

На правах рукописи



**БЕГЛЯРОВ Рафаэль Рубенович**

**СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ  
МОБИЛЬНЫХ МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСОВ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

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

Краснодар – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Стрижков Игорь Григорьевич**

Официальные оппоненты: **Коробейников Борис Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный  
технологический университет», заведующий  
кафедрой «Электроснабжения промышленных  
предприятий» (г. Краснодар)

**Лебедев Константин Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
Азово-Черноморский инженерный институт  
ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграр-  
ный университет», доцент кафедры «Информа-  
ционные технологии и управляющие системы»  
(г. Зерноград)

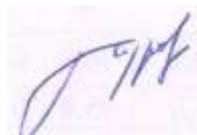
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ставропольский государствен-  
ный аграрный университет» (г. Ставрополь)

Защита состоится «15» октября 2015 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета энергетики, ауд. № 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан «\_\_» сентября 2015 года и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak2.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВПО Кубанского ГАУ <http://kubsau.ru/>

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
Курасов Владимир Станиславович



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** По условиям ведения сельскохозяйственного производства практически все регионы России относятся к зоне неустойчивого увлажнения, характерной особенностью которой является недостаток естественных осадков. Вместе с тем, значительные площади земель не пригодны к земледелию вследствие переувлажнения (болотистые, плавневые, подтопленные и др.). Применение искусственного орошения и осушения земель является высокоэффективным средством развития сельскохозяйственного производства.

В 2012 году в Российской Федерации имелось 6,1 млн. га орошаемых и 5,1 млн. га осушенных земель. Мелиорируемые земли, занимая 5% земельных угодий, давали до 15% валового производства продукции растениеводства. За счет орошаемых земель в ряде регионов Северного Кавказа, Поволжья и Сибири была решена проблема производства кормов для животноводства. В стоимостном выражении отдача мелиорируемого гектара была в 1,5-4 раза выше, чем богарного. Вместе с тем, орошаемое земледелие в России находится в кризисном состоянии. Выходу из него способствовали бы предложения по усовершенствованию оборудования насосных установок, снижению их стоимости и эксплуатационных расходов. Особенно эффективным является снижение затрат на оплату электроэнергии или дизельного топлива насосных установок.

Особенностью Краснодарского края является наличие в районах традиционного орошаемого земледелия развитой сети линий электропередачи специального мелиоративного назначения. Созданные в 70-80 гг. прошлого века, в период максимального использования орошения в сельскохозяйственном производстве, электрические сети обслуживали сеть оросительных и сбросных насосных станций, главным образом стационарных. Большинство этих станций в последующие годы пришли в негодность; их восстановление требует больших капитальных затрат. Электрические сети при этом находятся в рабочем состоянии или требуют малых затрат на восстановление. Использование этих сетей и

мобильных насосов позволит ускорить возрождение отрасли и снизить капиталовложения за счет использования имеющегося ресурса.

В диссертации содержатся предложения по усовершенствованию электропривода мобильных мелиоративных насосов и приводятся результаты исследований предложенного привода.

Работа выполнена по плану НИР Кубанского ГАУ ГР 01.2006.06851, раздел 27.1.4 (2006-2010 гг.); ГР 01.2011.53641, раздел 27.1.4 (2011-2015 гг.).

**Степень разработанности темы.** Для проведения гидромелиоративных работ в сельскохозяйственном производстве используются стационарные и мобильные насосные установки с преимущественно асинхронным приводом, недостатком которого являются относительно невысокие энергетические показатели. Современный синхронный привод насосов отличается высокой сложностью конструкции и эксплуатации.

Необходимость разработки новых конструкций синхронного привода обусловлена стремлением повысить энергетические показатели и упростить эксплуатацию электропривода.

**Научная гипотеза.** Снизить эксплуатационные затраты на проведение сельхозмелиоративных работ с применением мобильных насосов можно применением синхронного электропривода при снижении стоимости и повышении КПД его электрооборудования.

**Цель исследования** – обосновать рациональный комплекс электрооборудования мобильных насосных установок мелиоративного назначения для сельскохозяйственных районов с развитыми электрическими сетями 10 кВ, уменьшающий потребление и потери электроэнергии для снижения себестоимости сельхозмелиоративных работ.

**Объект исследования** – силовой блок «трансформатор-синхронный двигатель» на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой (далее «трансформатор-СДДЯ»).

**Предмет исследования** – электромагнитные процессы и режимы работы СДДЯ и трансформатора в составе электротехнического комплекса мобильной

насосной установки; потери и энергетические показатели электропривода на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой.

**Задачи исследования:**

1. Дать количественную оценку составляющих потерь электроэнергии при электроснабжении мобильной мелиоративной насосной станции при использовании синхронного и асинхронного приводов насосов и определить эффективность мер по снижению потерь электроэнергии.

2. Предложить рациональный электропривод мобильных мелиоративных насосов.

3. Разработать математическую модель статических режимов блока «трансформатор-СДДЯ», адаптированную к использованию программы «MatLab», для определения переменных величин электрооборудования насоса.

4. Провести экспериментальные исследования электромагнитных и электромеханических процессов при пуске насоса и установить закономерности распределения токов в обмотках трансформатора и СДДЯ.

