

На правах рукописи

Кочетков Владимир Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Самара 2018

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

Научный руководитель: **Котенев Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

Доманов Виктор Иванович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится 27 ноября 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. № 4а.

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 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04

Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Основной задачей энергоснабжающих организаций является своевременное обеспечение промышленного оборудования потребителей электрической энергией требуемого качества и в необходимых объемах при минимальных потерях активной мощности при ее транспортировке. В действительности потери в элементах энергосистемы при транспортировке значительны, потому что практически для всех энергосистем ЕЭС России характерна работа питающих и распределительных сетей с невысоким коэффициентом мощности. Снижение этих потерь невозможно без компенсации реактивной мощности (РМ) на стороне энергопринимающих устройств.

Для стимулирования проведения соответствующих мероприятий по регулированию реактивной мощности установлена система надбавок и скидок к тарифу за потребленную электрическую энергию посредством начисления повышающих или понижающих тарифных коэффициентов, величину которых можно изменять за счет управления коэффициентом РМ в точке подключения системы электроснабжения (СЭС) к электрической системе и получить значительный экономический эффект.

При наличии в СЭС асинхронных и синхронных электроприводов это возможно осуществить за счет регулирования возбуждения синхронных электродвигателей.

Поэтому разработка систем автоматического управления, с помощью которых удастся понизить величину тарифных коэффициентов до рационального уровня, относится к актуальным проблемам.

Степень разработанности проблемы

Математическим моделям и алгоритмам управления возбуждением синхронных генераторов посвящено достаточно много работ. Среди них значительное место занимает работы отечественных ученых: Веникова В.А., Герценберга Г.Р., Глебова И.А., Горева А.А., Груздева И.А., Жданова П.С., Каштеляна В.Е., Костенко М.П., Матюхина В.М., Михневича Г.В., Юрганова А.А. и др. и работы зарубежных авторов: Adkins B., Anderson P.M., Harris M.R., Lawerson P.J., Kimbark E.W., Park R.A., Concordia C., Steverson W.D., Taylor G.D. и др.

Математическому моделированию, алгоритмизации, системам управления возбуждением синхронных двигателей посвящено значительно меньше работ, хотя у моделей синхронных двигателей и

генераторов много общего. Основные из них принадлежат следующим авторам: Абакумову А.М., Дубинину Д.Ф., Кириллину И.В., Матюхину В.М., Михневичу Г.В., Петелину Д.П., Рассказову Ф.Н., Сиунову А.С. и др.

Вышеперечисленные проблемы в этих работах рассмотрены без учета колебания напряжения в сети и без учета влияния параметров асинхронной и конденсаторной нагрузок. Причем проблема управления коэффициентом РМ СЭС за счет изменения возбуждения синхронных двигателей при разгоне асинхронных двигателей с учетом нестабильности напряжения в сети в литературе рассмотрена еще недостаточно. Все это позволило сформулировать цель работы и поставить задачи научных исследований.

Целью работы является повышение эффективности управления коэффициентом РМ системы электроснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать уточненную математическую модель синхронного двигателя при его работе в электрической сети с нестабильным напряжением.

2. Разработать математическую модель объекта управления – системы электроснабжения, состоящей из линии электропередачи, силовых трансформаторов, статических компенсирующих устройств, синхронных и асинхронных двигателей и ориентированную на решение задач управления коэффициентом РМ СЭС.

3. Разработать методику расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным для определения активной и реактивной мощности при его пуске и методику вычисления приращений реактивной мощности синхронного двигателя при вариациях напряжения в электрической сети.

4. Разработать систему управления возбуждением синхронного двигателя, позволяющую обеспечить заданные значения погрешности стабилизации коэффициента РМ СЭС.

5. Создать экспериментальную установку и провести исследование алгоритмов управления возбуждением синхронного электродвигателя.

Объектом исследования является система электроснабжения с синхронным электроприводом.

Предметом исследования являются алгоритмы управления и структуры систем автоматического управления (САУ) коэффициентом РМ СЭС и экономическая эффективность их использования.

