнасць працы, залежнасць выхаднога напружання тырыстарнага пераўтваральніка напружання ад сліжання і каэфіцыента магутнасці асінхроннага рухавіка.

Упершыню праведзена колькаснае комплекснае даследванне пуску трохфазных асінхронных электрапрывадоў турбамеханізмаў, што дазволіла знайсці спосаб кіравання пускам, аптымальных па хуткасці пры абмежаванні тока або моманту.

Распрацавана праграмае забяспячэнне аналізу матэматычнай мадэлі, дазваляючай праводзіць разнабаковыя даследванні розных сістэм кіравання пускам трохфазных асінхронных коротказамкнутых электрапрывадоў турбамеханізмаў, а таксама аптымізаваць структуры і параметры розных сістэм кіравання пускам.

Вынікі даследвання: уведзена ў эксплуатацыю сістэма кіруемага плаўнага пуску трохфазных асінхронных коротказамкнутых электрапрывадоў турбамеханізмаў з дапамогай тырыстарных пераўтваральнікаў напружання для электрапрывада паветрадуўкі печы стану 850 сортапракатнага цэху Рэспубліканскага унітарнага прадпрыемства «Беларускі металургічны завод» (г. Жлобін).

Сфера прымянення – арганізацыі і прадпрыемствы, якія займаюцца праектаваннем, вырабам і эксплуатацыяй турбамеханізмаў і электрапрывадоў да іх.

**SUMMARY**

Rozhkov Andrey Igorevich

***Control of setting in motion of asynchronous electric drive  
of turbomechanisms***

Tiristorous transformer of tention, autovibration, system of control, reverse connection by tention with chopping.

Object of research – the asynchronous electric drive of turbomechanisms.

Subject of research – system control of setting in motion of asynchronous electric drive of turbomechanisms.

The aim of research is development of optimum (by quickness of action) ways under given limitation of current or moment and circuit (schematic) achievements of starting control of asynchronous electric drive of tyrbomechanisms.

Scientific and commercial significance of the results obtained:

The summarized analytical mathematical model of controlling parametric stating of asynchronous short secluded electric drives of tyrbomechanisms which takes into account asination of tention of starter, discretization of work, dependence of coming out tension of tiristorous transfoimer of tention from sliding and efficiency of capacity of asynchronous engine is developed.

For the first time the numerical comprehensive research of starting of three-phased asynchronous electric drive of turbomechanisms was carried out providing to find the way the possibility to control the starting optimum by quickness of action under limitation of current or moment.

Is developed software of the analysis of mathematical model proving the possibility to carry out multifaceted research of different systems of starting control of threephased asynchronous short secluded electric drives of turbomechanism and also to optimize the structures and parameters of different systems of starting control.

The results of the research: the system of controlling smooth starting of three-phased asynchronous electric drives of turbomechanism with the help of tiristorous transformers of tension for electric drive of the blower of the heating furnace for the rolling mill 850 of the Belorashian still works (Zhlobin) was put into operation.

The area of application – organizations and firms engaged in designing, production and exploitation of turbomechanisms and electric drives for them.





**Рожков Андрей Игоревич**

**УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Редактор: О.Н. Сакунова  
Компьютерная верстка: Е. Н. Герасименко

Подписано в печать 25.10.2001.  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. печ. л. 1,39. Уч. – изд. л. 1,69. Тираж 100 экз. Изд. № 104.  
Заказ № 184.

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».  
Лицензия ЛВ № 399 от 12.06.2001.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на ризографическом оборудовании Учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».  
Лицензия ЛП № 114 от 12.06.2001.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.