5. Определить область целесообразного применения указанных блоков взамен серийных приводов с трансформатором и асинхронным короткозамкнутым двигателем.

**Методы исследования.** Используются теория электромеханического преобразования энергии, математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в машинно-вентильной системе с использованием программного комплекса «Matlab», экспериментальные исследования статических и динамических электромагнитных и электромеханических процессов СДДЯ, функционально-стоимостный анализ электрооборудования мобильной мелиоративной насосной установки.

**Научную новизну работы составляют:**

1. Предложения по усовершенствованию конструкции электропривода мелиоративных насосов, направленные на снижение потерь и потребление электроэнергии при эксплуатации;

2. Обоснование метода моделирования блока «трансформатор-СДДЯ», включая обоснование рациональной системы относительных единиц в математическом описании электрооборудования блоков;

3. Математическая модель блока «трансформатор-СДДЯ» на основании системы уравнений статического режима в ортогональных  $d, q$  координатах;

4. Результаты анализа режимов работы выпрямителя в составе СДДЯ;

5. Закономерности распределения токов в обмотках трансформатора и двигателя в эксплуатационных режимах и их влияние на потери электроэнергии в блоке «трансформатор-СДДЯ».

### **Практическая значимость.**

1. Установлена возможность снижения потерь электрической мощности при работе электрифицированной мелиоративной мобильной насосной установки применением специализированного электропривода насосов на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой.

2. Предложена конструктивная схема электропривода мобильной мелиоративной насосной установки, позволяющая снизить потери мощности, уменьшить габариты и стоимость электропривода в сравнении с серийным синхронным приводом насосов.

3. Получены соотношения составляющих потерь мощности при работе электрифицированной мелиоративной мобильной насосной установки, позволяющие установить эффективность разработки нового электропривода на стадии проектирования.

4. Получены выводы о характере электрических и магнитных процессов при пуске и установившемся режиме электропривода на базе блока «трансформатор-СДДЯ», подтверждающие устойчивость работы оборудования и снижение потерь мощности в электроприводе и питающей сети.

5. Определена величина чистого дисконтированного дохода для мобильной электрифицированной насосной установки мощностью 200 кВт для условий электроснабжения и эксплуатации, характерных для Краснодарского края.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель статического режима блока «трансформатор-СДДЯ».
2. Результаты экспериментального исследования электромагнитных и электромеханических процессов в блоке «трансформатор-СДДЯ» в режимах пуска насосного оборудования.
3. Математическое описание электромагнитных процессов в блоке «трансформатор-СДДЯ» в динамических режимах.
4. Обоснование схемы замещения выпрямителя в составе СДДЯ в математическом описании электрооборудования.
5. Выявленные соотношения потерь мощности в электроприводе и питающей сети при работе электрифицированного мобильного насоса с синхронным двигателем серийного производства и с приводом на базе блока «трансформатор-СДДЯ».
6. Расчеты чистого дисконтированного дохода для случая применения электропривода мобильного мелиоративного насоса на базе блока «трансформатор-СДДЯ».

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований реализованы в экспериментальных образцах электропривода мобильных мелиоративных насосов. Электропривод 200 кВт внедрен на орошаемых виноградниках агрофирмы «Мысхако» (г. Новороссийск). Электропривод 4,5 кВт используется в лабораторном оборудовании учебного процесса на факультете энергетики Кубанского ГАУ. Методика проектирования предложенного оборудования используется в ОАО «Новороссийский электроремонтный завод».

**Апробация работы.** Основные положения и выводы диссертации доложены и одобрены на ежегодных научных конференциях Кубанского ГАУ 2007-2014 гг., на Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых «Научное обеспечение АПК» 2008-2013 гг. (г. Краснодар), Международных научных конференциях «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки», 2007-2013 гг. (г. Краснодар), Межвузовских региональных конфе-

ренциях «Электромеханические преобразователи энергии» 2008-2010 гг. (г. Краснодар), на ежегодных научных конференциях Кубанского социально-экономического института 2010-2012 гг. (г. Краснодар).

**Публикация результатов исследований.** Основные положения диссертации опубликованы в 18 печатных работах, включая три патента РФ на изобретения и четыре работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 120 наименований, в том числе 4 – на иностранных языках и приложений. Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста, включая 3 страницы приложения, содержит 20 рисунков, 30 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулирована цель работы, научная новизна, практическая значимость и представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены состояние и перспективы развития водохозяйственного и агропромышленного комплексов Краснодарского края, применяемые способы и технические средства искусственного орошения и осушения сельскохозяйственных земель. Сделан вывод о том, что возрождению и дальнейшему развитию орошаемого земледелия может способствовать расширенное использование мобильных электрифицированных насосных установок. Повышению их эффективности способствует то обстоятельство, что в Краснодарском крае в 70-80 гг. прошлого века созданы электрические сети напряжения 10 кВ сельхозмелиоративного назначения, мало загруженные или не используемые в настоящее время.

Приведены основные показатели эффективности мелиоративных насосных станций согласно Ведомственным строительным нормам (ВСН 33), а также



технические показатели используемых в сельхозмелиорации мобильных насосных установок российского производства.