Методы решения

В работе использованы методы теории электрических систем, электрических машин, электрического привода, теории автоматического управления и методы математического моделирования на ПК в среде MATLAB Simulink.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Математическая модель обобщенной СЭС как объекта управления, отличающаяся учетом асинхронной и конденсаторной нагрузок, активных сопротивлений линии электропередачи и трансформаторов, а также учетом нестабильности напряжения в электрической сети.

2. Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным, отличающаяся от известных меньшей погрешностью, а также методики расчетов активной и реактивной мощности при разгоне асинхронного двигателя и вычисления приращений реактивной мощности для различных режимов синхронного двигателя при изменении напряжения в электрической сети.

3. Структурно-параметрический синтез и динамические характеристики САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом, отличающиеся учетом требований к точностным характеристикам системы в условиях разгона асинхронных двигателей.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Создана методика расчета и разработана система управления синхронным электроприводом с обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронных двигателей, что позволило уменьшить погрешность регулирования коэффициента РМ СЭС и тем самым понизить величину тарифного коэффициента на электроэнергию на 2,9%.

2. Разработаны вычислительные модели объекта управления и системы управления синхронным электроприводом с различными связями по переменным объекта управления.

3. Результаты работы внедрены в практику инженерного обслуживания электрооборудования кустовой насосной станции «Бариновская» (Акт внедрения АО «Самаранефтегаз»).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается использованием проверенных математических методов, научным обоснованием принятых допущений, использованием сер-

тифицированного программного продукта при проведении вычислительных экспериментов на ПК в среде MATLAB Simulink, а также использованием сертифицированных измерительных приборов при проведении экспериментальных исследований и подтверждается согласованностью расчетных данных с результатами экспериментальных исследований. Результаты работы использованы в практике инженерного обслуживания КНС «Бариновская» АО «Самаранефтегаз» и рекомендованы к внедрению АО «Самарская сетевая компания», а также использованы в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: 1) II Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в энергетике» (г. Пенза, 2014). 2) VI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2015). 3) X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, 2015). 4) VII международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2016). 5) XX аспирантско–магистерский семинар, посвященный «Дню энергетика» (Казань, 2016). 6) International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Astana, Kazakhstan, 2017). 7) XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems" 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation. А также на научных семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ общим объемом 6,34 п.л., в том числе 2 статьи в библиографических и реферативных базах данных Scopus и Web of Science, 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК РФ.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель системы электроснабжения как объекта управления коэффициентом РМ за счет управления напряжением возбуждения синхронного двигателя.

2. Математическая модель синхронного двигателя как объекта управления по цепи возбуждения с учетом неустойчивости напряжения в сети.

3. Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным и методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне.

4. Структуры системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения с синхронным электроприводом со связями по различным координатам объекта управления.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пунктам:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков, 12 таблиц и 3 приложения. Библиографический список состоит из 130 наименований на 12 страницах.

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности работы, посвященной совершенствованию САУ коэффициентом РМ СЭС 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 проведен анализ публикаций по математическому описанию синхронных машин с регулируемым возбуждением как объектов управления их переменными и рассмотрены принципы построения систем управления возбуждением этих машин. Эти вопросы являются наиболее изученными.

К настоящему времени менее изученными являются вопросы исследования эффективности систем управления переменными синхронного двигателя с учетом нестабильности напряжения в

электрической сети и наличия в математической модели СЭС ее элементов: силовых трансформаторов, линии электропередачи, асинхронной и емкостной нагрузки.

Вторая глава посвящена математическому описанию СЭС как объекта управления. Однолинейная схема СЭС представлена на рисунке 1.

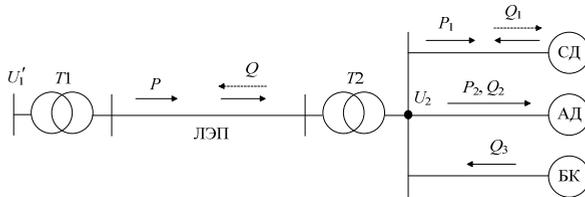


Рисунок 1 – Однолинейная схема обобщенной СЭС

В ее состав входят: один или два силовых трансформатора $T1$ и $T2$; воздушная или кабельная линия электропередач ЛЭП; батарея конденсаторов БК; асинхронные и синхронные двигатели АД и СД.

