

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 62-83 + 621.86-83

**ВАСИЛЬЕВ**  
Дмитрий Сергеевич

**ПЛАВНЫЙ ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Минск, 2014

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
руководитель:

**Фираго Бронислав Иосифович**, доктор  
технических наук, профессор кафедры «Электропривод  
и автоматизация промышленных установок и  
технологических комплексов», Белорусский  
национальный технический университет (г. Минск)

Официальные  
оппоненты:

**Кузнецов Александр Петрович**, доктор  
технических наук, профессор кафедры «Системы  
управления», проректор по научной работе  
Белорусского государственного университета  
информатики и радиоэлектроники (г. Минск);

**Кузьмицкий Иосиф Фелицианович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Автоматизация производственных процессов  
и электротехника», Белорусский государственный  
технологический университет (г. Минск)

Оппонирующая  
организация:

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

Защита состоится 28 февраля 2014 г. в 16 часов на заседании совета по  
защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом  
университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2,  
ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
национального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высылать  
на адрес университета и предварительно отправлять по факсу (8-017) 292-91-37  
(для стран СНГ: (8-10-375-17) 292-91-37) на имя председателя совета по защите  
диссертаций Ф.А. Романюка.

Автореферат разослан «22» января 2014 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

Сергей И.И.

© Васильев Д.С., 2014

© Белорусский национальный  
технический университет, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны являются одними из наиболее распространенных типов рабочих машин и используются практически во всех отраслях народного хозяйства Республики Беларусь. Так как подавляющее большинство грузоподъемных кранов имеет электроприводы (ЭП) своих механизмов, их эффективность и производительность в значительной степени зависят от качественных показателей используемого кранового электрооборудования.

Применяемые до настоящего времени нерегулируемые ЭП на основе асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором с прямым пуском и торможением противовключением характеризуются большими пусковыми и тормозными токами, приводящими к повышенному нагреву и механическим воздействиям на обмотку двигателя, а также ударными моментами, неблагоприятно влияющими на механические передачи и металлоконструкцию кранов. Радикальным техническим решением по устранению этих недостатков является система «преобразователь частоты - асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), но с экономической точки зрения это далеко не всегда оправдано.

В тех случаях, когда не предъявляется жестких требований к регулированию скорости, в асинхронных ЭП крановых механизмов передвижения можно использовать более технологически простые, надежные и дешевые устройства плавного пуска и торможения (УПП) с возможностью перехода в процессе торможения на устойчивую пониженную скорость для точной остановки перемещаемого по горизонтали груза.

Однако серийно выпускаемые в настоящее время УПП построены на основе тиристорного регулятора напряжения (ТРН) с фазовым управлением и соответственно характеризуются всеми присущими этому устройству и способу управления недостатками, а также не имеют функциональной возможности обеспечения устойчивой пониженной скорости АД. К тому же, современные УПП позволяют изменять по определенному закону в переходных процессах АД действующее значение фактического несинусоидального напряжения, а не его *первую гармонику*, которая определяет электромагнитный момент АД.

Поэтому возникают актуальные задачи по устранению недостатков тиристорных УПП, разработке способов управления УПП по *первой гармонике* напряжения, обоснованию применения УПП на основе импульсных (транзисторных) регуляторов напряжения (ИРН) для уменьшения влияния УПП на сеть и улучшения их энергетических показателей, выявлению наиболее рациональной силовой схемы ИРН и реализации возможности обеспечения устойчивой пониженной скорости АД. Именно эти приоритетные в настоящее время задачи в области плавного пуска и торможения асинхронных ЭП крановых механизмов передвижения и решаются в данной работе.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Данная диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям прикладных научных исследований и приоритетным направлениям научно-технической деятельности в области энергосбережения. Работа связана с выполнением темы «Системы безударного пуска и торможения электроприводов на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором», входящей в ГБ НИР 11-257 «Совершенствование электротехнических систем на основе полупроводниковых преобразователей энергии и бесконтактных двигателей» кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является обоснование возможности и целесообразности применения УПП в ЭП крановых механизмов передвижения с АД с короткозамкнутым ротором. Для достижения сформулированной цели необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать возможность и целесообразность плавного пуска и торможения ЭП крановых механизмов передвижения при изменении амплитуды *первой гармоники* питающего напряжения АД в пускотормозных режимах по заданным законам;

- разработать методику расчета и построения кривой изменения *первой гармоники* питающего напряжения АД по требуемому закону в функции угла управления тиристорами и в функции скважности полностью управляемых ключей на базе транзисторов;

- разработать имитационную модель для исследования режимов плавного пуска и торможения ЭП крановых механизмов передвижения на основе системы «тиристорный регулятор напряжения - асинхронный двигатель» (ТРН-АД) с разными законами изменения амплитуды *первой гармоники* питающего напряжения;

- выполнить анализ возможных структур силовых схем УПП на основе транзисторных ИРН;

- разработать имитационные модели для исследования и сравнения режимов плавного пуска и торможения ЭП крановых механизмов передвижения на основе систем «импульсный регулятор напряжения - асинхронный двигатель» (ИРН-АД) с различными структурами силовых схем и разными законами изменения *первой гармоники* питающего напряжения;

- доработать имитационные модели систем «ТРН-АД» и «ИРН-АД» блоками для исследования и сравнения режимов квазичастотного управления

(КЧУ) АД ЭП крановых механизмов передвижения на пониженной скорости с помощью УПП на основе ТРН и ИРН;

– осуществить выбор рациональной по технико-экономическим и энергетическим показателям системы на основе УПП для применения в ЭП крановых механизмов передвижения для обеспечения их плавного пуска, торможения и работы на пониженной скорости.

Объектом исследования являются ЭП механизмов передвижения кранов. Предметом исследования является плавный пуск и торможение ЭП крановых механизмов передвижения с АД с короткозамкнутым ротором.

**Положения, выносимые на защиту.** В диссертации обоснованы, разработаны и защищаются:

1) впервые предложенный алгоритм реализации управления напряжением АД с короткозамкнутым ротором с помощью УПП на основе тиристорных регуляторов напряжения по *первой гармонике* напряжения, а не по действующему значению несинусоидального напряжения, позволяющий автоматизировать расчет значений *первой гармонике* напряжения, необходимых для ее изменения по требуемому закону;

2) преимущества применения в УПП экспоненциального закона изменения *первой гармонике* напряжения, отличающегося меньшими по сравнению с линейным законом потерями электроэнергии в АД в пускотормозных режимах;

3) целесообразность использования в УПП транзисторных регуляторов напряжения с импульсным регулированием, отличающихся от применяемых в настоящее время тиристорных регуляторов с фазовым управлением тем, что позволяют значительно упростить алгоритм управления АД по *первой гармонике* напряжения, улучшить гармонический состав кривой питающего напряжения АД, исключить фазовый сдвиг *первой гармонике* этого напряжения и уменьшить потери электроэнергии в АД во время пускотормозных режимов;

4) впервые разработанные имитационные модели для УПП с тиристорными и транзисторными регуляторами напряжения с управлением по *первой гармонике* напряжения и КЧУ, позволяющие проводить численные эксперименты с различными АД с короткозамкнутым ротором на этапе проектирования, ввода эксплуатацию и наладки ЭП крановых механизмов передвижения;

5) впервые предложенная в качестве рациональной (по обобщающему критерию) для использования в УПП ЭП крановых механизмов передвижения схема ИРН, содержащая 4 транзистора и 18 диодов, позволяющая осуществлять регулирование напряжения АД по экспоненциальному закону *первой гармонике* напряжения и реализовать режим КЧУ АД.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

Соискателем разработаны алгоритмы расчета *первой гармоники* напряжения для ее изменения по линейному и экспоненциальному законам с помощью угла управления тиристорами в тиристорных УПП; доказаны преимущества использования в УПП экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения по сравнению с линейным; обосновано использование в УПП регуляторов с импульсным регулированием напряжения вместо регуляторов с фазовым управлением; разработаны имитационные модели УПП на основе ИРН с симметричными и несимметричными силовыми схемами, позволяющими реализовать управление по *первой гармонике* напряжения и режим КЧУ АД; разработана рациональная (по обобщающему критерию) структура силовой схемы ИРН и обосновано ее использование в УПП ЭП крановых механизмов передвижения. Общие направления исследований были определены научным руководителем.

