

На правах рукописи



Стулов Александр Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ
С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2024

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Котенев Александр Викторович** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Официальные оппоненты: **Артюхов Иван Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.» (г. Саратов)

Ковалев Константин Львович – доктор технических наук, профессор, зав.кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск)

Защита диссертации состоится 25 декабря в 9.00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. № 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус 1.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.2.377.06



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Задача оптимизации потокораспределения реактивной мощности в энергосистемах является важной, так как влияет на сокращение потерь активной мощности в сетях. Она решается путем рационального распределения реактивных нагрузок с учетом фактических нагрузок потребителей и доступного запаса реактивной мощности источников питания.

Отличительной особенностью энергосистем является единство технологического процесса производства, транспорта и распределения электрической энергии. Следовательно, имеется режимная связанность электроустановок потребителей электрической энергии с остальными электроэнергетическими объектами энергосистемы.

Вовлеченность потребителей электрической энергии в процесс поддержания оптимального баланса потребляемой активной и реактивной мощностей обеспечивается путем тарифного регулирования в отношении режима потребляемой ими электрической энергии на основании значения коэффициента реактивной мощности.

С этой целью при заключении договоров потребителей с сетевыми организациями об оказании услуг по передаче электрической энергии. По соглашению с сетевой организацией потребитель может участвовать в регулировании реактивной мощности в целях обеспечения оптимального режима работы электрической сети, что достигается путем предоставления на возмездной основе своих ресурсов источников реактивной мощности.

Для решения этой задачи он, как правило, располагает собственными источниками реактивной мощности в виде конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и технологических установок с синхронными двигателями. Резервы реактивной мощности устройств компенсации могут быть использованы для обеспечения режимов потребления или генерации реактивной мощности. Расчет режима работы источников реактивной мощности осложняется множеством факторов. Этими факторами являются резкие колебания нагрузки, вызванные особенностями технологического процесса, изменение режима работы системы электроснабжения по причине плановых и аварийных отключений отдельных мощных электроустановок или участков электрической сети, сезонные изменения коэффициента реактивной мощности.

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, можно с высокой степенью вероятности заключить, что обеспечение процесса надежного регулирования коэффициента реактивной мощности исключительно силами обслуживающего персонала без применения специ-

альных технических средств автоматического управления невозможно. Таким образом, создание системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения предприятия с целью уменьшения затрат на потребляемую электроэнергию является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

Разработке моделей и алгоритмов работы управляемых конденсаторных установок посвящено большое количество работ. Среди них значительное место занимают работы: Ильяшова В.П., Красника В.В., Маклакова А. С., Николаева А. А., Хисматуллина А. С., Еремина М. Ю., Волгина М. Е., Ocoleanu D. С., Rechberger K., Coefler H., Krishnam K., Kumar D., Zhu Y., Lin Q., Yu H., Fu Z., Ma R., Fan H., Ma Y., Yu C., Lambe S., Karande K., Wagle R., Ye L., Kosaraju K.

Математическому моделированию, алгоритмизации, разработке систем управления синхронными электрическими машинами посвящены работы: Юрганова А.А., Груздева А.И., Петелина Д.П., Рысева П. В., Малькова С. С., Шульги К. С., Гончарука А. Ю., Нурматова О. Е., Лашенова М.Б., Пилюгина Г.А., Angayar K. S., Kumar K., Arumugam S., Köpře H., Zhou Yu., Li Z., Farkhadov Z.

Обозначенные выше проблемы в данных работах рассмотрены без учета возможности использования обратных связей по мощности нагрузки и коэффициенту реактивной мощности, а также без учета влияния на величину коэффициента реактивной мощности параметров асинхронных двигателей и конденсаторных установок. Асинхронные двигатели характеризуются большими пусковыми токами, способными резко изменить коэффициент реактивной мощности системы электроснабжения. Установленные конденсаторные батареи на стороне высокого напряжения обычно не имеют возможности регулирования. Конденсаторные батареи на стороне низкого напряжения работают с небольшой задержкой для увеличения срока службы коммутирующей аппаратуры. Регулированию коэффициента реактивной мощности за счет управления возбуждением синхронного двигателя при разгоне мощных асинхронных двигателей уделено недостаточное внимание. Указанные проблемы позволяют сформулировать цель работы и задачи научных исследований.

Объект исследования – электротехнический комплекс предприятия с синхронным электроприводом, силовыми трансформаторами, асинхронными двигателями большой мощности и регулируемые конденсаторными установками.

