На правах рукописи

Дидыч Виктор Александрович

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ МЕЛИОРАТИВНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С РАЗРАБОТКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Краснодар, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВПО «Кубанский ГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Оськин Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: Григораш Олег Владимирович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»

Лебедев Константин Николаевич кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы» ФГБОУ ВПО «Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Управление «Кубаньмелиоводхоз» (г. Краснодар)

Защита состоится «29» ноября 2013 в 14^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, КубГАУ, главный учебный корпус, ауд.106.

Автореферат разослан «28» октября 2013 г. 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 В. С. Курасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в России осушается 4788,4 тыс. га. земель, используемых для нужд сельского хозяйства. В рамках Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия к первому уровню приоритетов государственной политики в сфере развития производственного потенциала относится мелиорация земель сельскохозяйственного назначения, введение в оборот неиспользуемой пашни и других категорий сельскохозяйственных угодий.

В мелиоративной системе Краснодарского края 77 крупных насосных станции, которые относятся к наиболее энергопотребляемому оборудованию. Проблема повышения энергетической эффективности работы таких станций является очень актуальной.

Вопросам повышения энергоэффективности функционирования электропривода насосных агрегатов занимались такие ученые как: Соколов М.М., Юньков М.Г., Онищенко Г.Б., Николаев В.Г., Емельянов А.П., Васильев Б.Ю., Ильинский Н.Ф., Муравлев О.П., Гоппе Г.Г. и др.

Совершенствованием станций управления асинхронными электроприводами насосных агрегатов занимались Лебедев К. Н., Комелин А.В., Матыцин Д.В и др.

Улучшением эксплуатационных характеристик преобразователей частоты занимались Григораш О.В., Глинкин М. Е., Трубецкой В. А., Дарьенков А. Б. и др.

Несмотря на большое количество способов и средств регулирования производительности мелиоративных насосов, они продолжают работают в неоптимальном режиме с точки зрения энергоэффективности.

Работа выполнена в рамках плана НИР Кубанского ГАУ по госбюджетной тематике 2006 – 2010 гг. (ГР 01.2.00606851), 2011 – 2015 гг. (ГР 01.2.01153641) и технического задания департамента сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края на 2011 – 2012 гг. (№32 – 2011) на выполнение научно – исследовательской работы «Разработка научно обоснованных методов и программного комплекса оптимизации работы электроустановок на сельскохозяйственных предприятиях Краснодарского края».

Научная гипотеза – при комплексном анализе работы всех составляющих электропривода и насосного агрегата: турбомеханизм, электродвигатель, преобразователь частоты, система разворота лопастей – можно получить зону оптимальных режимов работы данной электроустановки.

Цель работы – теоретическое обоснование оптимальных режимов работы мелиоративных насосных агрегатов с разработкой автоматизированной системы управления для реализации энергосберегающих алгоритмов регулирования производительности.

Задачи исследования:

1. Получить целевую функцию оптимизации режимов работы электропривода и насосного агрегата.

2. Установить функциональные зависимости КПД от режимных параметров для основных элементов рассматриваемой системы «электропривод - насосный агрегат».

3. Разработать математические модели КПД электропривода и насосного агрегата с учетом и без учета магистрали и определить оптимальный режим для обоих случаев.

4. Установить рациональный способ управления для частотного преобразователя.

5. Подтвердить теоретические исследования с использованием фактических данных, полученных на конкретной насосной станции, и с помощью компьютерного моделирования.

6. Разработать функциональную схему и алгоритм работы системы управления мелиоративной насосной станцией.

7. Определить изменение энергетической эффективности насосной станции и экономический эффект от внедрения предлагаемых мероприятий.

Объект исследования – способы регулирования производительности насосных агрегатов, электропривода насосных агрегатов, насосные станции, уровни воды в аванкамере и напорном бассейне.

Предмет исследований – закономерности изменения КПД, характеристики и параметры составляющих элементов электропривода насосного агрегата.

Методики исследования – методы системного анализа, математического и компьютерного моделирования, элементы математической статистики. Моделирование производилось с помощью программного комплекса MatLAB.

Научная новизна работы:

– целевая функция оптимизации режима работы, связывающая коэффициент полезного действия системы «электропривод – насосный агрегат» с КПД отдельных его элементов и их параметрами, что позволяет установить оптимальные значения частоты вращения, угла разворота лопастей рабочего колеса насоса;

– математическая модель системы «электропривод – насосный агрегат» без учета КПД магистрали, на основе ее анализа установлено, что максимум всех КПД элементов системы лежат в интервале по относительной производительности от 0,8 до 1,2; также определено – при относительной частоте тока, равной 0,8, КПД агрегата держится более стабильно при различном угле разворота лопастей;

– математическая модель системы «электропривод – насосный агрегат» с учетом КПД магистрали, из данной модели установлено, что при относительном статическом напоре, близком к единице, уменьшение частоты тока вызывает уменьшение КПД, а при относительном статическом напоре менее 0,8 – увеличение КПД;

– оптимальные соотношения параметров комбинированного способа регулирования производительности насосного агрегата, для поддержания максимально возможного КПД системы «электропривод–насосный агрегат» при различных статических напорах.

Практическая ценность результатов исследования.

1.Установлено преимущество векторного управления частотного преобразователя при малых относительных статических напорах, так при $H_{ст} = 0,3$ и одинаковых значениях частоты и угла разворота со скалярным управлением можно получить КПД агрегата на уровне 0,5, а с векторным управлением до 0,63.

2.Разработаны компьютерные модели системы «насосный агрегат без регулирования производительности – электропривод» и «насосный агрегат с регулированием производительности – электропривод» в среде SIMULINK, позволяю-

щие задавать различные режимы работы, изменять параметры двигателя, насоса, частотного преобразователя, угол установки лопастей рабочего колеса.

3. Разработана функциональная схема автоматизированного управления насосной станции, построенная по идеологии распределенной системы (DCS), позволяющей реализовывать энергоэффективный алгоритм управления насосными агрегатами.

4. Разработана компьютерная программа по определению наиболее энергоэффективного режима работы электропривода насосного агрегата.

На защиту выносятся следующие положения:

– целевая функция оптимизации режима работы, связывающая коэффициент полезного действия системы «электропривод – насосный агрегат» с КПД отдельных его элементов и их параметрами;

– математические модели системы «электропривод – насосный агрегат» без учета и с учетом КПД магистрали;

– рекомендуемые способы регулирования КПД насосного агрегата;

– компьютерные модели системы «электропривод – насосный агрегат»;

– сопоставление теоретических и экспериментальных данных по КПД системы;

– функциональная схема системы автоматизированного управления насосной станцией;

– расчет энергетической и экономической эффективности насосной станции.

Реализация и внедрение результатов исследований.

Исследования проводились при участии ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз», результаты использовались для внедрения при реконструкции насосных станций. Основные положения научных исследований включены в научно-исследовательскую работу по теме: «Разработка научно обоснованных методов и программного комплекса оптимизации работы электроустановок на сельскохозяйственных предприятиях Краснодарского края», выполненную согласно техническому заданию департамента сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края на 2011 – 2012 гг. №32-2011. Результаты

научных исследований применяются в учебном процессе на кафедре «Электрические машины и электропривод» в Кубанском ГАУ (г. Краснодар) при изучении дисциплин «Автоматизированные системы управления технологическими процессами» и «Автоматизированный электропривод».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на IV всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Научное обеспечение агропромышленного комплекса» (г. Краснодар, 2011г.); 73 межвузовской конференции «Университетская наука – региону» (г. Ставрополь, 2009 г.); ежегодных конференциях молодых ученых Кубанского ГАУ (г. Краснодар, 2008-13 гг.).