**Апробация результатов диссертации.** Материалы диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 21 научно-технической конференции (из них 1 в г. Гродно, 4 в г. Гомеле, 15 в г. Минске, 1 на Украине в г. Алушта) и 3 международных симпозиумах (все 3 в Польше, г. Висла и г. Гливице): 9-й республиканской научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь «НИРС-2004» (г. Гродно, ГрГУ, 2004 г.); республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2004, 2007, 2008, 2009 г.); научной конференции студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ (г. Минск, БНТУ, 2005 г.); научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ (г. Минск, БНТУ, 2006, 2007 г.); 2-й международной научно-технической конференции «Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах» (г. Минск, БГТУ, 2007 г.); международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, БНТУ, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 г.); международной конференции «Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация» (г. Минск, БГУ, 2008 г.); международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, БГТУ, 2009 г.); 16-й международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» (Алушта, Украина, 2009 г.); международной научно-технической конференции «Автоматизация технологических процессов» (г. Минск, БНТУ, МинскЭкспо, 2011 г.); международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении»

(г. Минск, БНТУ, МинскЭкспо, 2012, 2013 г.); международном симпозиуме аспирантов, докторантов и молодых ученых Западной, Центральной и Восточной Европы – International PhD Workshop OWD (г. Висла, г. Гливице, Польша, Силезский политехнический университет, 2009, 2010, 2011 г.).

Две статьи соискателя по теме данной диссертационной работы, представленные на английском языке на 11 и 12-м международных симпозиумах International PhD Workshop OWD (Польша, г. Висла и г. Гливице, Силезский политехнический университет), были отмечены двумя дипломами с отличием второй степени (Distinction Diploma, Приложение А диссертации), а также одним специальным дипломом от научного комитета молодых экспертов (Young Experts Award, Приложение А диссертации) за качество, актуальность и новизну полученных результатов диссертационных исследований.

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации в полной мере изложены в 28 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых [1, 2, 4, 5] и в 1 статье в нерецензируемом [3] научно-технических журналах, в 6 статьях (на английском языке) в рецензируемых научно-технических сборниках [6-8, 26-28], в 17 тезисах докладов научно-технических и научно-практических конференций [9-25]. Общий объем публикаций в научно-технических журналах и сборниках составляет 4,2 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 248 страниц, из которых 83 страницы занято 25 таблицами и 141 рисунком, 17 страниц – библиографическим списком (143 наименования источников и 28 публикаций соискателя) и 32 страницы – приложениями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведено исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов в ЭП с АД с короткозамкнутым ротором, а также потерь электроэнергии, нагрева обмоток статора и допустимого числа включений АД в час в различных пускотормозных режимах при переменной величине синусоидального питающего напряжения.

Показано, что при прямом пуске АД с короткозамкнутым ротором с номинальным напряжением сети наблюдаются большие пики электромагнитных моментов кратностью 5 – 6 от  $M_{ном}$ , вызывающие сильные удары в механической передаче и поломки валов. В свою очередь, при торможении противовключением с незатухшим магнитным полем пики электромагнитных моментов АД в несколько раз превышают пики ударных

моментов при прямом пуске и могут достигать  $M_{\max} = (10 - 15)M_{\text{ном}}$ .

Установлено, что изменение *первой гармоники* питающего напряжения по определенному закону позволяет в несколько раз (2 – 3 раза в зависимости от длительности  $t_0$  ее изменения и закона) снизить при плавном пуске АД пики электромагнитного момента по сравнению с прямым пуском и практически полностью устранить при плавном торможении большие пики моментов, наблюдаемые в режиме торможения противовключением.

Определено, что для экспоненциального закона изменения *первой гармоники* питающего напряжения АД характерно большее по сравнению с линейным законом ограничение пиков электромагнитного момента и пускового тока, и, в то же время, более быстрый разгон и торможение АД. При этом оптимальное по длительности время разгона и торможения АД с короткозамкнутым ротором, а также ограничение пиков электромагнитного момента и пускового тока в переходных процессах наблюдается при задании для экспоненциального закона  $t_0 = (2 - 3)t_{\text{п}}$ , где  $t_{\text{п}}$  – время разгона АД при прямом пуске.

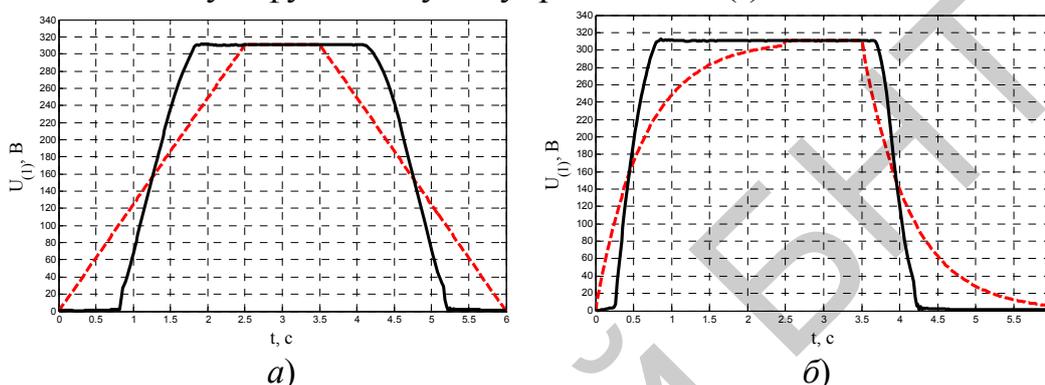
Показано также, что потери электроэнергии в АД при плавном пуске с линейным и экспоненциальным законом изменения *первой гармоники* напряжения больше потерь электроэнергии при прямом пуске, а потери электроэнергии при плавном торможении с аналогичными законами изменения напряжения, наоборот, меньше потерь электроэнергии при торможении противовключением. Применение экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения позволяет уменьшить по сравнению с линейным законом потери электроэнергии в АД при плавном пуске и торможении. При  $t_0 = (2 - 3)t_{\text{п}}$  применение экспоненциального закона в отличие от линейного позволяет обеспечить в конце пуска температуру нагрева обмоток статора АД ниже предельно допустимого значения для данного класса изоляции, а также незначительно снижает допустимое число включений АД по сравнению с режимом прямого пуска и торможения противовключением, обеспечивая при этом его безударный пуск и торможение, что особенно важно для асинхронных ЭП, работающих в повторно-кратковременном режиме с постоянным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов.

**Во второй главе** выполнен анализ УПП АД с короткозамкнутым ротором на основе ТРН. Рассмотрены применяемые в настоящее время разновидности силовых схем ТРН, выявлены их положительные свойства и недостатки.