На однолинейной схеме использованы следующие обозначения: U_1' – напряжение на первичных обмотках трансформатора $T1$; U_2 – напряжение на вторичных обмотках трансформатора $T2$; P , P_1 , P_2 – активные мощности соответственно ЛЭП, СД, АД; Q , Q_1 , Q_2 , Q_3 – реактивные мощности соответственно ЛЭП, СД, АД, БК.

В работе рассматриваются СЭС машиностроительного предприятия (МСП) и кустовой насосной станции (КНС), основные узлы которых являются частными случаями обобщенной СЭС.

В состав СЭС МСП входят: $T1$ – ТМ 6300/110/6; АД – асинхронные двигатели суммарной мощностью $P = 3000$ кВт и средним коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,85$; БК – батарея конденсаторов; СД – СТД 1250.

В состав СЭС КНС входят: $T1$ – ТДТН 25000/110/35/6; ЛЭП – провод АС 120/19 длиной $l = 1,9$ км; $T2$ – ТМН 4000/35/6; СД – СТД 1250; АД – асинхронные двигатели суммарной мощностью $P = 1590$ кВт (А113-4М, А114-4М, 4АР225М4).

Математическая модель синхронного двигателя составлена при следующих допущениях: индуктивность машины не зависит от токов, так как ее магнитная система считается ненасыщенной; распределение индукции магнитных полей статора и ротора вдоль окружности зазора машины считается синусоидальным; машина выполнена так, что фазные обмотки статора и ротора относительно своих продольной и поперечной осей расположены симметрично; демпферная система машины представлена двумя демпферными обмотками – продольной и поперечной – магнитные оси которых

совпадают соответственно с продольной и поперечной осями ротора.

В системе уравнений электромагнитных процессов машины при неучете переходных процессов в обмотке статора

$$\begin{aligned} x_{ad} \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + RI_d + x_q I_q &= -U_2 \sin \theta; \\ -x_d I_d - E_q + RI_q &= -U_2 \cos \theta; \\ \frac{3x_d}{2} \frac{dI_d}{\omega_0 dt} + x_f \frac{dI_f}{\omega_0 dt} + R_f I_f &= U_f, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_d, x_q, x_{ad} – соответственно индуктивные сопротивления по продольной оси d , по поперечной оси q , взаимной индукции между обмоткой возбуждения и фазными обмотками; x_f, R_f – индуктивное и активное сопротивление обмотки возбуждения; I_d, I_q – действующие значения токов машины по осям d и q ; E_q – ЭДС по оси q , наводимая потоками обмотки возбуждения в фазных обмотках статора; θ – угол нагрузки двигателя; R – активное сопротивление фазной обмотки, не учитываются процессы, протекающие в демпферных обмотках.

Их действие учитывается вторым слагаемым в уравнении электромеханических процессов

$$\frac{\omega_{\text{мн}} J d^2 \theta}{p_m dt^2} + \frac{P_{\text{кр}}}{p_m s_{\text{кр}} \omega_{\text{мн}}} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{U_2 E_q}{x_d} \sin \theta = P_{\text{п}}, \quad (2)$$

где J – момент инерции электропривода; $\omega_{\text{мн}}$ – номинальная угловая скорость; $P_{\text{кр}}, s_{\text{кр}}$ – критические значения асинхронной мощности и скольжения; p_m – число пар полюсов; U_2 – напряжение узла нагрузки; $P_{\text{п}}$ – мощность сопротивления приводимого механизма.

Реактивная мощность синхронного двигателя

$$Q_1 = (U_2/x_d)(E_q \cos \theta - U_2). \quad (3)$$

Изменение реактивной мощности асинхронных двигателей при колебании напряжения в сети от $0,9U_{02}$ до $1,1U_{02}$ составляет

$$Q_2 = \left(A_0 + \frac{A_1 U_2}{U_{02}} + \frac{A_2 U_2^2}{U_{02}^2} \right) Q_{02}, \quad (4)$$

где $A_0 = 9,3$; $A_1 = -18,7$; $A_2 = 10,5$; U_{02} – установившееся значение напряжения; $Q_{02} = \sum_{i=1}^m Q_{2i}$; m – число асинхронных двигателей

Реактивная мощность конденсаторной установки

$$Q_3 = (U_2/U_{02})^2 Q_{03}, \quad (5)$$

где $Q_{03} = \sum_{j=1}^k Q_{3j}$; k – число секций конденсаторной установки.