Предмет исследования - система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности, методы настройки регуляторов на оптимум.

Цель работы - улучшение управления коэффициентом реактивной мощности предприятия с синхронным электроприводом для поддержания баланса реактивной мощности, уменьшения тарифа на электрическую энергию и повышения конкурентоспособности производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель стационарного режима работы ЭТК предприятия, включающего трансформаторы 35/6, 6/0,4 кВ и систему автоматического регулирования коэффициентом реактивной мощности.

2. Разработать математическую модель стационарного режима работы ЭТК предприятия, включающего трансформаторы 35/6, 6/0,4 кВ и систему автоматического регулирования коэффициентом реактивной мощности.

3. Синтезировать систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия при использовании синхронного двигателя в качестве источника реактивной мощности, для обеспечения качественного регулирования коэффициента реактивной мощности.

4. Определить эффективный вариант системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности с одно- и двухконтурными структурами и подчиненным контуром регулирования тока возбуждения синхронной машины.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая управлять в динамике коэффициентом реактивной мощности и определять потери активной и реактивной мощности в трансформаторе и линиях предприятия.

2. Установлено значительное влияние потерь в трансформаторе ГПП на значение коэффициента реактивной мощности предприятия, требующее постоянного контроля с целью обеспечения заданного значения на шинах ГПП.

3. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности на шинах главной понизительной подстанции, отличающийся учетом изменения потерь активной и реактивной мощности в силовых трансформаторах.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Осуществлен синтез системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности посредством регулирования напряжения возбуждения синхронного электродвигателя.

2. Определены настройки регуляторов системы автоматического управления, позволяющие уменьшить величину коэффициента реактивной мощности и стоимость электроэнергии для промышленного предприятия.

3. Разработана методика расчета активной и реактивной мощности асинхронного двигателя, позволяющая определить их изменение при развороте двигателя, и осуществлять эффективную настройку релейных защит.

4. Результаты работы внедрены в практику приемосдаточных испытаний на АО «ГК «Электроцит» - ТМ Самара» (Акт внедрения АО «ГК «Электроцит» - ТМ Самара») и в практику проектирования и строительства объектов энергетики ООО ПКФ «МК – Альянс» (Акт внедрения ООО ПКФ «МК – Альянс»).

Методы исследований

В работе использованы методы теории электрических машин, теории автоматического управления, электрического привода и методы компьютерного моделирования, реализованные в программных комплексах MATLAB Simulink и PSCAD.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая управлять коэффициентом реактивной мощности и определять потери активной и реактивной мощности в элементах схемы.

2. Одно- и двухконтурная системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия с синхронным электроприводом, позволяющие соблюдать предельные значения коэффициента реактивной мощности.

3. Определены настройки регуляторов системы автоматического управления, позволяющие уменьшить величину коэффициента реактивной мощности и стоимость электроэнергии для промышленного предприятия.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пунктам: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и

систем», п.2 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.3 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Степень достоверности

Достоверность результатов исследования обеспечивалась путем использования известных и проверенных математических методов с обоснованными допущениями, применением поверенных и сертифицированных приборов при проведении экспериментальных исследований, а также сравнением полученных в работе результатов с данными других авторов, занимающихся решением аналогичных задач. Вычислительные эксперименты на полученных моделях проводились с использованием программного обеспечения MATLAB и PSCAD.

Апробация результатов

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2020) (Челябинск, 2020), «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2021) (Челябинск, 2021), «Электротехнические комплексы и системы» (UralCon-2023) (Челябинск, 2023), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика XXIX» (Москва, 2023), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика XXX» (Москва, 2024), а также на научных семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ общим объемом 5,4 п.л., в том числе 3 статьи индексируемые в базе данных Scopus, 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ, в которых личный вклад автора составляет 3,4 п.л.

Личный вклад автора в диссертационное исследование

Состоит в разработке математической модели электротехнического комплекса, как объекта управления коэффициентом реактивной мощности; синтезе системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности электротехнического комплекса предприятия; компьютерном моделировании электротехнического комплекса предприятия с синхронным электроприводом и различными структурами, анализе полученных результатов вычислитель-

ных экспериментов и проведении исследований, направленных на верификацию полученных результатов и моделей.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Основная часть диссертации изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка и 19 таблиц. Библиографический список содержит 152 наименования на 19 страницах.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности работы, посвященной повышению эффективности управления коэффициентом реактивной мощности промышленного предприятия с асинхронными и синхронными электродвигателями. Сформулирована цель работы и задачи исследования, а также изложена научная новизна и значимость полученных результатов на практике.