Установлено, что поскольку электромагнитный момент АД определяется *первой гармоникой* напряжения, то в пуско-тормозных режимах целесообразно управлять АД изменением по определенному закону величины *первой гармоники* питающего напряжения, а не действующего

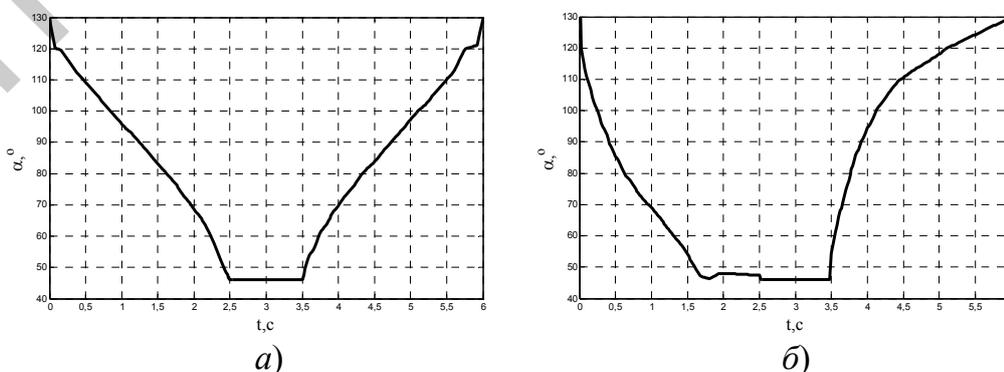
значения фактического несинусоидального напряжения (что реализовано в современных серийно выпускаемых тиристорных УПП).

Показано, что изменение угла управления  $\alpha$  тиристорами силовой схемы ТРН в переходных процессах АД по определенному закону, например, линейному или экспоненциальному, не позволяет обеспечить на выходе ТРН желаемый вид (закон изменения) *первой гармоники* напряжения (рисунок 1). Поэтому для получения требуемого закона ее изменения необходимо формировать сложную функцию угла управления  $\alpha(t)$ .

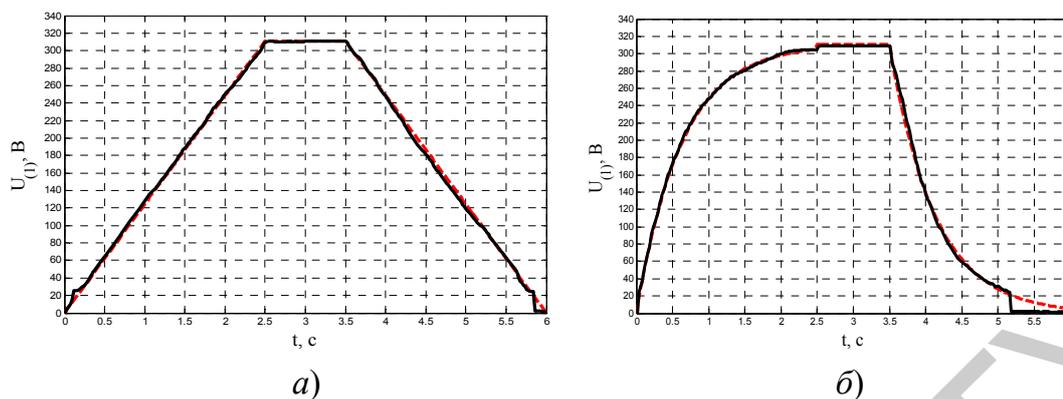


**Рисунок 1 – Вид *первой гармоники* напряжения  $U_{(1)}(t)$  при линейном (а) и экспоненциальном (б) изменении угла управления  $\alpha(t)$  в процессе плавного пуска и торможения АД типа 4МТКФ160LB8 (11кВт) и требуемый закон ее изменения (- -)**

Предложено для формирования сложной функции  $\alpha(t)$  использовать специально разработанные автором имитационные блоки в модели системы «ТРН-АД» в программе Matlab. Вид сформированной сложной функции угла управления  $\alpha(t)$ , соответствующей линейному и экспоненциальному изменению *первой гармоники* напряжения в процессе плавного пуска и торможения АД типа 4МТКФ160LB8, представлен на рисунке 2. Обеспечиваемые такими сложными функциями  $\alpha(t)$  кривые изменения *первой гармоники* напряжения в переходных процессах исследуемого АД (рисунок 3) практически не отличаются от требуемых законов, линейного и экспоненциального.



**Рисунок 2 – Вид функции  $\alpha(t)$ , соответствующей линейному (а) и экспоненциальному (б) изменению *первой гармоники* напряжения  $U_{(1)}(t)$  в процессе плавного пуска и торможения АД типа 4МТКФ160LB8 (11кВт)**



**Рисунок 3 – Линейный (а) и экспоненциальный (б) вид первой гармоники напряжения АД  $U_{(1)}(t)$ , обеспечиваемый соответствующей сложной функцией  $\alpha(t)$  рисунка 2, и требуемый закон ее изменения (- - -)**

Выявлено, что гармонический состав кривых выходного напряжения и тока ТРН по амплитудным значениям высших гармоник (ВГ) одинаков как при использовании линейного, так и экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения. В то же время, при условии одинакового времени изменения этой гармоники  $t_0$  для обоих законов, экспоненциальный закон характеризуется меньшей длительностью влияния пиковых значений ВГ тока и напряжения на работу АД по сравнению с линейным.

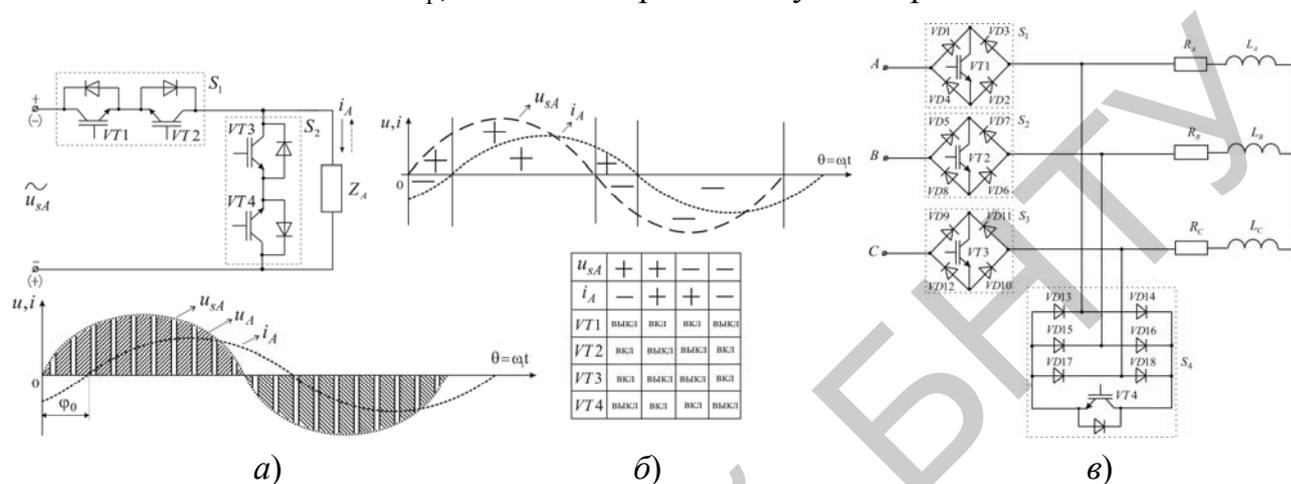
Показано также, что коэффициент мощности входной цепи ТРН незначительно, но выше для экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения по сравнению с линейным. Применение экспоненциального закона при питании АД от ТРН позволяет уменьшить, по сравнению с линейным, потери электроэнергии в АД за время пуска примерно на 9% и за время торможения примерно на 67% при одинаковой длительности  $t_0$  этих законов. Потери электрической энергии в АД за общее время пуска и торможения при управлении от ТРН и экспоненциальном изменении *первой гармоники* напряжения меньше примерно на 17% аналогичных потерь при использовании линейного закона.