Публикация результатов работы.

Основные результаты исследований опубликованы в 9 печатных работах, включая 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 монографию, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем публикаций составляет 7,74 печатных листа, из них личный вклад автора 3,44 печатных листа.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованных источников, включающего 80 наименований, в том числе 3 на иностранном языке и приложения. Диссертация изложена на 168 страницах машинописного текста, включая 51 страницу приложения, содержит 32 рисунка, 17 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 мелиоративной системы Краснодарского края, способы регулирования производительности насосных агрегатов, проанализированы энергетические параметры насосной станции.

Мелиоративная система – устройство на осушаемой или осушаемой и орошаемой территории, защищенной от затопления паводковыми (речными) или

морскими водами. Мелиоративные системы устраивают на морских побережьях, в дельтах, в поймах рек, в условиях, когда уровень воды в водоприемнике находится выше или на уровне гипсометрических отметок мелиорируемой территории.

Показатели наличия осушенных земель и состояние осушительных систем в России приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели наличия осушенных земель и состояние осушительных систем в России на 01.01.2012 г.

№ п/п	Федеральные округа	Общая площадь осушаемых земель, тыс. га	в том числе площадь, на которой требуется, тыс. га				
			рекон–струкция	культур–технические работы	ремонт дренажной сети	химические мелиорации	проведение мониторинга земель
1.	Центральный	1395,6	366,0	264,7	243,2	586,0	1395,6
2.	Южный	54,6	14,5	–	5,5	3,8	54,6
3.	Северо–Кавказский	18,1	4,8	–	1,8	1,3	18,1
4.	Приволжский	431,9	113,0	27,7	13,5	55,7	431,9
5.	Уральский	151,1	50,1	11,0	21,5	6,1	151,1
6.	Сибирский	228,1	84,0	41,6	28,2	20,3	228,1
7.	Дальневосточный	661,4	221,9	120,2	80,1	278,3	661,4
8.	Северо–Западный	1847,6	378,3	235,3	288,3	802,7	1847,6
9.	Всего по Российской Федерации	4788,4	1232,1	700,5	682,1	1754,2	4788,4

К настоящему времени мелиоративно-водохозяйственный комплекс Краснодарского края включает:

– четыре крупных противопаводково-ирригационных водохранилища (Краснодарское, Шапсугское, Крюковское, Варнавинское) и ряд более мелких;

– Федоровский и вододелительный Тиховский гидроузлы;

– противопаводковую систему обвалования рек протяженностью более 700 км;

– крупные коллекторы, обеспечивающие сброс вод из нескольких районов

края (Афипский коллектор, Крюковский сбросной канал, Варнавинский сбросной канал, Джерелиевский главный коллектор и др.);

– концевые сбросные сооружения и 77 крупных насосных станций;

– сотни километров мелких (хозяйственного значения) дренажно-сбросных каналов.

При эксплуатации мелиоративных систем основная часть затрат на электроэнергию приходится на насосные станции. Структура затрат при эксплуатации насосной станции показана на рисунке 1.

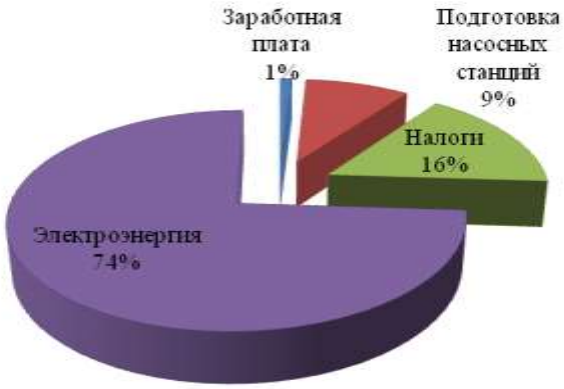

Рисунок 1 – Структура затрат на эксплуатацию насосных станций

Как видно из рисунка, основные затраты на эксплуатацию насосных станций приходятся на оплату потребленной электроэнергии, поэтому основным резервом снижения стоимости подъема воды является повышение энергетической эффективности насосных агрегатов.

В ходе исследований были проанализированы способы регулирования подачи лопастных насосов. Анализ энергетических параметров мелиоративной насосной станции №7 Понуро-Калининской оросительной системы на основании многолетних статистических данных и результатов измерений показал: реальный средний КПД станции $\eta_{ср}$ = 46,5%, что значительно ниже проектного - $\eta_{ном}$ = 80%.

Во второй главе на основе энергетической диаграммы электропривода и насосного агрегата получена целевая функция оптимизации режима работы, связывающая коэффициент полезного действия агрегата с КПД отдельных его элементов и их параметрами.