Представлена классификация электропривода мелиоративных насосов, на основании которой сделан вывод об актуальности совершенствования электрооборудования синхронного электропривода для снижения эксплуатационных и капитальных затрат на эти установки. Сделан вывод о перспективности использования в качестве привода насосов блоков «трансформатор-СДДЯ» как альтернативы современным серийным блокам с асинхронным и синхронным приводами. От серийного асинхронного привода его отличают более высокие энергетические показатели, определяющие уменьшение потерь мощности как в самом приводе, так и в питающей сети, а от серийного синхронного отличает отсутствие вынесенного за габариты электродвигателя возбуждательного устройства, что снижает стоимость, габариты и потери мощности привода.

Проблемам исследования синхронного электропривода насосов и других турбомеханизмов посвящены работы академика И.А. Глебова, С.И. Логинова, А.И. Лищенко, И.А. Сыромятникова и др. По вопросам применения синхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве публикуются работы представителями научных школ Кубанского ГАУ, Челябинского ГАУ и др.

Блоки «трансформатор-СДДЯ» могут иметь различные варианты конструкции. Из наиболее целесообразных для применения в приводе мобильных насосов проанализированы три схемы, представленные на рисунке 1.

Сравнительный анализ выявил, что лучшими показателями по стоимости оборудования и простоты конструкции обладает схема на рисунке 1.б, которая принята для исследования.

В главе приведены результаты расчетов составляющих потерь мощности на примере одного из фермерских хозяйств Краснодарского края, где показано (таблица 1), что снижение потерь для насосной установки 200 кВт может составлять 3,1 кВт, что эффективно при большом числе часов использования оборудования.

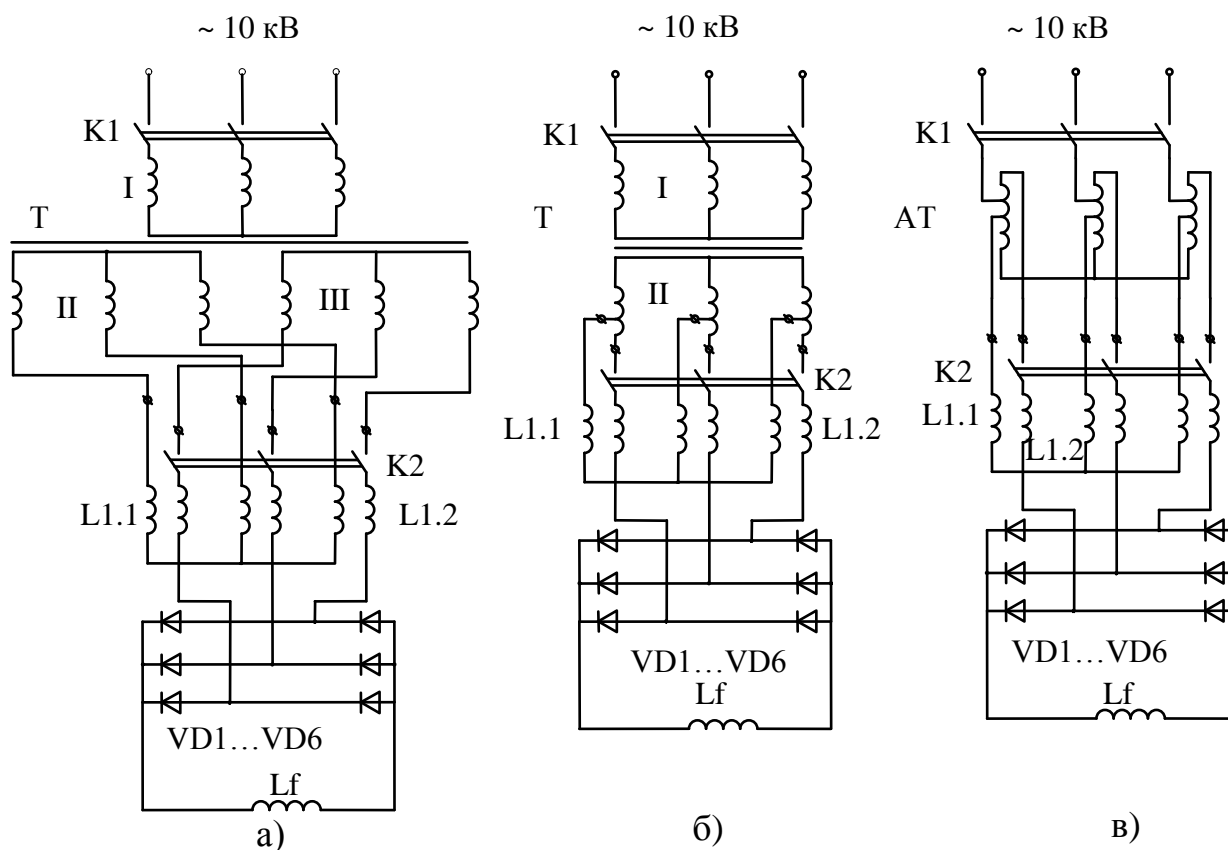


Рисунок 1 – Блоки «трансформатор-СДДЯ»: а) с трехобмоточным трансформатором; б) с трансформатором с отпайками; в) с автотрансформатором.