**Третья глава** посвящена исследованию УПП АД с короткозамкнутым ротором на основе ИРН. Рассмотрен принцип и способы регулирования напряжения в импульсном регуляторе, а также их преимущества и недостатки.

Предложен алгоритм переключения основных и шунтирующих ключей ИРН с многократным однополярным широтно-импульсным способом регулирования напряжения, обеспечивающий непрерывное протекание тока в цепи и отсутствие перенапряжений на силовых элементах ИРН и в нагрузке.

Силовая схема однофазного ИРН, последовательность работы пар транзисторов его силовых ключей, кривые выходного напряжения и тока представлены на рисунке 4, а, б. Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  ключа  $S_1$ , работая с определенной частотой коммутации  $f_k$ , являются основными, т.е. они

участвуют в формировании соответственно положительной и отрицательной полуволны выходного напряжения ИРН из импульсов напряжения, количество которых зависит от величины  $f_k$ , а транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  ключа  $S_2$  – шунтирующими нагрузку соответственно при выключенных транзисторах  $VT2$  и  $VT1$  основного ключа  $S_1$ , т.е. на интервалах пауз в их работе.



**Рисунок 4 – Силовая схема однофазного ИРН и кривые выходного напряжения и тока фазы А ИРН при активно-индуктивной нагрузке (а), последовательность работы пар транзисторов однофазного ИРН (б), рациональная силовая схема симметричного трехфазного ИРН (в)**

В зависимости от числа и вида ключей, построенных на различных транзисторно-диодных комбинациях, в трехфазных ИРН возможно большое количество структур силовых схем – симметричного и несимметричного типа. В данной диссертационной работе рассмотрены пять вариантов таких структур – три симметричные и две несимметричные схемы. В качестве рациональной по наименьшему числу полностью управляемых полупроводниковых элементов можно рассматривать симметричную силовую схему ИРН на 4-х транзисторах и 18-и диодах (рисунок 4, в): три IGBT транзистора  $VT1$ – $VT3$  в диагоналях однофазных диодных мостов во входных фазах АД и трехфазный диодный мост с однонаправленным IGBT транзистором  $VT4$  для межфазного шунтирования нагрузки при отключении основных транзисторов.

Установлено, что *первая гармоника* выходного напряжения симметричного ИРН является линейной функцией скважности независимо от используемого закона ее изменения. Поэтому при питании АД от ИРН такого типа требуемый закон изменения *первой гармоники* напряжения в переходных процессах можно получить заданием аналогичного закона изменения скважности при определенной частоте коммутации ключей силовой схемы.

Выявлено, что гармонический состав кривых выходного напряжения и тока симметричных ИРН при одной и той же частоте коммутации транзисторов одинаков по амплитудным значениям ВГ для обоих исследованных законов

изменения *первой гармонике* напряжения, линейного и экспоненциального. Однако при одинаковом времени  $t_0$  для обоих законов, экспоненциальный закон характеризуется меньшей длительностью влияния амплитудных значений ВГ тока и напряжения на работу АД по сравнению с линейным законом.

Определено, что применение ИРН с симметричными силовыми схемами позволяет уменьшить значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых фазных напряжений и токов на зажимах АД по сравнению с ТРН и ИРН с несимметричными типами силовых схем.

Показано, что коэффициент мощности входной цепи симметричного ИРН незначительно, но выше для экспоненциального закона изменения *первой гармонике* напряжения по сравнению с линейным законом.

Также установлено, что наименьшие потери электроэнергии за время пуска и торможения АД соответствуют симметричным схемам ИРН, при этом применение экспоненциального закона *первой гармонике* напряжения при питании АД от такого ИРН позволяет уменьшить потери электрической энергии примерно на 9% при пуске и 68% при торможении по сравнению с линейным законом при условии одинаковой длительности этих законов  $t_0$ . Потери электроэнергии за общее время пуска и торможения АД для симметричного ИРН примерно на 12% меньше аналогичных потерь при управлении АД от ТРН и на 3% меньше тех же потерь при питании от ИРН с несимметричными силовыми схемами для обоих законов изменения *первой гармонике* напряжения.

Предложен обобщающий критерий оценки энергетических и технико-экономических показателей различных силовых схем УПП на основе ТРН и ИРН:

$$K_{\text{ид}} = b_1 K_M^* + b_2 N_{\text{эл}}^* + b_3 \text{ВУПГН} + b_4 \text{КЧУ}, \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – весовые коэффициенты (приняты равными единице в виду сложности их нахождения), величины которых характеризуют важность отдельного показателя в итоговой оценке рассматриваемых силовых схем УПП;  $K_M^*$  – относительный коэффициент мощности входной цепи силовой схемы УПП для трех значений *первой гармонике* напряжения АД 0,2; 0,5 и  $0,9U_{(1)\text{ном}}$  (по отношению к максимальному  $K_M$  при каждом взятом значении  $U_{(1)}$  среди всех исследованных схем УПП);  $N_{\text{эл}}^*$  – отношение минимального среди всех рассматриваемых схем УПП количества полностью (VT) или полууправляемых (VS) силовых элементов к количеству полностью или полууправляемых силовых элементов в конкретной силовой схеме; ВУПГН – возможность управления АД в переходных процессах по определенному закону *первой гармонике* питающего напряжения; КЧУ – возможность реализации с помощью УПП квазичастотного управления АД для работы на пониженной скорости в ЭП крановых механизмов передвижения. Результаты оценки различных

силовых схем УПП по критерию (1) при их работе на АД типа 4МТКФ160ЛВ8 (11кВт;  $M_c = M_{ном}$ ;  $K_J = 6,3$ ;  $t_0 = 2,5$  с) сведены в таблицу 1.

**Таблица 1 – Сводная таблица приближенной суммарной оценки вариантов силовых схем УПП на основе ТРН и ИРН по энергетическим и технико-экономическим показателям для использования в ЭП крановых механизмов передвижения**

Показатель УПП Силовая схема УПП	$K^*_M$ , о.е.			$N^*_{эл}$ , о.е.	ВУПГН	КЧУ	Итоговая оценка $K_{ид}$		
	$0,2U_{(1)ном}$	$0,5U_{(1)ном}$	$0,9U_{(1)ном}$				$0,2U_{(1)ном}$	$0,5U_{(1)ном}$	$0,9U_{(1)ном}$
ТРН на шести тиристорах	$0,18/0,375 = 0,48$	$0,375/0,535 = 0,7$	$0,635/0,715 = 0,89$	$4VT/6VS = 0,67$	1	1	3,15	3,37	3,56
ИРН на четырех силовых ключах	-	$0,535/0,535 = 1$	$0,715/0,715 = 1$	$4VT/8VT = 0,5$	-	1	-	2,5	2,5
ИРН на пяти силовых ключах	-	$0,535/0,535 = 1$	$0,715/0,715 = 1$	$4VT/10VT = 0,4$	-	1	-	2,4	2,4
ИРН на шести силовых ключах	$0,375/0,375 = 1$	$0,455/0,535 = 0,85$	$0,66/0,715 = 0,923$	$4VT/12VT = 0,33$	1	1	3,33	3,18	3,25
ИРН на трех силовых ключах с шунтирующим трехфазным диодным мостом и однонаправленным транзистором	$0,375/0,375 = 1$	$0,455/0,535 = 0,85$	$0,66/0,715 = 0,923$	$4VT/7VT = 0,57$	1	1	3,57	3,42	3,49
ИРН на 4-х транзисторах и 18-и диодах (рисунок 4, в)	$0,375/0,375 = 1$	$0,455/0,535 = 0,85$	$0,658/0,715 = 0,92$	$4VT/4VT = 1$	1	1	4	3,85	3,92

На основании проведенной оценки сделан вывод о том, что рациональной по энергетическим и технико-экономическим показателям силовой схемой для УПП является схема ИРН рисунка 4, в, которую целесообразно использовать при создании УПП с управлением АД в переходных процессах по экспоненциальному закону изменения *первой гармоники* напряжения и реализацией режима КЧУ АД для обеспечения точной остановки ЭП с постоянным реактивным статическим моментом, например, ЭП кранового механизма передвижения.