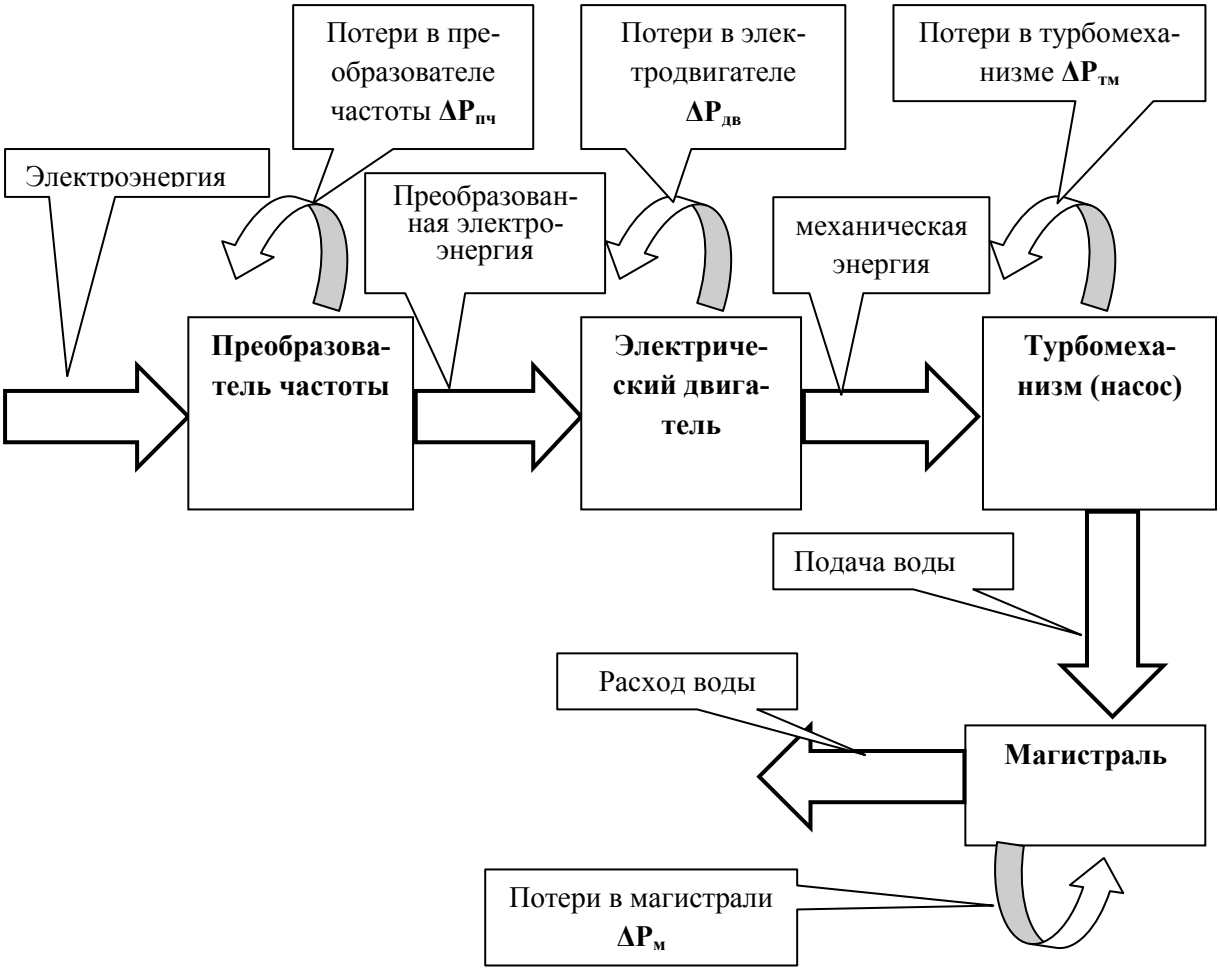

Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма насосного агрегата

В соответствии с энергетической диаграммой (рисунок 2), при передаче энергии от электрической сети к жидкости, движущейся к потребителям, происходят потери в четырех основных элементах: преобразователе частоты $\Delta P_{пч}$, электродвигателе $\Delta P_{дв}$, турбомеханизме $\Delta P_{тм}$, магистрали $\Delta P_{м}$. Энергоэффективность такой системы можно оценить по такому показателю как коэффициент полезного действия (КПД). В каждом элементе данной системы КПД зависит от многих параметров, которые следует изучить и оценить их влияние на значение этого показателя. Так КПД преобразователя частоты $\eta_{пч}$ будет зависеть от конструктивных параметров k_n, частоты тока на выходе f, нагрузке, создаваемой электродвигателем I ($\eta_{пч}$ =f(k_n, f, I)). В свою очередь КПД электродвигателя зависит от параметров самой электрической машины (сопротивлений обмоток, схемы обмотки статора, характеристик стали магнитопровода и т.д.) R_m; нагрузки, создаваемой насосом I; частоты тока, подаваемой на обмотку статора f ($\eta_{эд}$ =f(R_m, f, I). Что касается

турбомеханизма, то на его КПД будет оказывать влияние частота вращения рабочего вала ***n,*** угол разворота лопастей ***α***, производительность ***Q*** и напор ***H*** ($\eta_{тм}$ = f(***n;Q;H; α***)); от характеристики магистрали – производительность $Q_м$, статический напор $H_{ст}$ и скоростной напор H_v – будет зависеть ее КПД ($\eta_м$ =f($Q_м$;$H_{ст}$; H_v)). Анализ КПД отдельных элементов и общего КПД системы позволит найти оптимальные параметры системы и определить энергосберегающие режимы работы:

$$\begin{cases} \eta_{пч} = f(k_n; f; I) \\ \eta_{эд} = f(R_m; f; I) \\ \eta_{TM} = f(n; Q; H; \alpha) \\ \eta_M = f(Q_м; H_{ст}; H_v) \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, через общий КПД агрегата можно выразить целевую функцию оптимизации:

$$\eta_{аг} = \eta_{пч} \cdot \eta_{эд} \cdot \eta_{TM} \cdot \eta_M \Rightarrow max \quad (2)$$

Для того, чтобы получить максимум КПД агрегата, необходимо исследовать энергетические показатели отдельных составляющих рассматриваемой системы.

При работе с электродвигателем у частотного преобразователя наблюдаются потери энергии, которые зависят от электрической нагрузки и выходной частоты тока. В работах Гоппе Г.Г. были получены зависимости КПД частотного преобразователя (ПЧ) от выходной частоты и нагрузки. На основе этих зависимостей нами получены графики изменения КПД устройства при изменении относительной частоты тока (f_i /$f_н$ =f*), с учетом изменения нагрузки (связано с законом регулирования для данного механизма), и аппроксимированы кривыми.

Таким образом, в дальнейшем анализе можно использовать следующую формулу для определения КПД преобразователя частоты:

$$\eta_{пч} = -0{,}76(f^*)^2 + 1{,}326 f^* + 0{,}383, \quad (3)$$

где f^* – относительное изменение частоты тока на выходе преобразователя, $f^* = \frac{f}{f_н}$.

На мелиоративных насосных станциях для привода насосных агрегатов обычно используются асинхронные электродвигатели. Анализ энергопотребления

двигателя можно вести на основе схемы замещения асинхронного электродвигателя и упрощенной векторной диаграммы (рисунок 3).

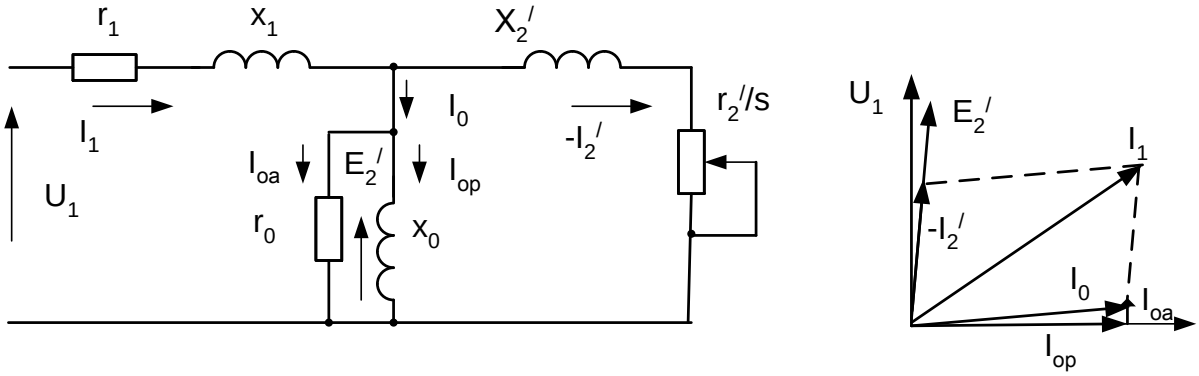

Рисунок 3 – Схема замещения и векторная диаграмма асинхронной машины

На основании схемы замещения и векторной диаграммы (рисунок 3) было получено следующее выражение для определения активной мощности потребляемой из сети:

$$P_1 = P_{эм} + 3(I_1{}^2 r_1 + I_{oa}{}^2 r_0) =$$

$$= M \cdot \omega_0 \left(1 + \frac{r_2{}'(r_1 + r_0)}{r_0{}^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2{}'} + \frac{r_2{}' \cdot r_1}{x_0{}^2 \cdot s} \right), \qquad (4)$$

где M – момент на валу электродвигателя; ω_0 – синхронная угловая скорость; r_1, r_2', r_0 – активные сопротивления соответственно статора, ротора и ветви намагничивания; x_1, x_2', x_0 – индуктивные сопротивления соответственно статора, ротора и ветви намагничивания; I_{0a} – активная составляющая тока холостого хода; U_1 – напряжение на статорной обмотке; I_1 – ток статора; E_2' – приведенная ЭДС ротора; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность.

Определен коэффициент полезного действия электродвигателя:

$$\eta_{эд} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{1 - s}{1 + \frac{r_2{}'(r_1 + r_0)}{r_0{}^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2{}'} + \frac{r_2{}' \cdot r_1}{x_0{}^2 \cdot s}}. \qquad (5)$$

Как видно из формулы (5), КПД электродвигателя зависит от сопротивлений обмоток статора и ротора, а также от скольжения и частоты тока питающей сети.