Таблица 1 – Расчетные значения потерь мощности в электрооборудовании при работе насосной станции 200 кВт

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi_n$	$S_{\text{расч}}$ , кВА	$I_{\text{расч}}^*$ , А	$\Delta P_d$ , кВт	$\Delta P_t$ , кВт	$\Delta P_{\text{вл}}$ , кВт/км	$\Sigma \Delta P^{**}$ , кВт
АД	200	94	0,89	239	13,8	12,76	9,94	1,0	32,7
СД	200	93,4	1,0	214	12,3	14,13	9,0	0,8	31,1
СДДЯ	200	94	1,0	213	12,2	12,76	8,95	0,79	29,6

Примечание: \* - расчетный ток на стороне 10 кВ;

\*\* - длина линии 10 км.

На основании материалов главы сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** на основании современной теории обобщенного преобразователя энергии представлено отдельное математическое описание электрооборудования привода насосов, адаптированное к задаче математического моделирования в компьютерной среде программ «Matlab-Simulink». Математи-

ческое описание содержит уравнения равновесия напряжений электрических цепей трансформатора и электродвигателя, входящих в состав блока «трансформатор-СДДЯ» и уравнение движения привода насоса.

Приводятся теоретические основы для математического описания нетрадиционного синхронного электропривода насосов, анализ и выбор используемых для описания электромагнитных и электромеханических процессов методы представления уравнений синхронной машины и трансформатора в известных системах неподвижных  $a, b, c$  координат и в системе  $d, q$  координат, жестко связанных с вращающимся ротором.

Рассматриваемый двигатель представляет собой машинно-вентильную систему с разветвленной схемой электрической цепи якорной обмотки и трансформатора. В математическом описании возможные режимы проводимости выпрямительного моста учитываются в уравнениях электрических цепей переменных структур, зависящих от состояния проводимости каждого вентиля.

При анализе устройства установлено, что в нормальных (неаварийных) условиях работы электропривода мостовой выпрямитель работает в режиме проводимости группами по 3-4 вентиля. Этот редко встречающийся на практике режим обусловлен большим индуктивным сопротивлением в анодной цепи, которое представляют индуктивные сопротивления обмоток трансформатора и проходной обмотки СДДЯ, и относительно малым сопротивлением нагрузки, которое составляет сопротивление постоянному току обмотки возбуждения.

Связь действующего значения по первой гармонике тока на входе  $I$  и выходе  $I_f$  выпрямителя устанавливается уравнением

$$I = \frac{I_f}{1,36} - \frac{1,11\gamma_1 E_m}{x_{s2}} (1 - \cos \gamma_1), \quad (1)$$

где  $\gamma_1$  – угол одновременной коммутации двух вентилях;  $E_m$  – амплитуда результирующей ЭДС проходной статорной обмотки;  $x_{s2}$  – расчетное индуктивное сопротивление проходной статорной обмотки.

Суммарные потери в выпрямителе и нагрузке, приходящиеся на одну фазу, определяются уравнением

$$P_{\phi} = P_a + P_f + P_{\text{вен}} = r_1 I^2 + \frac{1}{3} r_f k_i^2 I^2 + \frac{2}{3} k_i U_0 I + \frac{2}{9} k_{\phi}^2 k_i^2 r_e I^2. \quad (2)$$

где  $P_a$ ,  $P_f$ ,  $P_{\text{вен}}$  – мощность потерь соответственно в анодной цепи, обмотке возбуждения и в вентилях;  $r_1$ ,  $r_f$ ,  $r_e$  – активное сопротивление соответственно проходной статорной обмотки, обмотки возбуждения и открытого вентиля;  $k_i$  – коэффициент выпрямления по току мостового выпрямителя;  $k_{\phi} = 1,8$  – коэффициент формы;  $U_0$  – постоянное пороговое напряжение вентиля.

Таким образом, в каждой фазе схемы замещения представлено эквивалентное активное сопротивление (рисунок 2.8)

$$r_s = r_1 + \frac{1}{3} k_i^2 r_f + \frac{2}{9} k_{\phi}^2 k_i^2 r_e \quad (3)$$

и противоЭДС, определяемая выражением

$$e_{np} = \frac{2}{3} k_{\phi} U_0. \quad (4)$$

Угол сдвига первой гармоники тока относительно ЭДС питающей системы  $\varphi$  приближенно определяется равенством

$$\varphi \approx \frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} = \frac{\pi}{3} + \frac{\gamma_1}{2}. \quad (5)$$

Реактивное сопротивление мостового выпрямителя с нагрузкой можно определить по формуле

$$x_s = r_{\text{рез}} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\gamma_1}{2}\right) - x_{s2}, \quad (6)$$

где  $r_{\text{рез}}$  – результирующее сопротивление цепи «проходная статорная обмотка - вентильный мост - обмотка возбуждения».

В работе рассмотрены уравнения СДДЯ и трансформатора в фазных  $a$ ,  $b$ ,  $c$  координатах и в преобразованных  $d$ ,  $q$  координатах, жестко связанных с ротором, более удобных для решения и моделирования.