Также из анализа результатов имитационного моделирования режимов плавного пуска АД механизмов передвижения тележек мостовых кранов грузоподъемностью 20 и 50т в программе Matlab было установлено, что использование УПП на основе ИРН рисунка 4, в с экспоненциальным законом изменения *первой гармоники* питающего напряжения позволяет обеспечить линейное ускорение и угол отклонения груза от вертикали при разгоне механизма в допустимых пределах и ниже соответствующих величин при линейном законе.

**В четвертой главе** рассмотрен вопрос обеспечения точной остановки механизмов передвижения кранов при плавном пуске и торможении.

Установлено, что в разомкнутых по положению системах асинхронных ЭП крановых механизмов передвижения, к которым не предъявляются высокие требования к точности остановки, для обеспечения устойчивой пониженной скорости работы рационально применять КЧУ АД, при котором подводимое к АД напряжение представляет собой серию положительных и отрицательных полувольт напряжения питающей сети, получающихся в результате модуляции

напряжения каждой фазы сети некоторой знакопеременной переключающей функцией.

Предложено, в качестве альтернативы серийному тиристорному УПП, для реализации КЧУ с целью получения устойчивой пониженной скорости ЭП кранового механизма передвижения на основе АД с короткозамкнутым ротором использовать УПП с ИРН рисунка 4, в. В режиме КЧУ основные транзисторы  $VT1-VT3$  ключей  $S_1-S_3$  фаз А, В и С такого ИРН соответственно пропускают ток для положительной и отрицательной полуволн питающего напряжения каждой фазы, при этом каждая полуволна формируется всего лишь из одного импульса напряжения. Когда один или несколько основных силовых ключей  $S_1-S_3$  выключены, трехфазный диодный мост с однонаправленным транзистором  $VT4$  ключа  $S_4$  шунтирует нагрузку, что позволяет току в силовой цепи уменьшиться до нуля.

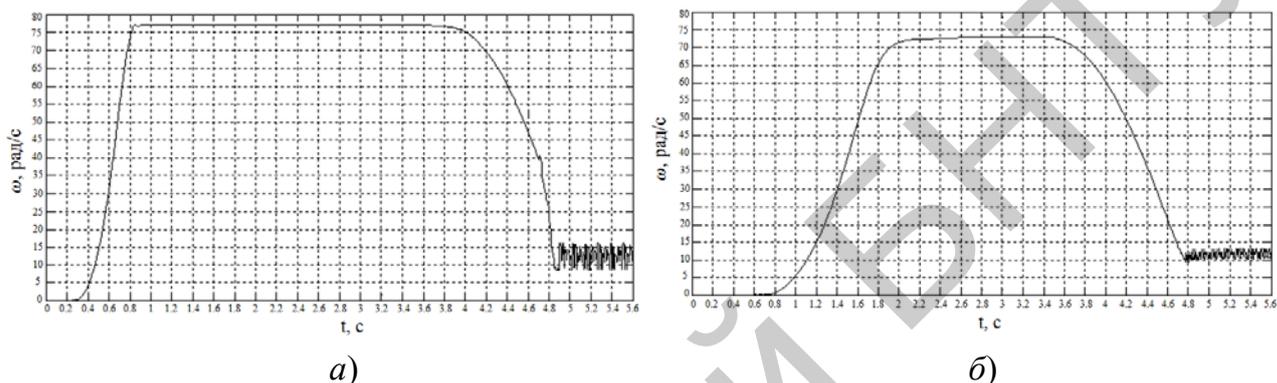
Для стабильной работы АД на пониженной скорости при КЧУ с помощью ИРН, также как и в случае с ТРН, важно поддерживать магнитный поток двигателя примерно на одном и том же уровне. Чтобы получить для определенной пониженной частоты  $f_{\text{квази}}$  при КЧУ АД необходимый магнитный поток, величина первой гармоники питающего напряжения задается соответствующим углом начала включения основных транзисторов  $\gamma_0$ .

По результатам имитационного моделирования был выполнен анализ и сравнение электромагнитных, электромеханических, энергетических и тепловых процессов в крановых АД типа 4МТКФ160LB8 (11кВт) при КЧУ ( $f_{\text{квази}}=8,33\text{Гц}$ ) с помощью ТРН и ИРН, при разном моменте инерции ЭП и разной нагрузке на валу ( $M_c = 0,3M_{\text{ном}}$  и  $M_c = M_{\text{ном}}$ ).

Установлено, что с увеличением момента инерции ЭП и нагрузки на валу АД до номинальной колебания пониженной скорости в режиме КЧУ существенно уменьшаются по амплитуде относительно среднего установившегося значения (на 67% при управлении АД от ТРН и на 77% при использовании ИРН вместо ТРН). А так как реальные ЭП крановых механизмов передвижения с номинальным грузом имеют коэффициенты инерции  $K_j \geq 10$ , колебания пониженной скорости в режиме КЧУ, тем более при управлении АД в этом режиме от УПП на основе ИРН, будут небольшие.

Также показано, что реализация КЧУ АД с помощью ИРН рисунка 4, в позволяет уменьшить в режиме номинальной нагрузки, по сравнению с КЧУ с помощью ТРН, пульсации тока (на 20%), момента (на 19%) и колебания пониженной скорости (на 30%) по амплитуде относительно среднего установившегося значения, а также потери электроэнергии (на 18%) и, соответственно, нагрев обмоток статора АД в данном режиме.

Полные скоростные диаграммы кранового АД типа 4МТКФ160LB8 (11кВт) за время плавного пуска с экспоненциальным изменением *первой гармонике* питающего напряжения, плавного торможения по этому же закону с переходом на пониженную скорость работы при КЧУ ( $f_{\text{квaзи}}=8,33\text{Гц}$ ) с помощью ИРН рисунка 4, в, при нагрузке  $M_c = 0,3M_{\text{ном}}$  и  $M_c = M_{\text{ном}}$ , а также коэффициентах инерции ЭП  $K_J = 1,6$  и  $6,3$  (что соответствует механизму передвижения тележки мостового крана грузоподъемностью примерно 15т) соответственно представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Скоростная диаграмма кранового АД типа 4МТКФ160LB8 при  $M_c = 0,3M_{\text{ном}}$ ,  $K_J = 1,6$  (а) и  $M_c = M_{\text{ном}}$ ,  $K_J = 6,3$  (б) с участком пониженной скорости при КЧУ ( $f_{\text{квaзи}} = 8,33\text{Гц}$ ) с помощью ИРН рисунка 4, в**

**В пятой главе** представлены и подробно описаны использованные в процессе исследований математические и разработанные автором имитационные модели систем плавного пуска и торможения кранового асинхронного ЭП на основе ТРН и ИРН.