В первой главе произведено структурирование используемых на предприятиях технических средств управления реактивной мощностью (РМ), проведен анализ публикаций по алгоритмам и способам построения систем автоматического управления (САУ) РМ предприятия с использованием конденсаторных установок (КУ), либо синхронных двигателей (СД).

Выделены структуры САУ, являющиеся наиболее близкими к решаемым в диссертации задачам.

Вторая глава посвящена математическому описанию статического режима ЭТК как объекта управления КРМ. Однолинейная схема ЭТК представлена на рис. 1.

В ее состав входят трансформаторные подстанции (ТП) трех типов: первый тип подстанций без регулирования РМ, второй тип подстанций с регулированием РМ с помощью КУ, третий тип подстанций, где реактивная мощность регулируется СД.

Математическая модель ТП без источников РМ составлена при следующих допущениях: напряжение питания на шинах трансформаторной подстанции не изменяется; потери «в стали» трансформатора постоянны; ток холостого хода и напряжение К.З. постоянны и соответствуют паспортным данным.

Потери активной и реактивной мощности в трансформаторе принято разделять на постоянные и переменные. Постоянные потери активной мощности P_C или потери холостого хода в трансформаторе являются справочной величиной. Постоянные потери РМ Q_{Π} определяются по выражению (1).

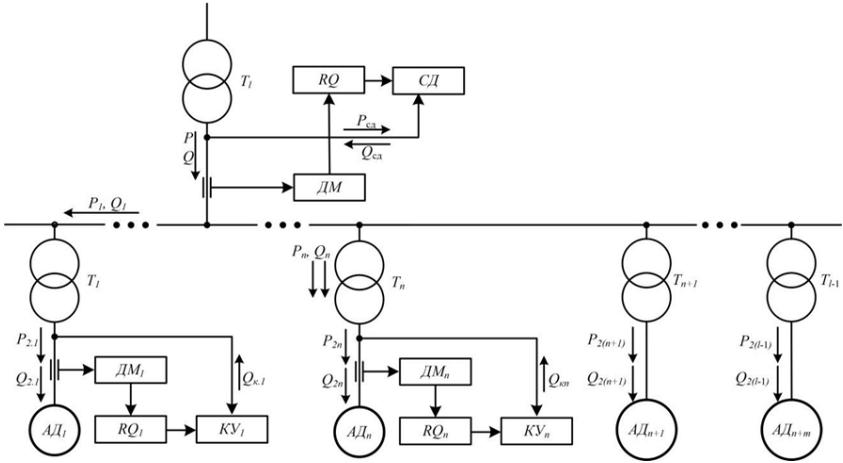


Рис. 1 – Однолинейная обобщенная функциональная схема ЭТК

$$Q_{\mu} = \frac{I_x \% S_{TH}}{100} \quad (1)$$

где $I_x\%$ – ток холостого хода, S_{TH} – номинальная мощность трансформатора.

Переменные потери активной и реактивной мощности в трансформаторе равны

$$P_V = a_1 \left((P_2 + P_{\alpha})^2 + (Q_2 - Q_{\alpha})^2 \right) \quad (2)$$

$$Q_V = a_2 \left((P_2 + P_{\alpha})^2 + (Q_2 - Q_{\alpha})^2 \right)$$

где $P_2 + P_{\alpha}$ – активная мощность потребителей, $Q_2 - Q_{\alpha}$ – реактивная мощность потребителей, коэффициенты a_1 и a_2 равны

$$a_1 = \frac{P_K}{S_{TH}^2}, \quad a_2 = \frac{U_K \%}{100 S_{TH}} \quad (3)$$

где P_K – мощность короткого замыкания, $U_K\%$ – напряжение короткого замыкания.

Тогда КРМ на стороне низшего $tg\phi_d$ и высшего $tg\phi_V$ напряжений трансформатора можно определить по формулам (4).

Выражения (1-4) являются математической моделью трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_d &= \frac{Q_2 - Q_\alpha}{P_2 - P_\alpha} \\ \operatorname{tg} \varphi_V &= \frac{Q_2 - Q_\alpha + Q_\mu + Q_V}{P_2 + P_\alpha + P_C + P_V} \end{aligned} \quad (4)$$

При использовании в качестве источника РМ конденсаторной установки с алгоритмом управления в функции активной и реактивной мощности потребителей

$$U_\delta = k_M Q_2 - k_M (P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon}$ – заданное значение коэффициента реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформатора, k_M – коэффициент передачи датчиков мощности.