**В третьей главе** приводится общее математическое описание и математическая модель блока «трансформатор-СДДЯ» при совместном применении уравнений и представлении их в единой системе относительных единиц.

Математическое описание трансформатора составляется на основании известной теории трансформаторов и дополняется уравнениями электрических

контуров, возникающих с появлением дополнительных выводов вторичной обмотки. Трансформатор наиболее удобно рассматривать как трехобмоточный, с первичной обмоткой, присоединенной к источнику питания, и двумя вторичными обмотками: 1-1 обтекаемой током  $i = i_1 + i_2$  в каждой фазе и 1-2, обтекаемой током  $i_2$ . В этом случае уравнения напряжения могут быть представлены системой уравнений для фазы «А»:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ -u_{a1} \\ -u_{a12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_A + \frac{d}{dt} L_1 & \frac{d}{dt} M_{A1} & \frac{d}{dt} M_{A2} \\ \frac{d}{dt} M_{1A} & r_2 + \frac{d}{dt} L_2 & \frac{d}{dt} M_{12} \\ \frac{d}{dt} M_{2A} & \frac{d}{dt} M_{21} & r_3 + \frac{d}{dt} L_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_{a1} + i_{a2} \\ i_{a2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

При математическом описании синхронных машин широко применяются системы относительных единиц, упрощающих сравнительный анализ машин разной конструкции и мощности. В случае анализа процессов в блоках из трансформатора и двигателя целесообразно использовать единую систему базисных величин. При этом система уравнений математического описания блока имеет вид (формула 8).

В установившихся режимах уравнения равновесия напряжений и уравнение движения можно рассматривать отдельно. Первичное напряжение трансформатора  $U_1$  принято постоянным, не зависящим от режима нагрузки двигателя.

На основании системы уравнений динамического режима работы при использовании известных преобразований составлена система уравнений статического режима. В электрических контурах демпферной (пусковой) обмотки электромагнитные процессы не протекают, поскольку ЭДС в этих обмотках по осям d и q не наводятся и токи равны нулю. С учетом этих обстоятельств, получим (формула 9).

$$\begin{aligned}
u_d &= -U_m \sin \gamma; & u_q &= U_m \cos \gamma; \\
\psi_{d1} &= x_{d1} i_{d1} + x_{d2} i_{d2} + x_{df} i_f + x_{dyd} i_{yd}; \\
\psi_{d2} &= x_{d2} i_{d1} + x_{d1} i_{d2} + x_{df} i_f + x_{dyd} i_{yd}; \\
\psi_f &= x_{d1} (i_{d1} + i_{d2}) + x_f i_f + x_{fyd} i_{yd}; \\
\psi_{yd} &= x_{d1yd} (i_{d1} + i_{d2}) + x_{fyd} i_f + x_{ydyd} i_{yd}, & \psi_{q1} &= x_{q1} i_{q1} + x_{q2} i_{q2} + x_{qyq} i_{yq}; \\
\psi_{q2} &= x_{q2} i_{q1} + x_{q1} i_{q2} + x_{qyq} i_{yq}, & \psi_{yq} &= x_{qyq} (i_{q1} + i_{q2}) + x_{yq} i_{yq}. \\
u_d &= r_1 i_d + L \frac{di_d}{dt} + M_1 \frac{di_{d1}}{dt} + M_2 \frac{di_{d2}}{dt}; \\
u_{d1} &= r_2 i_{d1} + L_1 \frac{di_{d1}}{dt} + M_1 \frac{di_d}{dt} + M_3 \frac{di_{d2}}{dt}; \\
u_{d2} &= r_3 i_{d2} + L_1 \frac{di_{d2}}{dt} + M_2 \frac{di_d}{dt} + M_3 \frac{di_{d1}}{dt}; \\
u_{q2} &= r_1 i_q + L \frac{di_q}{dt} + M_1 \frac{di_{q1}}{dt} + M_2 \frac{di_{q2}}{dt}; \\
u_{q1} &= r_2 i_{q1} + L_1 \frac{di_{q1}}{dt} + M_1 \frac{di_q}{dt} + M_3 \frac{di_{q2}}{dt}; \\
u_{q2} &= r_3 i_{q2} + L_1 \frac{di_{q2}}{dt} + M_2 \frac{di_q}{dt} + M_3 \frac{di_{q1}}{dt}. \\
\frac{d\psi_{d1}}{dt} &= u_{d1} - r_1 i_{d1} + \omega \psi_{q1}; & \frac{d\psi_{q1}}{dt} &= u_{q1} - r_1 i_{q1} - \omega \psi_{d1}; \\
\frac{d\psi_{d2}}{dt} &= u_{d2} - (r_2 + r_f) i_{d2} + x_f i_{q2} + \omega \psi_{q2} - \frac{i_{d2} \cos \varphi_f - i_{q2} \sin \varphi_f}{\beta_r i_f} \frac{d\psi_f}{dt}; \\
\frac{d\psi_{q2}}{dt} &= u_{q2} - (r_2 + r_f) i_{q2} - x_f i_{d2} - \omega \psi_{d2} - \frac{i_{d2} \sin \varphi_f - i_{q2} \cos \varphi_f}{\beta_r i_f} \frac{d\psi_f}{dt}; \\
\frac{d\psi_{yd}}{dt} &= -r_{yd} i_{yd}; & \frac{d\psi_{yq}}{dt} &= -r_{yq} i_{yq}; & \frac{d\gamma}{dt} &= \omega; & \beta_r &= \beta_u / \beta_i; \\
\frac{d\omega}{dt} &= (\psi_{d1} i_{q1} - \psi_{q1} i_{d1} + \psi_{d2} i_{q2} - \psi_{q2} i_{d2} - m_c) / J.
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= r_2 I_{d1} - \Psi_{q1} = -U_1 \sin \Theta; & U_{d2} &= r_3 I_{d2} - \Psi_{q1} = -U_2 \sin \Theta; \\
 U_{q1} &= R_2 I_{q1} + \Psi_{d1} = U_1 \cos \Theta; & U_{q2} &= R_2 I_{q2} + \Psi_{d2} = U_2 \cos \Theta; \\
 \Psi_{d1} &= x_{d1} I_{d1} + x_{d3} I_{d2} + x_{d1f} I_f; & \Psi_{d2} &= x_{d3} I_{d1} + x_{d2} I_{d2} + x_{d1f} I_f; \\
 \Psi_{q1} &= x_{q1} I_{q1} + x_{q3} I_{q2}; & \Psi_{q2} &= x_{q3} I_{q1} + x_{q2} I_{q2}; & I_f &= \beta_i \sqrt{I_{d2}^2 + I_{q2}^2}; \\
 U_2 &= k_t U_1; & M &= \Psi_{d1} I_{q1} + \Psi_{d2} I_{q1} - \Psi_{q1} I_{d1} - \Psi_{q2} I_{d2}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В уравнениях (9) параметры двигателя имеют следующую интерпретацию:  $R_2 = r_2 + r_b$  – суммарное активное сопротивление проходной статорной обмотки, мостового выпрямителя и обмотки возбуждения (т.е. электрического контура проходной обмотки);  $x_{d2} = x_{d1} + x_b$  – суммарное индуктивное сопротивление проходной статорной обмотки, мостового выпрямителя и обмотки возбуждения по координате  $d$ ;  $x_{q2} = x_{q1} + x_b$  – суммарное индуктивное сопротивление проходной статорной обмотки, мостового выпрямителя и обмотки возбуждения по координате  $q$ ;  $k_t$  – соотношение вторичных напряжений трансформатора при холостом ходе.