Представлена и описана имитационная модель системы «ТРН-АД», доработанная автором в программе Matlab, которая отличается от уже существующих моделей тем, что позволяет рассчитать переходные процессы, гармонический состав кривых выходного напряжения и тока, коэффициенты искажения синусоидальности выходных кривых напряжения и тока, коэффициент мощности входной цепи, а также суммарные потери электроэнергии в АД (роторе, статоре и стали) при линейном и экспоненциальном законах изменения амплитуды *первой гармонике* питающего напряжения во время плавного пуска и торможения ЭП с постоянным реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов передвижения.

Модернизирована дополнительными расчетными блоками существующая имитационная модель системы «ИРН-АД» с силовой схемой на шести силовых ключах; впервые разработаны в программе Matlab имитационные модели систем «ИРН-АД» с силовыми схемами на четырех, пяти и трех силовых ключах с трехфазным шунтирующим диодным мостом и однонаправленным

транзистором, а также с силовой схемой рисунка 4, в, позволяющие рассчитать переходные процессы, гармонический состав кривых выходного напряжения и тока, коэффициенты искажения синусоидальности выходных кривых напряжения и тока, коэффициент мощности входной цепи, суммарные потери электроэнергии в АД (роторе, статоре и стали) при линейном и экспоненциальном законах изменения амплитуды *первой гармоники* питающего напряжения во время плавного пуска и торможения ЭП с постоянным реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов передвижения.

Дополнительно для имитационной модели системы «ТРН-АД» и впервые для имитационной модели системы «ИРН-АД», выполненной по схеме рисунка 4, в, в программе Matlab разработаны специальные блоки, позволяющие реализовать алгоритм КЧУ АД на пониженной скорости для обеспечения точной остановки ЭП с постоянным реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП кранового механизма передвижения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Показана возможность и целесообразность управления АД с короткозамкнутым ротором в пускотормозных режимах с помощью УПП по определенному закону изменения амплитуды *первой гармоники* питающего напряжения, а не действующего значения фактического несинусоидального напряжения [5, 19, 27].

2. Показаны электромеханические и энергетические преимущества экспоненциального закона изменения амплитуды *первой гармоники* напряжения АД по сравнению с линейным при его использовании для плавного пуска и торможения асинхронных ЭП. При этом при задании длительности изменения амплитуды *первой гармоники* напряжения  $t_0 = (2 - 3)t_n$ , где  $t_n$  – время прямого пуска ЭП, применение экспоненциального закона в отличие от линейного незначительно уменьшает допустимое число включений АД в час по сравнению с режимом прямого пуска и торможения противовключением, обеспечивая при этом безударный пуск и торможение ЭП, работающих в повторно-кратковременном режиме с постоянным реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов передвижения, а также температуру нагрева обмоток статора АД ниже предельно допустимого значения для своего класса изоляции [1, 5, 8, 21, 24, 25, 27].

3. Впервые разработан алгоритм расчета и построения кривой изменения *первой гармоники* питающего напряжения по требуемому закону в функции

угла управления тиристорами УПП на основе ТРН с помощью специальных имитационных блоков в модели системы «ТРН-АД» в программе Matlab, позволяющий автоматизировать расчет значений первой гармоники напряжения [19].

4. Выявлена линейная зависимость *первой гармоники* выходного напряжения ИРН от скважности управляющих импульсов транзисторов, что позволяет получить требуемый закон изменения амплитуды *первой гармоники* питающего АД напряжения в переходных процессах заданием аналогичного закона изменения скважности при определенной частоте коммутации ключей без использования специальных вычислительных средств для предварительных расчетов, как в случае с ТРН [19].

5. Обоснована целесообразность использования в УПП транзисторных регуляторов напряжения с импульсным регулированием, отличающихся от применяемых в настоящее время тиристорных регуляторов с фазовым управлением тем, что позволяют значительно упростить алгоритм управления АД по первой гармонике напряжения, улучшить гармонический состав кривой питающего напряжения АД, исключить фазовый сдвиг *первой гармоники* этого напряжения и уменьшить потери электроэнергии в АД во время пускотормозных режимов [2, 3, 4, 5, 19, 20, 26].

6. Впервые разработаны имитационные модели для УПП с тиристорным и транзисторными регуляторами напряжения (на основе симметричных и несимметричных силовых схем) с управлением по *первой гармонике* напряжения и КЧУ, позволяющие проводить численные эксперименты с различными АД с короткозамкнутым ротором для получения значений электрических (токов, напряжений), электромеханических (момента, скорости) и энергетических (потерь электроэнергии в АД, коэффициента мощности) величин, а также гармонического состава и коэффициентов искажения синусоидальности кривых выходного напряжения и тока этих УПП в пускотормозных режимах на этапах проектирования, ввода в эксплуатацию и наладки систем плавного пуска и торможения асинхронных ЭП с реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов передвижения [4, 5, 6, 7, 26, 28].

7. Впервые предложена в качестве рациональной (по обобщающему критерию оценки энергетических и технико-экономических показателей) для использования в УПП ЭП крановых механизмов передвижения схема ИРН, содержащая 4 транзистора и 18 диодов, позволяющая осуществлять регулирование напряжения АД по экспоненциальному закону изменения *первой гармоники* напряжения и реализовать режим КЧУ АД [5].

8. Показано, что применение экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения АД с помощью УПП на основе ИРН с предложенной

рациональной силовой схемой позволяет обеспечить при разгоне кранового механизма передвижения угол отклонения груза, подвешенного на тросе, от вертикали в допустимых пределах и ниже соответствующей величины при линейном законе [5].

9. Доказано электромеханическое и энергетическое преимущество реализации КЧУ АД на пониженной скорости с помощью системы «ИРН-АД» (на основе предложенной рациональной силовой схемы) по сравнению с системой «ТРН-АД» в ЭП механизмов с постоянным реактивным статическим моментом на валу, например, ЭП крановых механизмов передвижения, для обеспечения их точной остановки [23].

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

Результаты диссертационных исследований могут быть рекомендованы для предприятий и организаций, занимающихся проектированием ЭП крановых механизмов передвижения. Разработанные и модернизированные имитационные модели систем «ТРН-АД» и «ИРН-АД» для плавного пуска и торможения ЭП с постоянным реактивным статическим моментом на валу позволяют упростить и ускорить процесс проектирования систем ЭП крановых механизмов передвижения до начала этапа разработки опытного образца.

Получены акты о практическом использовании результатов диссертационных исследований (Приложение Д диссертации) в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ, а также в ООО «Институт горной электротехники и автоматизации» (г. Солигорск), где результаты диссертации используются при проектировании, вводе в эксплуатацию и наладке систем плавного пуска и торможения асинхронных ЭП.

В качестве перспективы дальнейшего развития научного направления в области исследований данной работы можно рассматривать более глубокое изучение вопроса уменьшения колебаний груза в крановых механизмах передвижения с гибким подвесом, в виду того, что разработанная система плавного пуска и торможения на основе «ИРН-АД» позволяет лишь ограничить эти колебания ниже предельно допустимых значений. Также в перспективе следует рассматривать внедрение результатов данных исследований в серийное производство УПП на основе ТРН и ИРН с управлением АД по *первой гармонике* напряжения и функцией КЧУ для точной остановки ЭП с постоянным реактивным статическим моментом на валу, т.к. в настоящее время подобные устройства на рынке электрооборудования стран СНГ отсутствуют.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи

1. Васильев, Д.С. Исследование электромеханических процессов при прямом пуске и торможении асинхронных двигателей с учетом переменных параметров и сравнение их с плавным пуском и торможением / Д.С. Васильев // Вестник Кременчугского государственного университета имени Михаила Остроградского. – 2010. – № 4. – С. 43 – 49.