Реактивная мощность конденсаторной установки

$$Q_K = k_M^{-1} U_\delta = Q_2 - (P_2 + P_\alpha) \operatorname{tg} \varphi_{d\varepsilon} \quad (6)$$

При использовании в качестве источника РМ синхронного двигателя с законом управления, сформированным в функции мощности потребителя и потерь в питающем трансформаторе, выражения активных и реактивных потерь в трансформаторе

$$Q_{V(n+1)} = a_{2l} \left(P_{l1}^2 + (Q_{l1} - Q_{CD})^2 \right), \quad (7)$$

$$P_{V(n+1)} = a_{1l} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{V\varepsilon}) P_{l1}^2,$$

где $P_{l1} = P_l + P_{CD} + P_C$, $Q_{l1} = Q_l + Q_\mu$, P_{CD} – активная мощность, потребляемая СД, Q_{CD} – реактивная мощность СД, P_l – активная мощность нагрузки, Q_l – реактивная мощность нагрузки.

Поскольку значение реактивной мощности Q_{CD} изначально неизвестно, то по аналогии с выражением (6) $Q_{CD} = k_M^{-1} U_\delta$ и величину сигнала задания можно определить из выражения КРМ путем подстановки $P_2 + P_\alpha = P_{l1}$, $Q_2 - Q_\alpha = Q_{l1}$ и $\operatorname{tg} \varphi_V = \operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon}$

$$\operatorname{tg} \varphi_{V\varepsilon} = \frac{Q_{l1} + a_{2l} \left(\left(P_{l1} + P_{V(n+1)} \right)^2 + \left(Q_{l1} - k_M^{-1} U_\delta \right)^2 \right) - k_M^{-1} U_\delta}{P_{l1} + P_{V(n+1)}}. \quad (8)$$

Решая уравнение (8), получим алгоритм управления

$$U_\delta = F(x) = k_M \left(\frac{a_3}{2} - \sqrt{\frac{a_3^2}{4} - a_4} \right), \quad (9)$$

где

$$a_3 = 2Q_{l1} + \frac{100S_{THH}}{U_K \%},$$

$$a_4 = Q_{l1}^2 + P_{l1}^2 + \frac{100\left(Q_{l1} - (P_{l1} + P_{V(n+1)})\right)tg\varphi_{V\varepsilon}}{U_K \%} S_{THH}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнения (7-10) с учетом выражений (1-4) являются математической моделью трансформаторной подстанции, оборудованной САУ КРМ на стороне высшего напряжения ТП.

Полученные математические модели трансформаторной подстанции без источников реактивной мощности (1-4), с управляемой конденсаторной установкой (1-6) и с синхронным двигателем в качестве компенсирующего устройства являются составными частями однолинейной обобщенной схемы и могут быть представлены в общем виде функциональной схемы САУ КРМ всего предприятия (рис. 2). График суточного изменения величины коэффициента реактивной мощности всего предприятия показан на рис. 3.

В ходе исследований установлено, что в качестве сигнала обратной связи предпочтительно использовать величину коэффициента реактивной мощности. Разработана математическая модель, описывающая статику ЭТК предприятия как объекта управления коэффициентом реактивной мощности, и алгоритм программного управления коэффициентом реактивной мощности.