На рисунке 4 изображена графическая поверхность и сечение зависимости КПД электродвигателя от частоты тока и скольжения.

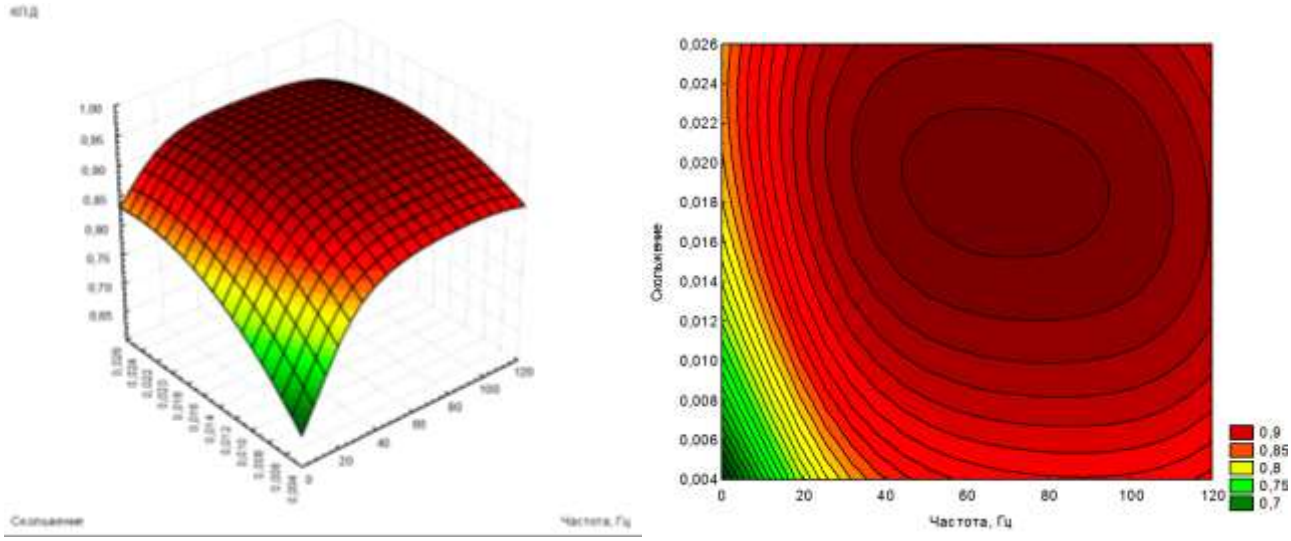

Рисунок 4 – Поверхность и сечение зависимости КПД от частоты тока при различной нагрузке

Известно, что характеристики КПД лопастных насосов от производительности могут быть аппроксимированы параболой вида:

$$\boldsymbol{\eta = DQ^2 + EQ + F} \tag{6}$$

Анализ ***QH***– характеристик насосов типа ОПВ показал, что зависимость КПД от производительности следует аппроксимировать кубической зависимостью, что позволяет выражение (6) представить в виде:

$$\boldsymbol{\eta^* = -5{,}27(q^*)^3 + 11{,}72(q^*)^2 - 7{,}9q^* + 2{,}45} \tag{7}$$

где ***q**** – относительное изменение производительности $\boldsymbol{q^* = \frac{q}{q_н}}$.

В соответствии с выведенными выражениями получена следующая формула для определения КПД насоса при изменении угла разворота лопастей и частоты тока:

$$\eta = \eta_{\max}\left\{\begin{matrix} 0{,}449\left[\alpha^*\left(1{,}25f^* - 0{,}25\right)\right]^4 - 1{,}71\left[\alpha^*\left(1{,}25f^* - 0{,}25\right)\right]^3 + \\ + 2{,}101\left[\alpha^*\left(1{,}25f^* - 0{,}25\right)\right]^2 - 0{,}881\alpha^*\left(1{,}25f^* - 0{,}25\right) + 1{,}034 \end{matrix}\right\}\times$$
$$\times\left[-5{,}27(q^*)^3 + 11{,}72(q^*)^2 - 7{,}9q^* + 2{,}45\right] \tag{8}$$

где α^* – изменение относительного угла разворота лопастей рабочего колеса $\alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha_н}$.

При транспортировании воды по магистрали также возникают потери энергии, связанные со скоростным напором и преодолением статического напора.

Выражение для КПД трубопроводной магистрали имеет вид:

$$\eta_м = \frac{k_v \cdot (q^*)^2 + H^*_{ст}}{k_m \cdot (q^*)^2 + H^*_{ст}}, \qquad (9)$$

где k_v – коэффициент скоростного напора, можно принимать от 0,01 до 0,03; k_m – коэффициент напорной характеристики магистрали; $H^*_{ст}$ – изменение относительного статического напора $H_{ст}^* = \frac{H_{ст}}{H_н}$.

Относительно изменения угла разворота лопастей и частоты тока электродвигателя формула (9) принимает вид:

$$\eta_м = \frac{k_v \cdot \left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}}{(1 - H^*_{ст})\left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}}. \qquad (10)$$

Проанализируем математическую модель системы «электропривод – насосный агрегат» первоначально без учета КПД магистрали. На основе полученных отдельных зависимостей КПД от параметров составляющих элементов можно представить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \eta_{пч} = -0{,}76(f^*)^2 + 1{,}326 f^* + 0{,}383 \\ \eta_{эд} = \dfrac{1 - s}{1 + \dfrac{r_2'(r_1 + r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \dfrac{2 \cdot r_1}{r_0} + \dfrac{r_1 \cdot s}{r_2'} + \dfrac{r_2' \cdot r_1}{x_0^2 \cdot s}} \\ \eta_{ТМ} = \eta_{\max} \left\{ \begin{array}{l} 0{,}449\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^4 - 1{,}71\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^3 + \\ + 2{,}101\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^2 - 0{,}881\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right) + 1{,}034 \end{array} \right\} \times \\ \times \left[-5{,}27(q^*)^3 + 11{,}72(q^*)^2 - 7{,}9 q^* + 2{,}45\right] \end{cases} \qquad (11)$$

Целевая функция принимает вид:

$$\eta_{аг} = \frac{\left[-0{,}76(f^*)^2 + 1{,}326 f^* + 0{,}383\right]\cdot(1 - s_н q^{*3})\cdot\left[\eta_{\max} A_{\alpha f}\cdot B_q\right]}{1 + \frac{r_2'(r_1 + r_0)}{r_0^2\cdot s_н q^{*3}} - \frac{2\cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1\cdot s_н q^{*3}}{r_2'} + \frac{r_2'\cdot r_1}{4\pi^2\cdot(f^*)^2\cdot f_н^2\cdot L^2\cdot s_н q^{*3}}}. \qquad (12)$$

На основе полученных ранее уравнений запишем систему для насосного агрегата с магистралью:

$$\begin{cases} \eta_{пч} = -0{,}76(f^*)^2 + 1{,}326 f^* + 0{,}383 \\ \eta_{эд} = \dfrac{1 - s}{1 + \dfrac{r_2'(r_1 + r_0)}{r_0^2\cdot s} - \dfrac{2\cdot r_1}{r_0} + \dfrac{r_1\cdot s}{r_2'} + \dfrac{r_2'\cdot r_1}{x_0^2\cdot s}} \\ \eta_{ТМ} = \eta_{\max}\left\{\begin{array}{l} 0{,}449\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^4 - 1{,}71\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^3 + \\ + 2{,}101\left[\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right)\right]^2 - 0{,}881\alpha^*\left(1{,}25 f^* - 0{,}25\right) + 1{,}034 \end{array}\right\}\times \\ \times\left[-5{,}27(q^*)^3 + 11{,}72(q^*)^2 - 7{,}9 q^* + 2{,}45\right] \\ \eta_м = \dfrac{k_v\cdot\left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}}{(1 - H^*_{ст})\left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}} \end{cases} \qquad (13)$$