2. Васильев, Д.С. Плавный пуск и торможение асинхронного электродвигателя с импульсным регулятором напряжения / Д.С. Васильев, Б.И. Фираго // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» науч.-техн. журнала «Электроинформ». – 2009. – С. 109–111.

3. Фираго, Б.И. Плавный пуск и плавное торможение асинхронных короткозамкнутых двигателей / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев // Главный энергетик. – 2008. – №2. – С. 20–27.

4. Фираго, Б.И. Применение мягкого пуска, торможения и работы на пониженной скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для механизмов передвижения кранов / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев // Энергетика: известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 3. – С. 15 – 23.

5. Фираго, Б.И. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №4. – С. 30–38.

6. Firago, Bronislaw. Application of pulse voltage control for softstarting and braking of induction motors (*Применение импульсного регулирования напряжения для плавного пуска и торможения асинхронных двигателей*) / Bronislaw Firago, Dmitry Vasilyev, Leszek Pawlaczyk // Prace Naukowe / Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. – Wrocław, 2008. – Nr. 62: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. – S. 378–386.

7. Firago, Bronislaw. Soft starter with pulse voltage regulation and quasi-frequency control of induction motor (*Устройство плавного пуска с импульсным регулированием напряжения и функцией квазичастотного управления асинхронным двигателем*) / Bronislaw Firago, Dmitry Vasilyev // Prace Naukowe / Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. – Wrocław, 2009. – Nr. 63: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. – S. 294–302.

8. Firago, Bronislaw. Soft starting and braking application for squirrel-cage induction motors operating in intermittent duty (*Применение плавного пуска и торможения для асинхронных короткозамкнутых двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме*) / Bronislaw Firago, Dmitry Vasilyev // Prace Naukowe / Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. – Wrocław, 2012. – Nr. 66: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. – S. 339–349.

### **Материалы конференций**

9. Васильев, Д.С. Импульсный регулятор напряжения на полностью управляемых силовых ключах / Д.С. Васильев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы XII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 16–18 марта 2009г.: в 2ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О.М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2009. – Ч.1. – С. 76–77.

10. Васильев, Д.С. Исследование мягкого пуска и торможения асинхронных электродвигателей при импульсном регулировании напряжения / Д.С. Васильев, Б.И. Фираго // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2008г.: в 3т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2008. – Т.1. – С. 117.

11. Васильев, Д.С. Исследование особенностей мягкого пуска асинхронного двигателя / Д.С. Васильев // НИРС–2004: тез. докл. IX Респ. науч. конф. студентов и аспирантов Республики Беларусь, Гродно, май 2004г.: в 8 ч. / ГрГУ им. Я. Купалы; ред.: А.И. Жук. – Гродно, 2004. – Ч.3. – С. 6–7.

12. Васильев, Д.С. Исследование особенностей мягкого пуска и торможения асинхронных электроприводов / Д.С. Васильев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы X Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 12–14 марта 2007 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: Д.Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 129–130.

13. Васильев, Д.С. Исследование плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с квазичастотным управлением на пониженной скорости для кранового электропривода / Д.С. Васильев, Б.И. Фираго // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 октября 2009 г. / БГТУ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – С. 177–180.

14. Васильев, Д.С. Исследование электромеханических процессов в асинхронных короткозамкнутых двигателях при прямом пуске и торможении с учетом переменных параметров / Д.С. Васильев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф.,

Минск, 2011г.: в 4т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т.1. – С. 190.

15. Васильев, Д.С. Методы формирования импульсной кривой регулятора напряжения / Д.С. Васильев, Б.И. Фираго // Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация: к 90-летию со дня рождения академика Е.А. Барбашина: тез. докладов Междунар. конф., Минск, 29 сентября – 4 октября 2008 г. / Институт математики НАН Беларуси; редкол.: И.В. Гайшун [и др.]. – Минск, 2008. – С. 64–66.

16. Васильев, Д.С. Моделирование режима мягкого пуска асинхронного двигателя / Д.С. Васильев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 22–24 марта 2004 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: Д.Г. Лин [и др.]. – Гомель, 2004. – С. 85–86.

17. Васильев, Д.С. Моделирование режимов мягкого пуска и торможения асинхронных электродвигателей при импульсном регулировании напряжения / Д.С. Васильев // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы XI Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 17–19 марта 2008 г.: в 2ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О.М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2008. – Ч.1. – С. 65–66.

18. Васильев, Д.С. Особенности импульсного регулирования напряжения в процессах плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей / Д.С. Васильев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2009г.: в 3т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – Т.1. – С. 130.

19. Васильев, Д.С. Плавный пуск и торможение асинхронного двигателя изменением величины первой гармоники питающего напряжения по определенному закону / Д.С. Васильев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апреля 2012г. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2012. – С. 64 – 65.

20. Васильев, Д.С. Применение импульсных регуляторов напряжения с функцией квазичастотного управления в электроприводах механизмов передвижения кранов / Д.С. Васильев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2012г.: в 4т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2012. – Т.1. – С. 227.

21. Васильев, Д.С. Применение плавного пуска и торможения для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, работающих в повторно-кратковременном режиме / Д.С. Васильев // Автоматизация

технологических процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 марта 2011 г. / БНТУ; редкол.: Г.Н. Здор (гл. ред.), А.Н. Дербан, Р.В. Новичихин. – Минск: Бизнесофсет, 2011. – С. 80 – 81.

22. Васильев, Д.С. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения / Д.С. Васильев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2010г.: в 4т. /БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – Т.1. – С. 195.

23. Васильев, Д.С. Реализация квазичастотного управления асинхронным двигателем на пониженной скорости для электроприводов крановых механизмов передвижения с помощью фазового и импульсного регуляторов напряжения / Д.С. Васильев // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы II междунар. научн.-практ. конф., Минск, 13–14 марта 2013 г. / БНТУ; редкол.: Хрусталеv Б.М. [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2013. – С. 69 – 70.

24. Фираго, Б.И. Применение мягкого пуска и торможения для асинхронных короткозамкнутых двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев, Л. Павлячик // Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 октября 2004 г. / БГТУ; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2004. – С. 221–227.

25. Фираго, Б.И. Регулирование напряжения асинхронного двигателя импульсными методами для мягкого пуска и торможения / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев, Лешек Павлячик // Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 ноября 2007 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М.Жарский [и др.]. – Минск, 2007. – С. 213–220.

26. Vasilyev, Dmitry. Comparison of pulse voltage regulator power circuits applied for soft starting and braking of crane travel mechanisms (*Сравнение силовых схем импульсных регуляторов напряжения для плавного пуска и торможения крановых механизмов передвижения*) / Dmitry Vasilyev // OWD 2011: proceedings of XIII International PhD Workshop, Gliwice–Wisla, Poland, October 22–25, 2011 / Silesian University of Technology; ed.: Grzegorz Klapueta. – Gliwice, 2011. – P. 370 – 375.