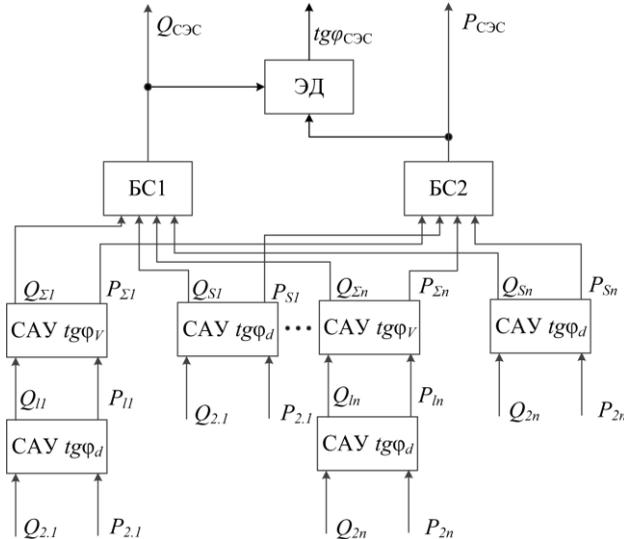


Рис. 2 - Функциональная схема САУ КРМ ЭТК предприятия

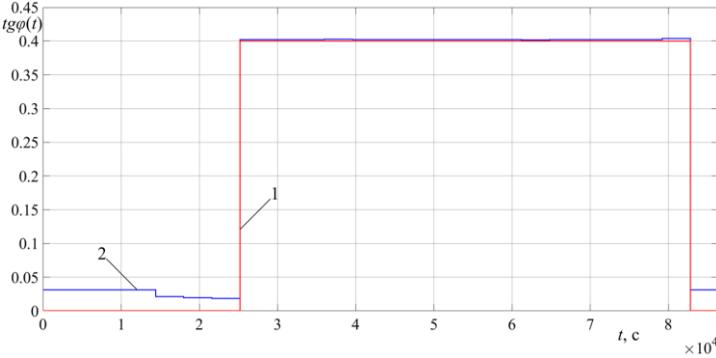


Рис. 3 – График суточного изменения величины КРМ ЭТК: 1 – график предельного значения коэффициента реактивной мощности, 2 – график изменения величины КРМ всего предприятия

В третьей главе с целью структурно-параметрического синтеза САУ КРМ ЭТК рассмотрена динамика электротехнического комплекса как объекта управления коэффициентом реактивной мощности.

При разработке математической модели ЭТК принято допущение о том, что инерционность синхронного двигателя существенно превышает инерционность других элементов комплекса, поэтому динамической моделью описывается только синхронный двигатель.

Модель синхронного двигателя для режима малых приращений

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta I_f(p) &= \frac{1}{T_f' p + 1} \left(\frac{\Delta U_f(p)}{R_f} - W_4(p) \Delta \Theta(p) \right) \\
 \Delta \Theta(p) &= W_1(p) \left(\frac{k_1 \Delta E_q(p)}{E_{q0}} + \frac{k_2 \Delta P(p)}{P_{CM}} \right) \\
 E_{q0} &= x_{ad} I_{f0} \\
 \Delta E_q(p) &= x_{ad} \Delta I_f(p) = \frac{x_{ad} \Delta U_f(p)}{R_f} \\
 \Delta Q(p) &= k_4 \Delta \Theta(p) + k_5 \Delta E_q(p) \\
 \Delta P(p) &= k_6 \Delta m(p)
 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где ΔI_f - приращение тока возбуждения; T_f' – постоянная времени обмотки возбуждения; R_f – активное сопротивление обмотки воз-

буждения; $\Delta\Theta$ – приращение внутреннего угла СД; E_q – ЭДС СД по оси q ; x_{ad} – индуктивное сопротивление самоиндукции; ΔQ – реактивная мощность СД; ΔP – активная мощность СД; $P_{\text{СМ}}$ – номинальная активная мощность синхронного двигателя; Δm – приращение момента нагрузки на валу СД.

Для математического описания возмущающего воздействия со стороны асинхронного двигателя и в связи с неточностью справочных данных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых в ЭТК НСМ, предложена методика расчета параметров Т-образной схемы замещения АД, отличающаяся от известных решением системы уравнений (12) методом итераций, где уже на 3 шаге итерации погрешность вычислений составляет менее 3%.

$$\begin{aligned} R_1^2 + \frac{R_2'^2}{s_{\text{н}}^2} - \frac{a_1}{s_{\text{н}}} R_2' + \frac{2}{s_{\text{н}}} R_1 R_2' + x_{\text{к}}^2 &= 0; \\ R_1 &= a_2 - a_3 x_{\text{к}}^2; \\ R_2' &= a_4 x_{\text{к}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет параметров АД с использованием предложенной методики позволяет учитывать влияние скольжения на их величину. С использованием выражений для активной и реактивной мощностей АД с короткозамкнутым ротором, получена математическая модель (13), описывающая асинхронный двигатель, как возмущающее воздействие на САУ КРМ ЭТК.

$$\left. \begin{aligned} R(s) &= R_1 + \frac{R_2(s) \frac{x_{\mu}^2}{s}}{\left(x_{\mu} + x_2(s)\right)^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \\ x(s) &= x_1(s) + \frac{x_2(s)x_{\mu}^2 + x_{\mu} \left(x_2^2(s) + \frac{R_2^2(s)}{s^2}\right)}{\left(x_{\mu} + x_2(s)\right)^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \\ P(s) &= \frac{U_{\text{н}}^2 R(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \\ Q(s) &= \frac{U_{\text{н}}^2 x(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Данная модель, где управляющим воздействием является изменение скольжения, зависящего от момента нагрузки на валу АД, позволяет определить изменение активной и реактивной мощностей во всем диапазоне изменения скольжений, в том числе при пуске АД.