Уравнение напряжений линии питания имеет вид:

$$U_2^2 = U_1 U_2 - P(R_{л} + R_{т}) - Q(x_{л} + x_{т}); \quad (6)$$

где $U_1 = U_1'/n$; U_1, U_2 – напряжения в начале и конце линии питания; $R_{л}, R_{т}, x_{л}, x_{т}$ – активное и индуктивное сопротивления линии и трансформаторов, приведенное к напряжению U_2 ; P, Q – активная и реактивная мощности, протекающие по линии; U_1' – напряжение на первичной обмотке трансформатора Т1; n – коэффициент трансформации трансформатора Т1.

Активная и реактивная мощность линии питания составляет:

$$P = P_1 + P_2; \quad (7)$$

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3, \quad (8)$$

После перехода в уравнениях (1-3), (5-8) к приращениям ($\Delta Q_2'' = Q_{2i}, \Delta Q_3'' = Q_{3j}$) по переменным $U_2, U_f, I_d, I_q, Q, Q_1, Q_2, Q_3, P, P_1, P_2, \theta, \text{tg } \varphi$ и исключения из системы уравнений (1) токов $\Delta I_d(p), \Delta I_q(p)$ получена система операторных уравнений, на основании которой построена структурная схема системы электроснабжения (рисунок 2). Ее выходными координатами являются приращения напряжения и коэффициента реактивной мощности.

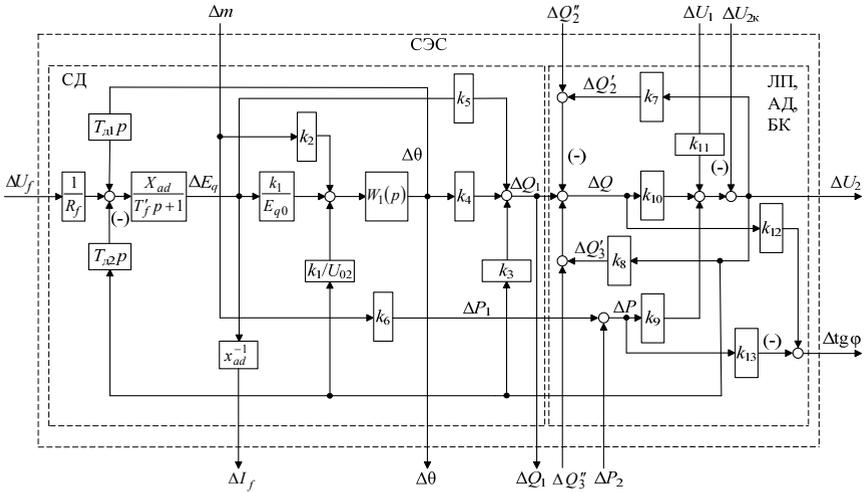


Рисунок 2 – Структурная схема СЭС

Передаточная функция $W_1(p) = (T_1^2 p^2 + 2\varepsilon_1 T_1 p + 1)^{-1}$, а значения параметров элементов схемы составляют: $R_f = 0,18$ Ом; $X_{ad} = 52$ Ом;

$T'_f = 0,367$ с; $U_{02} = 6000$ В; $T_{д1} = 162$ А·с; $T_{д2} = 0,034$ с/Ом. Значения коэффициентов $k_1 - k_{13}$, θ_0 , E_{q0} приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Режим СД	Параметры СД							
	$\theta, ^\circ$	$E_{q0}, \text{В}$	k_1	k_2	$k_3, \text{кА}$	$k_4, \text{кВА}$	$k_5, \text{кА}$	$k_6, \text{кВА}$
$Q_1 = Q_{1н}$	36,8	11800	-0,75	1,25	-0,078	-1297	0,147	2074
$Q_1 = 0$	50	9300	-1,19	1,55	-0,18	-1307	0,118	1628
$Q_1 = Q_{ср}$	43,4	10550	-0,97	1,4	-0,133	-1302	0,132	1851