27. Vasilyev, Dmitry. Electromechanical characteristics, energy losses and heating of a squirrel cage induction motor controlled with the first voltage harmonic magnitude (*Электромеханические характеристики, потери энергии и нагрев асинхронного короткозамкнутого двигателя, управляемого по амплитуде первой гармоники напряжения*) / Dmitry Vasilyev // OWD 2010: proceedings of

XII International PhD Workshop, Gliwice–Wisla, Poland, October 23–26, 2010 / Silesian University of Technology; ed.: Grzegorz Klaputa. – Gliwice, 2010. – P. 163 – 168.

28. Vasilyev, Dmitry. Some aspects of pulse voltage regulation for induction motor soft starting and braking in electric drives of crane travel mechanisms (*Особенности импульсного регулирования напряжения для плавного пуска и торможения асинхронных двигателей в электроприводах крановых механизмов передвижения*) / Dmitry Vasilyev // OWD 2009: proceedings of XI International PhD Workshop, Gliwice–Wisla, Poland, October 17–20, 2009 / Silesian University of Technology; ed.: Grzegorz Klaputa. – Gliwice, 2009. – P. 403–408.

## РЭЗІЮМЭ

Васільеў Дзмітрый Сяргеевіч

### Плыўны пуск і тармажэнне электрапрыводаў кранавых механізмаў перамяшчэння

**Ключавыя словы:** асінхронны рухавік з каротказамкнутым ротарам, прылада плыўнага пуску і тармажэння, першая гармоніка напругі, лінейны і экспанентны закон, тырыстарны і імпульсны рэгулятар напружання, квазічастотнае кіраванне, кранавы механізм перамяшчэння.

**Мэта працы** – абгрунтаванне магчымасці і мэтазгоднасці прымянення прылад плыўнага пуску і тармажэння (ПППТ) ў электрапрыводах (ЭП) кранавых механізмаў перамяшчэння з асінхроннымі рухавікамі (АР).

**Метады даследавання** заснаваны на выкарыстанні матэматычных метадаў, тэорыі ЭП і пераўтваральнай тэхнікі, а таксама лікавых эксперыментаў з дапамогай імітацыйнага мадэлявання.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны спосаб кіравання АР з каротказамкнутым ротарам з дапамогай ПППТ па *першай гармоніцы* напружання. Паказаны перавагі прымянення ў ПППТ экспанентнага закона змены амплітуды *першай гармонікі* напружання ў параўнанні з лінейным законам, што забяспечвае лепшыя электрамеханічныя уласцівасці і энергетычныя паказчыкі ЭП. Выяўлены энергетычныя перавагі выкарыстання ПППТ на аснове імпульснага (транзістарнага) рэгулятара напружання (ІРН) ў параўнанні з тырыстарным рэгулятарам напружання (ТРН). Распрацаваны імітацыйныя мадэлі ПППТ на аснове ТРН і ІРН з кіраваннем АР па *першай гармоніцы* напружання і квазічастотным кіраваннем (КЧК), якія дазваляюць праводзіць лікавыя эксперыменты з рознымі АР на этапах праектавання і наладкі ЭП кранавых механізмаў перамяшчэння. Упершыню прапанавана і абгрунтавана рацыянальная сілавая схема ПППТ на аснове ІРН з ужываннем экспанентнага закона змены *першай гармонікі* напружання і КЧК АР на паніжанай хуткасці для выкарыстання ў ЭП кранавых механізмаў перамяшчэння.

**Вынікі працы** выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры «Электрапрывод і аўтаматызацыя прамысловых устаноў і тэхналагічных комплексаў» БНТУ, а таксама ў аддзеле электрапрывода ТАА «Інстытут горнай электратэхнікі і аўтаматызацыі» (г. Салігорск) пры праектаванні і наладцы сістэм плыўнага пуску і тармажэння асінхронных ЭП.

**Галіна прымянення** атрыманых у дысертацыі вынікаў – ЭП кранавых механізмаў перамяшчэння.

## РЕЗЮМЕ

Васильев Дмитрий Сергеевич

### Плавный пуск и торможение электроприводов крановых механизмов передвижения

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, устройство плавного пуска и торможения, первая гармоника напряжения, линейный и экспоненциальный закон, тиристорный и импульсный регулятор напряжения, квазичастотное управление, крановый механизм передвижения.

**Цель работы** – обоснование возможности и целесообразности применения устройств плавного пуска и торможения (УПП) в электроприводах (ЭП) крановых механизмов передвижения с асинхронными двигателями (АД).

**Методы исследования** основаны на использовании математических методов, теории ЭП и преобразовательной техники, а также численных экспериментов с помощью имитационного моделирования.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан способ управления АД с короткозамкнутым ротором с помощью УПП по *первой гармонике* напряжения. Показаны преимущества применения в УПП экспоненциального закона изменения амплитуды *первой гармоники* напряжения по сравнению с линейным, как обеспечивающего лучшие электромеханические свойства и энергетические показатели ЭП. Выявлены энергетические преимущества использования УПП на основе импульсного (транзисторного) регулятора напряжения (ИРН) по сравнению с тиристорным регулятором напряжения (ТРН). Разработаны имитационные модели УПП на основе ТРН и ИРН с управлением АД по *первой гармонике* напряжения и квазичастотным управлением (КЧУ), позволяющие проводить численные эксперименты с различными АД на этапах проектирования и наладки ЭП крановых механизмов передвижения. Впервые предложена и обоснована рациональная силовая схема УПП на основе ИРН с использованием экспоненциального закона изменения *первой гармоники* напряжения и КЧУ АД на пониженной скорости для использования в ЭП крановых механизмов передвижения.

**Результаты работы** используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ, а также в отделе электропривода ООО «Институт горной электротехники и автоматизации» (г. Солигорск) при проектировании и наладке систем плавного пуска и торможения асинхронных ЭП.

**Область применения** полученных в диссертации результатов – ЭП крановых механизмов передвижения.

# SUMMARY

Vasilyev Dmitry

## Soft Starting and Braking of Crane Travel Mechanisms Electric Drives

**Keywords:** squirrel-cage induction motor, soft starting and braking device, first voltage harmonic, linear and exponential law, thyristor and pulse voltage regulator, quasi-frequency control, crane travel mechanism.

**Purpose of the work** is to prove the possibility and justify the rationality of soft starting and braking devices (SSBD) application in crane travel mechanisms electric drives (ED) with induction motors (IM).

**Research methods** are based on the use of mathematical methods, theory of ED and semiconductor converters as well as numerical experiments by means of simulation.

**Obtained results and their novelty.** A control method of squirrel-cage IM by means of SSBD with allow for the *first voltage harmonic* has been introduced. Advantages of an exponential *first voltage harmonic* amplitude changing law application in the SSBD, providing better electromechanical properties and energy parameters of ED in comparison with the linear law, have been shown. Energy efficiency benefits of the use of SSBD based on pulse (transistor) voltage regulator (PVR) compared with the thyristor voltage regulator (TVR) have been defined. Simulation models of SSBD based on TVR and PVR with the *first voltage harmonic* control and quasi-frequency control (QFC) of IM, allowing the conduction of numerical experiments with various IM during the design and commissioning of crane travel mechanisms ED, have been developed. For the first time rational power circuit of SSBD based on PVR, with allow for the exponential *first voltage harmonic* changing and QFC of IM at slow speeds for the use in crane travel mechanisms ED, has been introduced and justified.

**The results of work** are used during the teaching process at the Chair of Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes at BNTU and in the electric drive department of «Institute of Mining Electrical Engineering and Automation» Ltd (Soligorsk) during the design and commissioning of soft starting and braking systems of induction motor ED.

**Application field** of the obtained results in the thesis are crane travel mechanisms ED.