КПД системы «электропривод – насосный агрегат» с магистралью можно выразить следующей функцией:

$$\eta_{аг} = \frac{\left[-0{,}76(f^*)^2 + 1{,}326 f^* + 0{,}383\right]\cdot(1 - s)\cdot\left[\eta_{\max} A_{\alpha f}\cdot B_q\right]\cdot\left\{k_v\cdot\left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}\right\}}{\left[1 + \frac{r_2'(r_1 + r_0)}{r_0^2\cdot s} - \frac{2\cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1\cdot s}{r_2'} + \frac{r_2'\cdot r_1}{4\pi^2\cdot(f^*)^2\cdot f_н^2\cdot L^2\cdot s}\right]\cdot\left\{(1 - H^*_{ст})\left[\alpha^*(1{,}25 f^* - 0{,}25)\right]^2 + H^*_{ст}\right\}} \qquad (14)$$

На рисунках 5 – 6 приведены поверхности и соответствующие сечения зависимостей КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при различных значениях относительного статического напора и векторном управлении (функция поддержания постоянного скольжения).

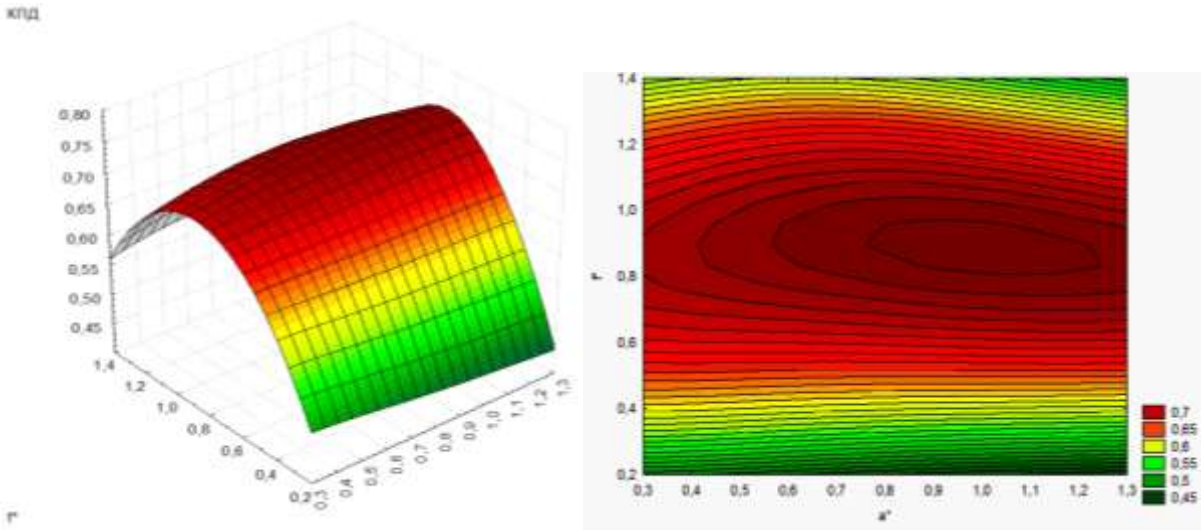

Рисунок 5 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей (векторное управление) при $H_{ст}^{*} = 0{,}95$

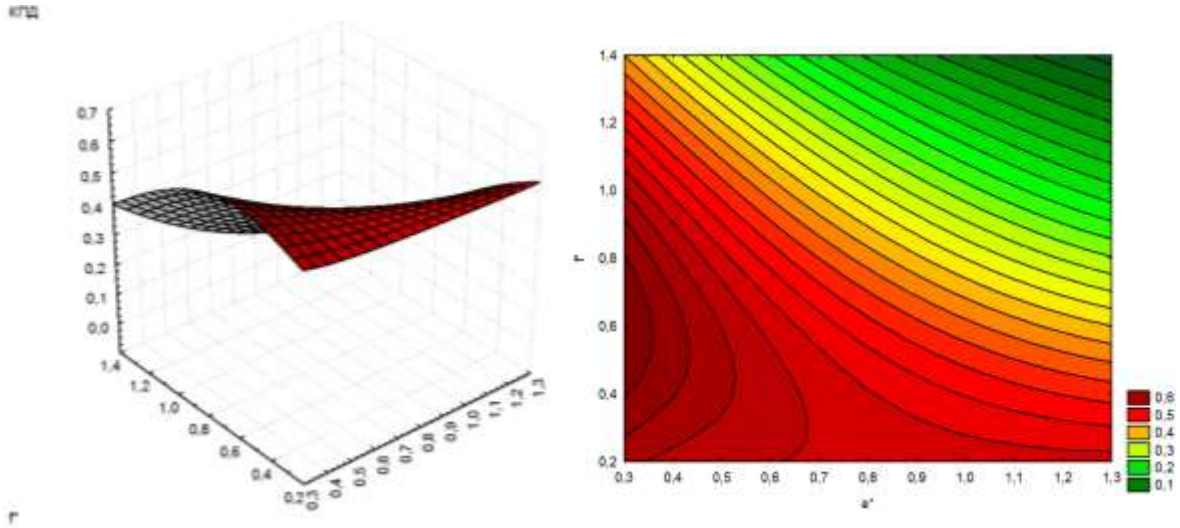

Рисунок 6 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей (векторное управление) при $H_{ст}^{*}=0{,}3$

На основе анализа поверхностей на рисунках 5 – 6 можно выделить зоны оптимальных режимов работы при различных статических напорах (векторное управление) – таблица 2.

Таблица 2 – Значение оптимальных параметров агрегата при изменении относительного статического напора (векторное управление)

Относительные значения оптимальных параметров	**Относительное значение статического напора, $H_{ст}^{*}$ (уровень возможного КПД агрегата)**			
	0,95 (0,75)	0,8 (0,75)	0,5 (0,6)	0,3 (0,6)
Угол разворота лопастей, α*	0,8 – 1,25	0,3 – 0,55	0,3 – 0,35	0,3 – 0,35
Частота тока, f*	0,85 – 0,93	0,75 – 0,95	0,65 – 0,85	0,4 – 0,8

На рисунках 7 – 8 приведены поверхности и соответствующие сечения зависимостей КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при различных значениях относительного статического напора и векторном управлении (функция поддержания постоянного скольжения). Значения оптимальных параметров агрегата при изменении относительного статического напора при скалярном управлении приведены в таблице 3.