Таблица 2

Значения параметров	Параметры						
	$k_7, \text{кА}$	$k_8, \text{кА}$	$k_9, \text{кА}^{-1}$	$k_{10}, \text{кА}^{-1}$	k_{11}	$k_{12}, \text{кВА}^{-1}$	$k_{13}, \text{кВА}^{-1}$
СЭС МСП	0,713	0,053	$-(0,08 \div 0,075)$	$-(0,138 \div 0,254)$	$1,4 \div 1,2$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$
СЭС КНС	0,26	$0 \div 0,1$	-0,014	$-(0,163 \div 0,242)$	1,04	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$0,75 \cdot 10^{-4}$

В данной работе предложена методика расчета сопротивлений R_1 , R_2 , x_k АД с короткозамкнутым (КЗ) ротором, отличающаяся от альтернативных методик тем, что к известным уравнениям электромагнитной мощности при номинальном $s = s_n$ и критическом $s = s_k$ скольжениях добавлено третье уравнение – уравнение реактивной мощности при скольжении $s = s_n$

$$Q_{2н} = U_n^2 x_k / \left((R_1 + R_2 / s_n)^2 + x_k^2 \right),$$

где $Q_{2н} = P_n / 2b_n$ зависит от номинальной активной мощности двигателя P_n и кратности момента b_n при критическом скольжении.

В результате получена система трех уравнений с тремя неизвестными, из решения которой однозначно определены R_1 , R_2 , x_k при $s = s_n$, что позволило определить из других выражений $R_2(1)$, $x_k(1)$ при $s = 1$ и сопротивление контура намагничивания x_μ .

Блок схема алгоритма расчета этих сопротивлений приведена на рисунке 3. Средняя величина погрешность расчетов $\delta_{ср} = 1,9\%$, что более чем в 3 раза меньше погрешности расчетов по альтернативным методикам.

Усредненная по времени разгона погрешность расчета активной и реактивной мощности при пуске асинхронного двигателя по предложенной методике, не учитывающей электромагнитные процессы, составляет 3,8%.

Погрешность методики вычисления приращений реактивной мощности для различных режимов синхронного двигателя при изменении напряжения в электрической сети равна 3,5%.

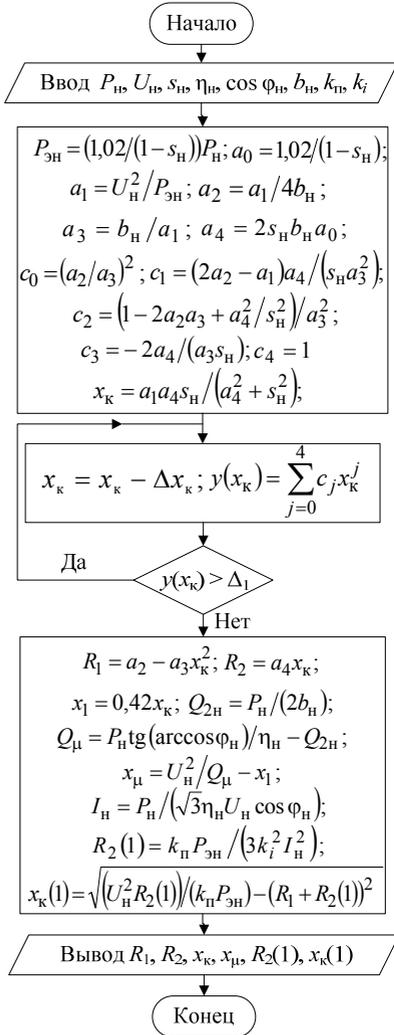


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений АД с КЗ ротором

ного угла или реактивной мощности СД); $W_{p2}(p)$ – передаточная функция регулятора тока возбуждения; $W_{п}(p)$ – передаточная функция тиристорного преобразователя; S1-S4 – ключи. Замыканием соответствующих ключей из S1-S4 набирается структура исследуемой системы.