Система уравнений (9) является нелинейной, поскольку содержит нелинейные уравнения момента и тока возбуждения и не имеет стандартных методов решения. Целесообразной является разработка частного алгоритма её решения методами математического моделирования. В настоящее время прикладное моделирование предлагает различные формы и компьютерные среды моделирования электромеханических систем. Для исследования блока «трансформатор-СДДЯ» наиболее целесообразно применение среды «Matlab-Simulink».

Модель в среде «Matlab-Simulink» составлена по дифференциальным уравнениям математического описания электромагнитных и электромеханических процессов в синхронной машине и трансформаторе. Модель применима для исследования этих процессов в мгновенных значениях переменных величин.

Математическая модель блока «трансформатор-СДДЯ» представлена на основании уравнений статического режима (9) представлена на рисунке 2.





дящейся в переменном электрическом поле; потери механические, включающие потери на трение вращающихся частей и мощность, затрачиваемую на вентиляцию. Установлено, что изменение в соотношении составляющих потерь касается главным образом потерь на возбуждение. Показано, что потери магнитные, механические, добавочные практически не изменяются у СДДЯ в сравнении с серийными СД.

Электрические потери определяются значениями токов в якорных обмотках. Характеристики  $I = f(M)$ , полученные с помощью математической модели статического режима, представлены на рисунке 3. Сопоставление экспериментальных данных по лабораторной модели с данными математической модели по рисунку 3 в диапазоне момента от 0 до 1,5 о.е. выявило отклонение токов, не превышающее 5 %.

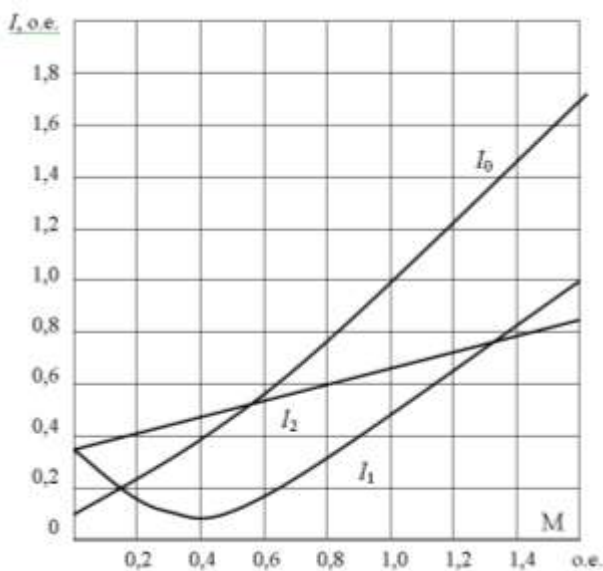


Рисунок 3 - Изменение токов якорных обмоток и обмоток трансформатора в функции электромагнитного момента:  $I_0$  – первичной обмотки трансформатора,  $I_1$  и  $I_2$  – вторичных обмоток трансформатора и якорных двигателя