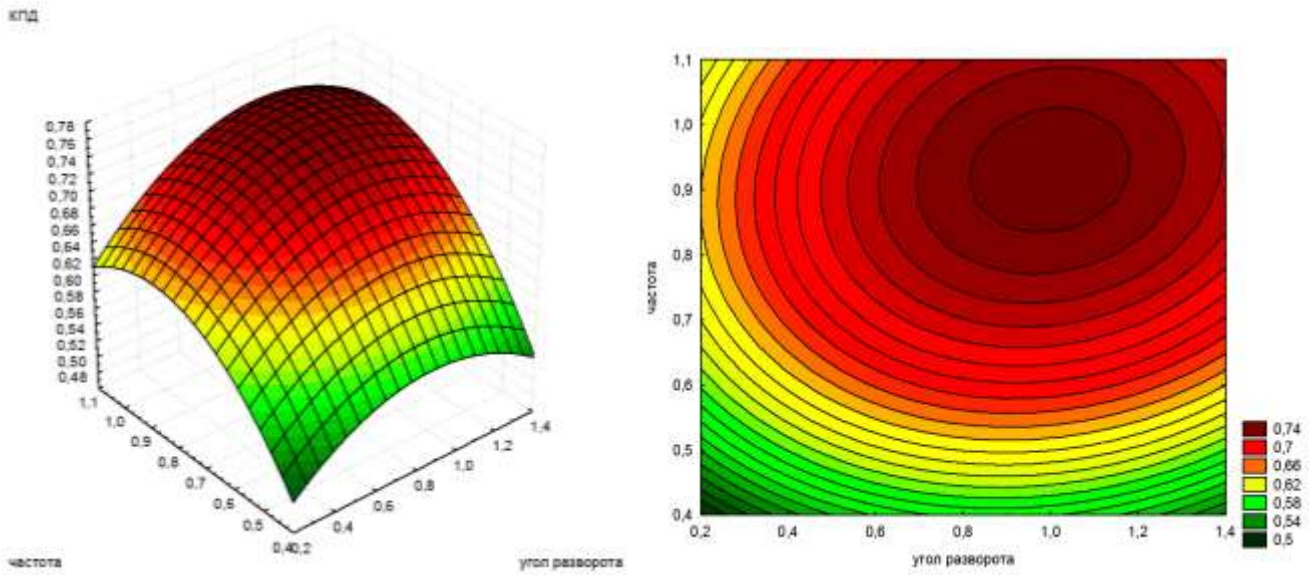

Рисунок 7 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $H_{ст}^{*} = 0,95$

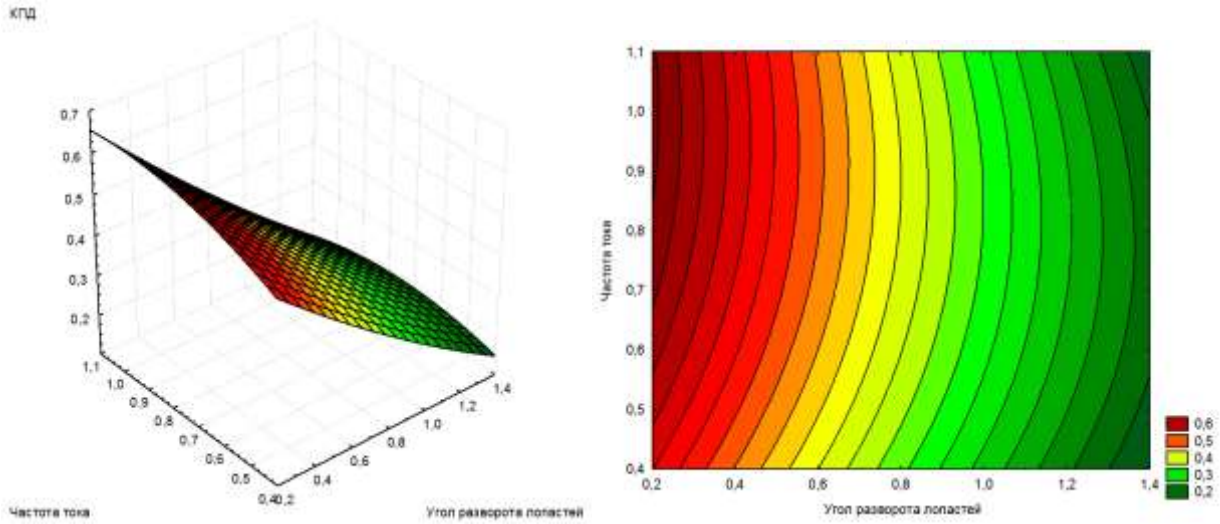

Рисунок 8 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $H_{ст}^{*}=0,3$

Таблица 3 – Значение оптимальных параметров агрегата при изменении относительного статического напора (скалярное управление)

Относительные значения оптимальных параметров	**Относительное значение статического напора, $H_{ст}^*$ (уровень возможного КПД агрегата)**			
	0,95 (0,74)	0,8 (0,68)	0,5 (0,65)	0,3 (0,6)
Угол разворота лопастей, α*	0,8 – 1,2	0,45 – 0,85	0,8 – 1,1	0,2 – 0,25
Частота тока, f*	0,85 – 1,0	0,8 – 1,0	0,2 – 0,3	0,85 – 1,1

В четвертой главе для проверки адекватности математических моделей было проведено компьютерное моделирование. Структурная схема компьютерной модели представления на рисунке 9. В качестве входного воздействия использовались реальные статические напоры и уровень воды в аванкамере.