Проведено исследование влияния обратной связи по напряжению узла нагрузки на динамические характеристики объекта управления. Максимальная величина динамической погрешности переходной характеристики $\Delta\theta(t)$ без учета этой связи составляет 8,7%, а характеристики $\Delta\text{tg } \varphi(t)$ при пуске асинхронного двигателя – 24,5%.

В третьей главе рассматриваются САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом, имеющим связи по различным переменным объекта управления и ее динамические характеристики.

Обобщенная функциональная схема системы управления коэффициентом реактивной мощности представлена на рисунке 4 с буквенными обозначениями: СД – синхронный двигатель; ЛП, АД, БК – линия питания, асинхронные двигатели, батарея конденсаторов; ПЗУ – программно-задающее устройство; k_t, k_m, k_y – коэффициенты датчиков соответственно тока возбуждения, реактивной мощности, внутреннего угла СД; $W_{p1}(p)$ – передаточная функция первого регулятора (регулятор внутреннего

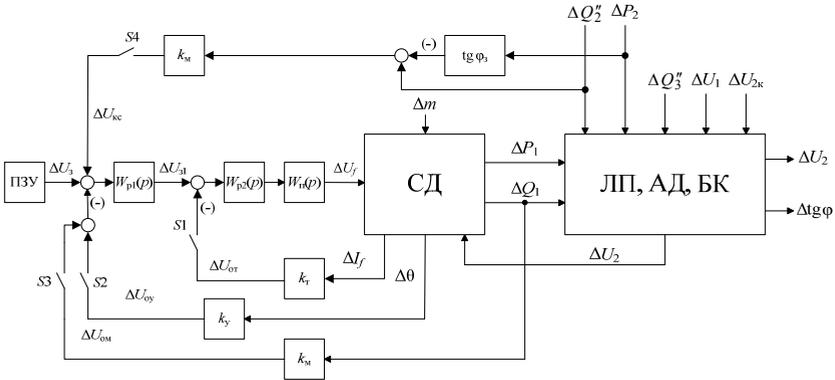


Рисунок 4 – Обобщенная функциональная схема системы управления коэффициентом РМ

Показано, что синтез регуляторов контуров синхронного электропривода следует производить по критерию минимума времени регулирования $t_p = t_{\min}$ при допустимых ограничениях на перерегулирование $\sigma \leq \sigma_{\text{доп}}$ и величину запаса устойчивости по фазе $\Delta\varphi \geq |\Delta\varphi_{\text{доп}}|$, так как при действии возмущений (коротких замыканиях, колебаниях напряжения, коммутации нагрузок и т.д.) в синхронном двигателе возникают колебательные переходные процессы, в течение которых он будет перегружен как по мощности, так и по электромагнитному моменту, что неблагоприятно отражается на долговечности электрической и механической части электропривода. Поэтому для уменьшения негативного влияния этих процессов время их действия следует минимизировать.

Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутой системы управления РМ $\Delta Q_1(p)$ с внутренним контуром регулирования $\Delta I_f(p)$ и ПИ-регулятором реактивной мощности

$$W_1(p) = (1,58T_\mu p + 1) / T_{n2} p$$

для двух вариантов электропривода $T_1 = (0,075; 0,31)$ с, $\varepsilon_1 = (0,38; 0,097)$ при $T_{n2} = T_\mu = 0,01$ с представлены на рисунке 5.

Переходные характеристики во внешнем контуре по заданному воздействию $\Delta U_3(t) = 0,1$ В при $T_\mu = 0,01$ с, $T_1 = 0,31$ с, $\varepsilon_1 = 0,097$ для различных значений T_{n2} представлены на рисунке 6. Из анализа представленных характеристик следует, что наименьшее время регулирования $t_p = 0,075$ с ($\Delta\varphi = 47\%$, $\Delta\sigma = 12\%$) принадлежит контуру с $T_{n2} = 0,01$ с.