Структурная схема ЭТК как объекта управления КРМ представлена на рис. 4.

Далее исследовались структуры САУ КРМ ЭТК на стороне высшего напряжения ТП, замкнутой по величине коэффициента реактивной мощности, в одно- и двухконтурном исполнении.

Настройка контура регулирования КРМ осуществлялась методом Зиглера-Никольса и программными средствами MATLAB Simulink. Настройка контура регулирования тока возбуждения (КРТВ) - методом Зиглера-Никольса, программными средствами MATLAB Simulink и аналитическим методом определения интеграла от взвешенного модуля сигнала ошибки (ИВМО).

Структурная схема двухконтурной САУ КРМ ЭТК представлена на рис. 5.

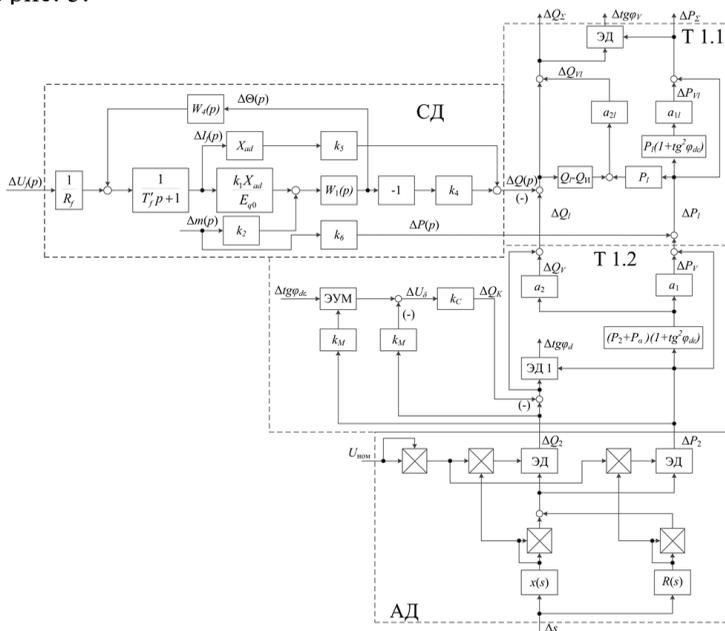


Рис. 4 - Структурная схема ЭТК промышленного предприятия с синхронным электроприводом

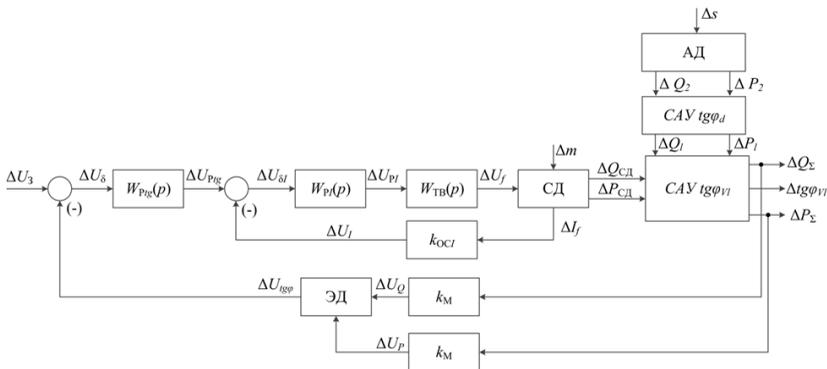


Рис. 5 - Структурная схема двухконтурной САУ КРМ ЭТК

В обеих системах рассчитаны показатели качества переходного процесса: время переходного процесса $t_{ппу}$, перерегулирование $\sigma_{ппу}$, статическая ошибка ε по управляющему воздействию, время переходного процесса $t_{ппм}$, $t_{ппс}$ и величина динамического провала $\sigma_{ппм}$, $\sigma_{ппс}$. Результаты расчета сведены в табл. 1. Анализ полученных данных показал, что при обработке управляющего и возмущающего воздействий одноконтурная система имеет худшие показатели качества переходного процесса, чем двухконтурная. Таким образом, использование САУ КРМ ЭТК с двухконтурной структурой обеспечивает лучшее быстродействие за счет ввода в структуру контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя.