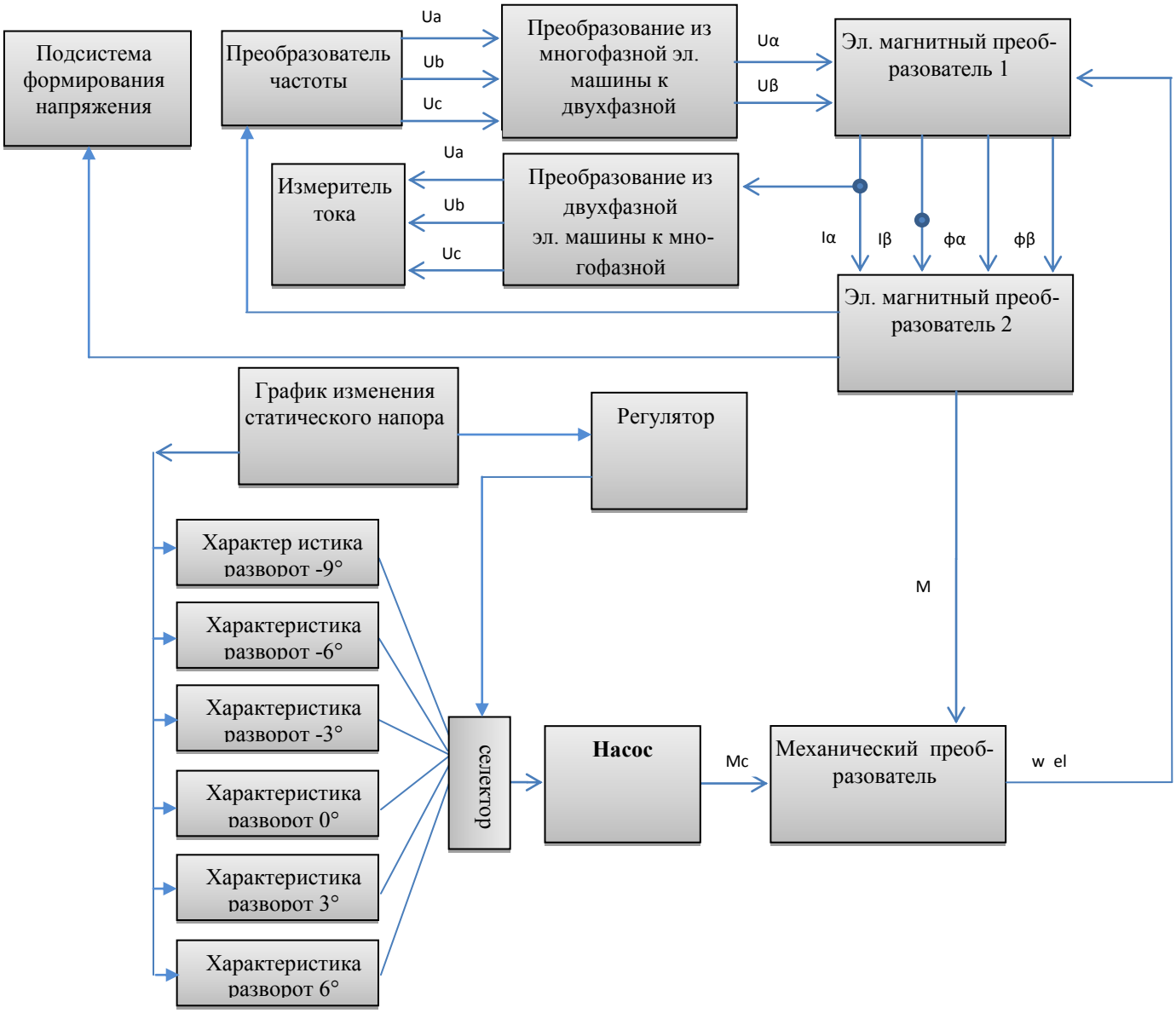

Рисунок 9 – Структурная схема компьютерной модели

Результаты моделирования приведены на рисунке 10, а реальные КПД системы приведены на рисунке 11.

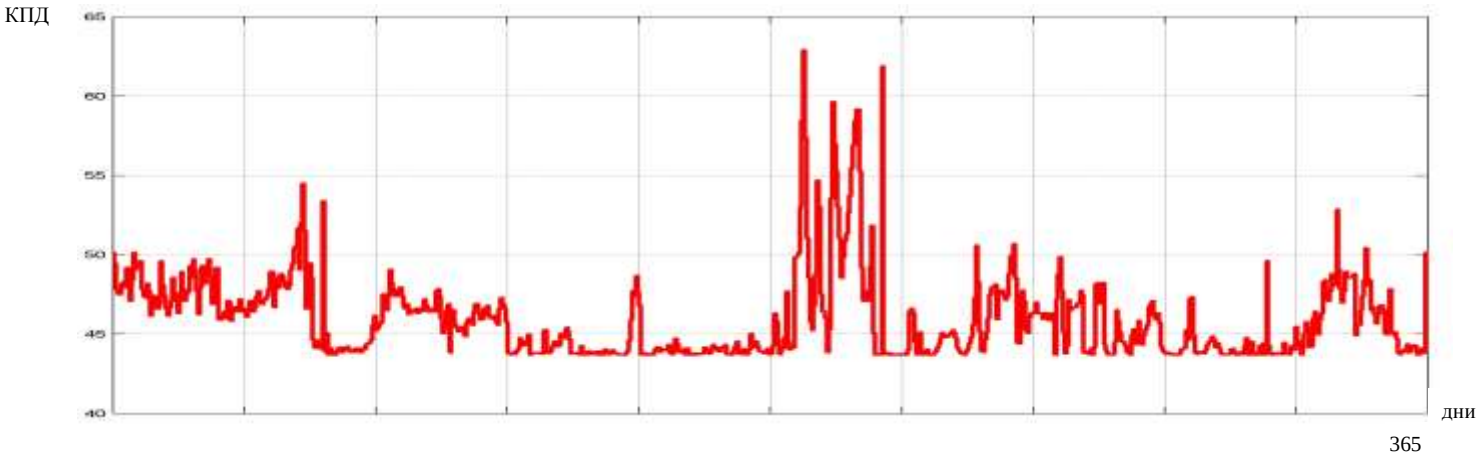

Рисунок 10 – Результаты моделирования КПД насосного агрегата при колебаниях фактического статического напора

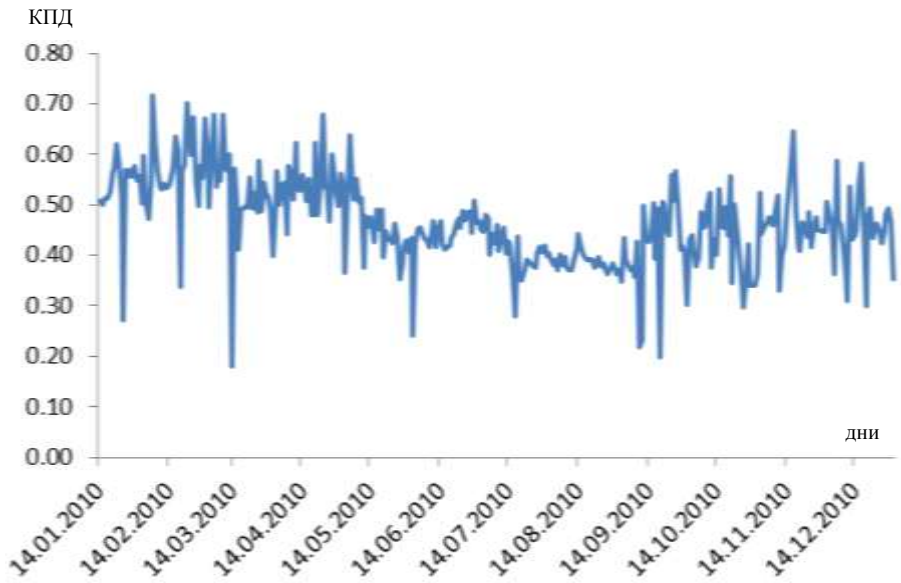

Рисунок 11 – КПД насосного агрегата при колебаниях статического напора, рассчитанный по фактическим данным

КПД агрегата без регулирования составил η_{cp} = 47%.При этом среднеквадратическое отклонение графика изменения вычисленного по реальным данным КПД составило σ^2_2 = 0.106.

Коэффициент корреляции двух графиков КПД (рисунок 10-11) составил R =0.67.

КПД насосного агрегата с учетом регулирования частоты вращения (векторное управление) и разворота лопастей при колебаниях статического напора показан на рисунке. Среднее значение КПД составило η_{cp} = 58%.

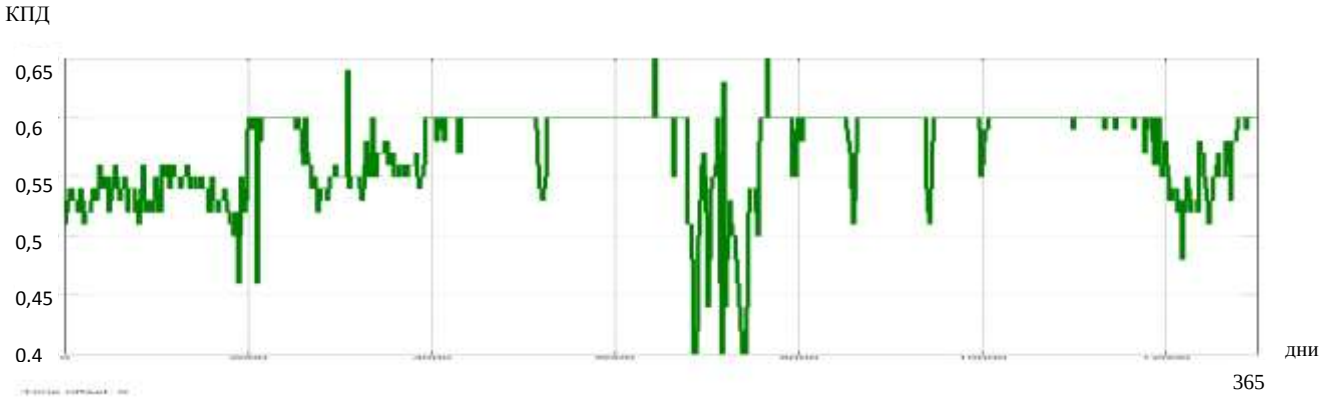

Рисунок 12 - КПД насосного агрегата с учетом регулирования частоты вращения (векторное управление) и разворота лопастей при колебаниях статического напора

Нами была разработана структура автоматизированной системы управления, способная реализовывать полученный закон оптимального управления.