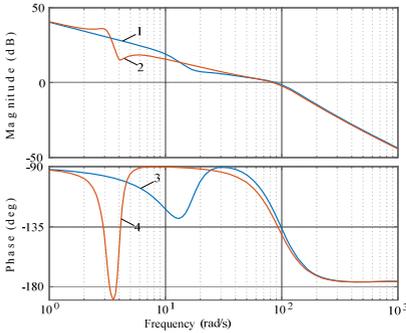


Рисунок 5 – Логарифмические амплитудные (1, 2) и фазовые (3, 4) частотные характеристики разомкнутого контура регулирования ΔQ_1 : 1,3 – $T_1 = 0,075$ с, $\varepsilon_1 = 0,38$; 2,4 – $T_1 = 0,31$ с, $\varepsilon_1 = 0,097$

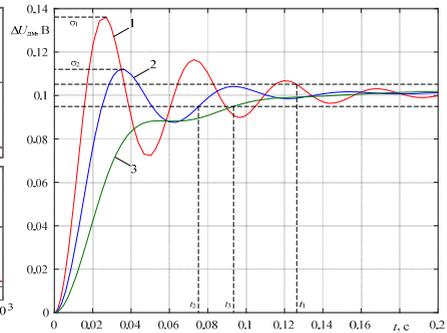


Рисунок 6 – Переходные характеристики в двухконтурной системе управления ΔQ_1 по задающему воздействию $\Delta U_3(t) = 0,1$ В: 1 – $T_{11} = 0,005$ с; 2 – $T_{11} = 0,01$ с; 3 – $T_{11} = 0,02$ с

Рассмотрен синтез регуляторов одноконтурных систем управления током возбуждения, углом нагрузки, реактивной мощностью и двухконтурных систем управления углом нагрузки и реактивной мощностью синхронного двигателя для двух вариантов электропривода.

Из сравнения динамических характеристик одноконтурных и двухконтурных электроприводов с обратными связями по углу нагрузки $\Delta\theta$ и мощности ΔQ_1 предпочтение следует отдавать двухконтурным электроприводам, так как в них конструктивно проще ограничить максимальную величину тока возбуждения, а регуляторы в электроприводах с обратной связью по углу $\Delta\theta$ имеют более простую структуру.

Показано, что в электроприводе с обратной связью по углу нагрузки при уменьшении напряжения в сети на 600 В происходит увеличение реактивной мощности в установившемся режиме на $\Delta Q_1 = 240$ кВАр, а коэффициента РМ СЭС на $\Delta \text{tg } \varphi = 0,08$.

При экономическом обосновании САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом (ЭП) с обратной связью по РМ СД ΔQ_1 и со связью по мощности асинхронной нагрузки показано, что ее применение позволяет понизить величину тарифного коэффициента на 2,9% и тем самым уменьшить оплату за электроэнергию на 1,56 млн. руб/год.

Установлено, что погрешность в установившемся режиме САУ коэффициентом РМ СЭС с синхронным ЭП, имеющим отрицательную обратную связь (ООС) по РМ $\Delta Q_1(p)$ и компенсирующую связь (КС) по ΔP_2 и $\Delta Q_2''(p)$ составляет $\Delta \text{tg } \varphi = 0,0075$, что значительно меньше по сравнению с другими схемами (таблица 3).

№	САУ коэффициентом РМ с СЭП	Погрешность $\Delta \text{tg } \varphi$
1	Без ООС и КС	0,214
2	С ООС по ΔI_f	0,2
3	С ООС по $\Delta \theta$	0,26
4	С ООС по ΔQ_1	0,185
5	С ООС по ΔQ_1 и КС по $\Delta Q''_2$ и ΔP_2	0,0075

Программа задания коэффициента РМ, формируемая ПЗУ в зависимости от времени суток (n – число месяца), представлена на рисунке 7.

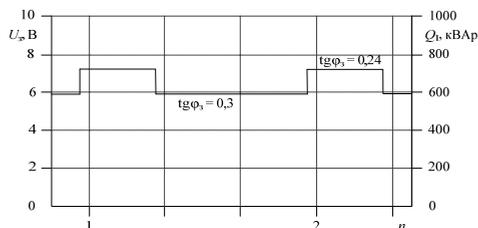


Рисунок 7 – Временная зависимость сигнала задания U_s и РМ Q_1 при работе электропривода в режиме малых и больших нагрузок

Показано, что с целью предотвращения перегрузки синхронного двигателя реактивной мощностью на подстанции необходима установка комплектного статического компенсирующего устройства УКРЛ 56 с номинальной мощностью 300 кВАр, что позволило понизить РМ синхронного двигателя до допустимой величины $Q_d = 0,6Q_{1н}$ ($Q_{1н} = 632$ кВАр).