Табл. 1

Число контуров	Вариант настройки контура	Показатели качества переходного процесса							
		По управляющему воздействию			По возмущающему воздействию				
		$t_{ппу}$, с	$\sigma_{ппу}$, %	ε , %	$t_{ппм}$, с	$\sigma_{ппм}$, %	$t_{ппс}$, с	$\sigma_{ппс}$, %	
1	MATLAB Simulink	1,8	0	0,02	3	3	2	4	
	метод Зиглера-Никольса	1,8	0	0,01	3	2,75	2	4	
2	MATLAB Simulink	1,26	8,5	0,18	1,3	3	1,5	4,25	
	метод Зиглера-Никольса	0,77	0	0,05	1	2,5	1	4,25	

Настройка САУ КРМ ЭТК методом Зиглера-Никольса весьма удобна при регулировании параметров сложных объектов управления и дает лучшие показатели качества переходного процесса, в отличие от настройки программными средствами MATLAB Simulink.

Двухконтурная САУ КРМ ЭТК быстрее обрабатывает возмущающее воздействие за счет подчиненного регулирования тока возбуждения СД.

Четвертая глава посвящена реализации и исследованию синхронного электропривода системы управления коэффициентом РМ на экспериментальной установке и имитационной модели ЭТК НСМ.

Вариант САУ КРМ ЭТК для насосных станций мелиорации реализован на цифровых устройствах релейной защиты, цифровом тиристорном возбудителе и управляющем программируемом логическом контроллере, в котором применен ПИД-регулятор.

Подтверждена адекватность разработанной математической модели трансформаторной подстанции (рис. 6), которая имеет погрешность относительно экспериментальных данных менее 3% (рис. 7), что позволяет сделать вывод об адекватности математических моделей, полученных в работе.

Внедрение САУ КРМ ЭТК при управлении коэффициентом реактивной мощности позволяет получить значительный экономический эффект, связанный с уменьшением стоимости электрической энергии на 3%.

На имитационной модели, реализованной в программном комплексе PSCAD подтверждены показатели качества переходного процесса синтезированной САУ КРМ ЭТК (рис. 8, 9), путем срав-

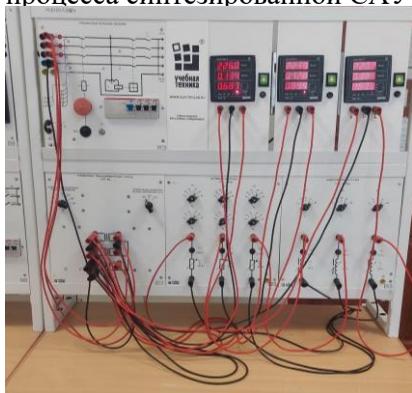


Рис. 6 – Внешний вид экспериментальной установки

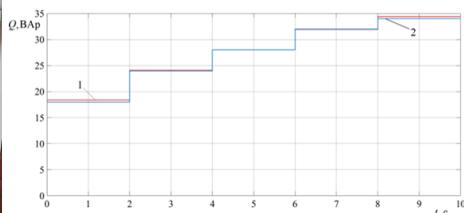


Рис. 7 – Графики реактивной мощности, полученные в результате эксперимента и на модели: 1 – модель; 2 – эксперимент

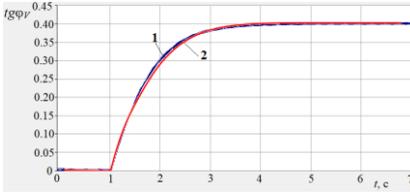


Рисунок 8 – Графики переходного процесса КРМ по управляющему воздействию: 1 –PSCAD; 2 –MATLAB Simulink

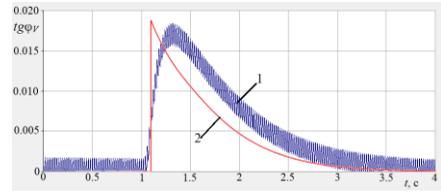


Рисунок 9 – Графики переходного процесса КРМ по возмущающему воздействию в виде наброса нагрузки на валу АД: 1 – PSCAD; 2 –MATLAB Simulink

нения графиков полученных в программном комплексе MATLAB Simulink и графиков полученных в программном комплексе PSCAD. Проверена устойчивость и работоспособность САУ в «большом».

Основные результаты работы:

1. Получена математическая модель трансформаторной подстанции с системой автоматического регулирования коэффициента реактивной мощности на стороне высшего напряжения и синхрон-

ным двигателем в качестве источника реактивной мощности. Показано, что управление коэффициентом реактивной мощности в часы больших суточных нагрузок имеет погрешность менее 1%, а в часы малых суточных нагрузок менее 5%.