Потери в возбудителе зависят от его конструкции и для серийного возбудителя приводятся в его паспортных данных. Для двигателя СД 2 применяется тиристорный возбудитель марки ТВУ-315/48Т с паспортным КПД 91,4 % и номинальной активной мощностью 15,1 кВт. Потери в возбудителе в номинальном режиме составляют 1,42 кВт. Основными потерями в возбудителе являются потери в трансформаторе и в управляемом выпрямителе. При этом преобладают первые.



На рисунке 5 представлена осциллограмма тока в первичной обмотке трансформатора при прямом пуске двигателя (без устройств уменьшения пускового тока).

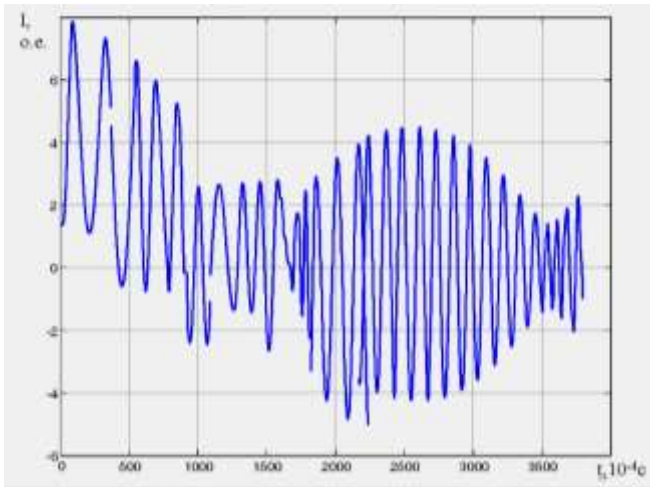


Рисунок 5 – Осциллограмма тока первичной обмотки трансформатора

Произведен расчет экономической эффективности электропривода с блоком «трансформатор-СДДЯ». Снижение стоимости электрооборудования составляет 322,5 тыс. руб., что обусловлено исключением из конструкции привода устройства возбуждения синхронного двигателя и пускового реактора. Чистый дисконтированный доход от снижения стоимости привода и эксплуатационных расходов составляет 1357,3 тыс. руб.

## Заключение

### Итоги выполненного исследования

1. Эффективным средством снижения эксплуатационных затрат при проведении сельхозмелиоративных работ с применением мобильных насосных станций является использования насосов с электроприводом на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой.

2. Потери в электрической сети при питании мобильного электронасоса 200 кВт могут составлять 33 % от суммарных потерь электроэнергии при использовании асинхронного привода и могут быть снижены на 6 % от суммарных потерь при использовании синхронного двигателя. Снижение потерь достигается главным образом за счет увеличения коэффициента мощности электропривода.

3. В приводе мелиоративных мобильных насосов целесообразно использовать блок «трансформатор-синхронный двигатель» на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой конструкции КубГАУ. Блок позволяет снизить стоимость и габариты электропривода по сравнению с серийными двигателями с тиристорным возбудителем. Анализ составляющих потерь мощности в блоке «трансформатор-СДДЯ» и в блоке «трансформатор-СД» с серийным электрооборудованием показывает, что исключение из конструкции СДДЯ отдельного возбудителя снижает потери мощности на 10 % от потерь в номинальном режиме. Для двигателей 200 кВт снижение мощности потерь в блоке составляет 1,28 кВт.

4. Для электропривода 200 кВт и выше целесообразно применение предложенного электропривода с СДДЯ взамен серийных блоков с асинхронным короткозамкнутым двигателем при годовом числе часов использования 1000 часов и более.

5. Наиболее целесообразным для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в блоке «трансформатор-СДДЯ» в статическом режиме является построение математической модели в среде Matlab-Simulink с использованием представленной в работе системы уравнений в системе  $d, q$  координат, жестко связанных с индуктором.

6. Наиболее целесообразным для исследования электромагнитных и электромеханических переходных процессов в блоке «трансформатор-СДДЯ» является построение математической модели на базе дифференциальных уравнений равновесия напряжений, уравнений токов и уравнения движения привода. Целесообразными системами координат для описания процессов в схеме с явнополюсным СДДЯ являются трехфазные неподвижные  $a, b, c$  - координаты и ортогональные  $d, q$  - координаты, жестко связанные с индуктором.

7. Экспериментальными исследованиями установлено, что асинхронный пуск электродвигателя блока «трансформатор-СДДЯ» происходит устойчиво при кратностях токов в статорной обмотке на уровне токов серийных двигателей.

8. Анализ экономических показателей электропривода мобильного мелиоративного насоса на базе блока «трансформатор-СДДЯ» показывает, что чистый дисконтированный доход при его применении может составлять 1,35 млн руб.