Для удешевления системы применяется каскадное управление частотой вращения группы насосов, то есть преобразователь имеет свою параллельную распределительную шину.

В результате моделирования КПД насосной станции при изменении статического напора (рисунок 12), экономия электроэнергии составила 2 457 тыс. кВт·ч.

В пятой главе определены показатели экономической эффективности от внедрения автоматизированной системы управления производительностью насосных агрегатов мелиоративной насосной станции. Расчет проводился в сравнении с базовым годом. В затраты включены работы по восстановлению устройств разворота лопастей рабочего колеса насосного агрегата, стоимость оборудования и монтажа. Экономическая эффективность определялась согласно прогнозных цен на электроэнергию.

При внедрении системы потребуется вложить 16,23 млн руб. Чистый дисконтированный доход составит 8,31 млн. руб., срок окупаемости капитальных вложений - 2,2 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе энергетической диаграммы системы «электропривод – насосный агрегат» получена целевая функция оптимизации режима работы, связывающая

коэффициент полезного действия системы с КПД её отдельных элементов, что позволяет установить оптимальные параметры работы насосного агрегата – частоту вращения, угол разворота лопастей.

2. Разработана математическая модель системы «электропривод – насосный агрегат» без учета КПД магистрали, анализ которой показал, что до относительной частоты тока равной 0,4, КПД электродвигателя изменяется незначительно и не рекомендуется изменение частоты тока менее 20 Гц. Установлено, что максимум всех КПД элементов системы лежит в интервале по относительной производительности от 0,8 до 1,2, и угол разворота не сильно влияет на КПД системы, а при относительной частоте тока равной 0,8 – КПД системы «электропривод – насосный агрегат» держится более стабильно при различном развороте лопастей рабочего колеса насоса.

3. Получена математическая модель системы «электропривод – насосный агрегат» с учетом КПД магистрали. Установлено следующее: при относительном статическом напоре, близком к единице, уменьшение частоты тока вызывает уменьшение КПД, а при относительном статическом напоре менее 0,8 – увеличение КПД. Из двух способов регулирования КПД агрегата, большее значение КПД можно получить при малых статических напорах путем разворота лопастей, например, при статическом напоре, равном 0,4, максимальный КПД системы «электропривод – насосный агрегат» достигается: при изменении частоты – 0,42; при изменении угла разворота – 0,62. Доказано преимущество комбинированного способа управления – разворотом лопастей и изменением частоты тока.

4. Установлено преимущество векторного управления частотного преобразователя при малых относительных статических напорах, так при $H_{ст} = 0,3$ и одинаковых значениях частоты и угла разворота со скалярным управлением можно получить КПД системы «электропривод – насосный агрегат» на уровне 0,5, а с векторным управлением – до 0,63.

5. Разработаны компьютерные модели системы «электропривод – насосный агрегат без регулирования производительности» и «электропривод – насосный агрегат с регулированием производительности» в среде SIMULINK, позволяющие

задавать различные режимы работы, изменять параметры двигателя, насоса, частотного преобразователя, угол установки лопастей рабочего колеса.

6. Используя фактические трехлетние данные статических напоров мелиоративной насосной станции №7 Понуро-Калининской оросительной системы и компьютерной модели, получены данные по изменению КПД насосной станции при различных режимах работы и количество потребленной электроэнергии. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по КПД показало следующее: теоретически рассчитанное значение КПД составило 47%, значение КПД, вычисленное по экспериментальным данным 51%, относительная погрешность по среднему значению не превысила 4,7%, при этом среднеквадратическое отклонение составило по теоретическим данным 0,1 , по экспериментальным данным – 0,03, коэффициент корреляции теоретического и экспериментального графика – 0,67. При моделировании комбинированного способа регулирования производительности, среднее значение КПД составило 58%.

7. Разработана функциональная схема автоматизированного управления насосной станцией, построенная по идеологии распределенной системы (DCS), позволяющей реализовывать энергоэффективный алгоритм управления.

8. Произведен расчет энергетической и экономической эффективности насосной станции, так при объеме капиталовложений 16 230 000 руб., ЧДД составил 8 310 655 руб.

Основные положения диссертационной работы опубликованы

- *в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Дидыч В.А. Повышение надежности защиты электронасосных агрегатов от обрыва фаз / С.В. Оськин, А.Ф. Кроневальд, В.А. Дидыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2009. – №4 – С. 27-28.

2. Дидыч В.А. Повышение эффективности насосных агрегатов в системах мелиорации и орошения / С.В. Оськин, В.А. Дидыч // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2011. – №6. – С. 23-24

3. Дидыч В.А. Пути энергосбережения в насосных установках системы мелиорации и орошения / В.А. Дидыч // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс] Краснодар: КубГАУ, 2011. - №05(69). – Режим доступа http://ej.kubagro.ru/2011/05/pdf/07.pdf.

- *в монографии*

4. Научно-обоснованные рекомендации повышения энергоэффективности насосных станций / В.А. Дидыч, С.В. Оськин, А.С. Оськина, М.И. Потешин. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 82 с.

- *в прочих изданиях:*

5. Дидыч В.А. Пути снижения энергопотребления в рисоводстве / В.А. Дидыч // Университетская наука – региону. - Ставрополь: СтГАУ., 2009. – С. 39-43.

6.Дидыч В.А. Влияние качества работы насосных установок осушения на экологическую ситуацию подтопляемых земель Калининского района / В.А. Дидыч, М.Н. Карпов // Наука. Идеи и решения №1, Краснодар: КубГАУ, 2010, с. 82.

7. Дидыч В.А. Способы повышения энергоэффективности осевых насосных агрегатов мелиоративных насосных станций / В.А. Дидыч // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Научное обеспечение агропромышленного комплекса», Краснодар: КубГАУ, 2011, С. 47-49

8. Дидыч В.А. Способы повышения энергоэффективности осевых насосных агрегатов мелиоративных насосных станций / В.А. Дидыч, // Университет. Наука. Идеи и решения №2, Краснодар: КубГАУ, 2011, С. 29-31.

9. Дидыч В.А. Энергосбережение в насосных установках системы мелиорации и орошения / С.В. Оськин, В.А. Дидыч // Известия академии электротехнических наук №2, М.: «Янус-К», 2011,. С. 55-59.

10. Свид. РФ №201361613. OptimalDrive / В.А. Дидыч, Я.А. Ильченко, С.М. Моргун, С.В. Оськин, М.И. Потешин.; заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2013613839 заявл. 07.05.2013; опубл. 26.07.2013.

11. Свид. РФ №2013616080. Расчет потерь в линиях 0,22 кВ, НН, СН1, СН2. / В.А. Дидыч, Я.А. Ильченко, С.М. Моргун, С.В. Оськин, М.И. Потешин.; заявитель и патентообладатель КубГАУ. - № 2013613846 заявл. 07.05.2013; опубл. 26.06.2013.

Подписано в печать 25.10.2013.
Бумага офсетная
Печ. л. 1.
Тираж 100 экз.

Формат $60\times84^{1}/_{16}$.
Офсетная печать
Заказ № 708

Отпечатано в типографии Кубанского ГАУ
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13.