2. Разработана математическая модель электротехнического комплекса предприятия, позволяющая с помощью более точного динамического отслеживания потерь активной и реактивной мощности в элементах системы, управлять коэффициентом реактивной мощности и до 10% повысить его значение в часы больших суточных нагрузок.

3. Определены параметры Т-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на основании которых получена математическая модель асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на коэффициент реактивной мощности системы электроснаб.

4. Определены параметры системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности промышленного предприятия за счет регулирования напряжения возбуждения синхронного электродвигателя, позволяющие обеспечить отсутствие перерегулирования по управляющему воздействию и обеспечить быстрое действие при отработке возмущающего воздействия в 4 с.

5. Синтезирована САУ КРМ ЭТК с синхронным электроприводом, применение которой позволяет уменьшить плату за электрическую энергию за счет выполнения требований к предельному значению КРМ и получить экономический эффект от участия в регулировании реактивной мощности в размере 623 тысячи рублей в год, что составляет 3% от стоимости электроэнергии.

Таким образом, все поставленные в диссертационном исследовании задачи успешно решены, цель работы достигнута.

Список сокращений и условных обозначений

АД – асинхронный двигатель

ИВМО – интеграл от взвешенного модуля сигнала ошибки

КРМ – коэффициент реактивной мощности

КРТВ – контур регулирования тока возбуждения

КУ – конденсаторная установка

РМ – реактивная мощность

САУ – система автоматического управления

ЭТК – электротехнический комплекс

СД – синхронный двигатель

ЭТК НП – электротехнический комплекс нефтепромыслов

ЭТК НСМ – электротехнический комплекс насосных станций

мелиорации

ТП – трансформаторная подстанция

ЭДС – электродвижущая сила

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Котенев В.И., Стулов А.Д. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и оценка его погрешности // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2021. - Т. 29. - №3. - С. 98-110. doi: 10.14498/tech.2021.3.6.
2. Котенев В.И., Котенев А.В., Стулов А.Д. Система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения промышленного предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2021. - Т. 29. - №4. - С. 86-98. doi: 10.14498/tech.2021.4.7

3. Котенев В.И., Котенев А.В., Стулов А.Д. Управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения в функции мощности потребителей и потерь в трансформаторах // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2022. - Т. 30. - №4. - С. 142-157. doi: [10.14498/tech.2022.4.10](https://doi.org/10.14498/tech.2022.4.10).

- в прочих сборниках и материалах:

4. Kotenev A. V., Stulov A. D. A Power Supply System for an Industrial Facility with a Synchronous Electric Drive as a Reactive Power Factor Control Object, 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 177-181, doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291080. – Англ.
5. Kotenev V. I., Kotenev A. V., Stulov A. D. Controlling the Reactive Power Factor of a Combined Load Power Supply System and the Correction of Program as a Function of Current Power Consumption 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 171-176, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216286. – Англ.
6. Kotenev V. I., Stulov A. D. Controlling the Reactive Power of the Enterprise's Power Supply System with the Task Correction According to the Current Calculation Meter Readings, 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2021, pp. 152-156, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559543. – Англ.
7. Котенев А.В., Стулов А.Д. Двухконтурная система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тридцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (29 февраля – 2 марта 2024 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2024. — 1342 с.
8. Котенев А.В., Стулов А.Д., Кузьмин Д.Н. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным / Вестник научных конференций. 2023. № 10-4 (98). Вопросы образования и науки: по материалам международной научно-практической конференции 31 октября 2023 г. 132 с
9. Котенев А.В., Стулов А.Д., Кузьмин Д.Н., Кирилов П.Н., Соболев А.А. Передаточная функция асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности. //Флагман науки:

научный журнал. Март 2024. - СПб., Изд. ГНИИ "Нацразвитие" - 2024. №3(14).

10. Котенев А.В., Стулов А.Д., Кузьмин Д.Н. Построение математической модели ТП первого типа / Вестник научных конференций. 2023. № 9-3 (97). Наука, образование, общество: по материалам международной научно-практической конференции 30 сентября 2023 г. 120 с.
11. Котенев А.В., Стулов А.Д. Управление коэффициентом реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции. / Тезисы докладов. Двадцать девятая Международ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – 2023. – 1022.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 24.2.377.06
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол №5 от 22.10.2024)
Заказ 404 Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244