### **Рекомендации производству и перспективы дальнейшей разработки темы**

Разработанная конструктивная схема и методика расчета параметров и переменных величин электропривода мобильных мелиоративных насосов может быть использована проектными и конструкторскими организациями при создании аналогичных мобильных насосов.

Для дальнейшего развития темы целесообразно исследовать возможность применения регулируемого электропривода насосов на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

##### **- в изданиях из перечня ВАК:**

1. Бегляров Р.Р. Моделирование выпрямителя в системах возбуждения специальных синхронных двигателей / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк, Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков // Труды Кубанского гос. агр. ун-та (Научный журнал). – 2012. - № 5(38). – С. 155-159.
2. Бегляров Р.Р. Способ и устройство защиты синхронного двигателя от аварийного торможения / И.Г. Стрижков, А.Н. Трубин, Р.Р. Бегляров // Труды Кубанского гос. агр. ун-та (Научный журнал). – 2010. - № (22). - С. 161-164.
3. Бегляров Р.Р. Математическая модель синхронного привода передвижных оросительных насосных установок / И.Г. Стрижков, А.Н. Трубин, Р.Р. Бегляров // Труды Кубанского гос. агр. ун-та (Научный журнал). – 2010. - № 1(22). - С. 165-168.
4. Бегляров Р.Р. Электропривод оросительного насоса на базе синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров // Труды Кубанского гос. агр. ун-та (Научный журнал). – 2009. - № 1(16). - С. 197-199.

**- в прочих изданиях:**

5. Бегляров Р.Р. Снижение потерь энергии в электроприводе мобильных насосов / Р.Р. Бегляров, И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. Краснодар: 2011. - № 1-3 (6-8). - С. 71-74.
6. Бегляров Р.Р. Электропривод мобильных мелиоративных насосов с синхронным двигателем с двойной якорной обмоткой / Р.Р. Бегляров // Технические и технологические системы. Матер. 2-й междунар. науч. конф. ТТС-10. - Краснодар: КВВАУЛ, 2010. - С. 236-240.
7. Бегляров Р.Р. Сравнительная экономическая эффективность синхронного и асинхронного приводов мобильных мелиоративных насосов / Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков // Университет: наука, идеи и решения (Научный журнал). – 2010. - № 2. – Краснодар: Изд-во Крон. - С.176-179.
8. Бегляров Р.Р. Защита синхронных электродвигателей от аварийных режимов работы / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. Краснодар: 2010. - № 1-2 (4-5).
9. Бегляров Р.Р. Электропривод мобильных мелиоративных насосов с синхронным двигателем с двойной якорной обмоткой / Р.Р. Бегляров // Технические и технологические системы. Матер. 2-й междунар. науч. конф. ТТС-10. - Краснодар: КВВАУЛ. - 2010. - С. 236-240.
10. Бегляров Р.Р. Особенности синхронизации синхронного двигателя с двойной якорной обмоткой / Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков // Университет: наука, идеи и решения (Научный журнал). – 2010. - № 1. – Краснодар: Изд-во Крон. - С. 122-123.
11. Бегляров Р.Р. Математическое описание динамических режимов блока «Трансформатор-синхронный двигатель» / И.Г. Стрижков, А.Н. Трубин, Р.Р. Бегляров, Е.Е. Хорьков // Электроэнергетические комплексы и системы: Сб. научных статей. Под общ. ред. проф. Б.А. Коробейникова, Кубан. гос. технол. ун-т.- Краснодар: Изд-во КубГТУ, - 2009. - С. 114-117.

12. Beglyarov R.R. Rectifier modelling in excitation systems of special synchronous motors / I.G. Strizhkov, E.N. Chesnyuk, R.R. Beglyarov, S.I. Strizhkov //Kybernetik@Verlag, Hannover: 2013. - № 10. ISSN 2190-4146, 10, 2013 - Англ.

**- патенты на изобретение:**

13. Пат. 2457609 С1, Российская Федерация, МПК H02P 1/46, H02P 25/30, Блок трансформатор-бесконтактный синхронный двигатель [Текст] / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров, В.Н. Загнитко, С.И. Стрижков, А.Н. Трубин, (РФ); заявитель и патентообладатель Кубанский ГАУ.- 2008117742/07; заявл. 04.05.2008; опубл. 27.07.2012; Бюл. № 21. - 6 с.

14. Пат. 2396692 С1, Российская Федерация, МПК H02P 1/50, H02P 19/12, Устройство пуска синхронного двигателя [Текст] / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков, А.Н. Трубин, (РФ); заявитель и патентообладатель Кубанский ГАУ. - 2008150318/09; заяв. 18.12.2008; опубл. 10.08.2010 Бюл. № 22. - 5 с.

15. Пат. 2354035 С1, Российская Федерация, МПК H02P 1/50, H02P 19/12, Блок трансформатор-синхронный двигатель [Текст] / И.Г. Стрижков, Р.Р. Бегляров, С.И. Стрижков, А.Н. Трубин, (РФ); заявитель и патентообладатель Кубанский ГАУ. - 2008110248/09; заяв. 17.03.2008; опуб. 27.04.2009; Бюл. № 12. - 6 с.