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

Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным использована для определения дополнительного превышения температуры обмоток статора электродвигателя А114-4М при пуске и самозапуске асинхронного электропривода насоса марки СЭ 1250-70, что подтверждается актом внедрения.

Показано, что экспериментальные динамические характеристики системы управления коэффициентом РМ с синхронным электроприводом без обратных связей и со связью по реактивной мощности двигателя системы управления коэффициентом РМ с погрешностью менее 6% в статике и менее 10% в динамике совпадают с расчетными.

Эти результаты подтверждают удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных и свидетельствует о правильности тех положений и допущений, которые были приняты при теоретическом исследовании.

Основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель синхронного электродвигателя в виде структурной схемы с передаточными функциями типовых звеньев, отличающаяся от известных моделей наличием в ней элементов, учитывающих колебания напряжения в сети.

2. Разработана математическая модель обобщенной СЭС как объекта управления параметрами ее режима, отличающаяся от известных моделей учетом асинхронной и конденсаторной нагрузок, активных сопротивлений линии электропередачи и трансформаторов, а также учетом нестабильности напряжения в электрической сети.

3. Разработана методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным, на базе которой построена методика расчета активной и реактивной мощности при его разгоне. Усредненная величина погрешности методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя не превышает 2%. Погрешность методики расчета активной и реактивной мощности, неучитывающей влияние электромагнитных процессов, составляет 3,8%.

4. Разработана методика расчета приращений реактивной мощности для различных режимов работы синхронного двигателя при колебании напряжения в сети. В номинальном режиме погрешность методики равна 3,5%.

5. Установлено, что погрешность системы управления коэффициентом РМ СЭС с синхронным электроприводом с отрицательной обратной связью по реактивной мощности синхронного двигателя и компенсирующей связью по активной и реактивной мощности асинхронной нагрузки меньше погрешности альтернативных систем управления с другими обратными связями и составляет $\Delta \text{tg } \varphi_{\Sigma} = 0,0075$, что значительно меньше заданного значения.

6. Разработана САУ коэффициентом РМ с синхронным электроприводом, применение которой позволило понизить тарифный коэффициент на электроэнергию на 2,9% и тем самым получить экономический эффект от участия в регулировании реактивной мощности в размере 1,5 млн. рублей в год.

7. Исследования динамических характеристик системы управления коэффициентом РМ системы электроснабжения на экспериментальной установке с синхронным двигателем номинальной

мощностью $P_n = 5$ кВт с обратной связью по его реактивной мощности и компенсирующей связью по мощности асинхронной нагрузки показали, что отклонение расчетных значений угла нагрузки и реактивной мощности синхронного двигателя от экспериментальных не превышает в статике 6%, в динамике – 9%, а погрешность регулирования коэффициента реактивной мощности – 2,2%.

Полученные результаты подтверждают достоверность теоретических положений и допущений, принятых при проведении исследования и эффективность систем управления возбуждением синхронного двигателя.

Личный вклад автора состоит: в разработке математической модели системы электроснабжения, ориентированной на управление коэффициентом реактивной мощности; в разработке уточненной математической модели синхронного двигателя при его работе в электрической сети с нестабильным напряжением; в разработке методики расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным; в разработке системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения; в компьютерном моделировании синхронного электропривода с различными обратными связями и обработке результатов вычислительных и натуральных экспериментов.

Рекомендации

Результаты проведенных научных исследований рекомендуется внедрять на нефтяных промыслах, а также на промышленных предприятиях химической, металлургической, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности, системы электроснабжения которых содержат синхронные и асинхронные электродвигатели.

Методика расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя рекомендуется к внедрению в соответствующих проектных и пуско-наладочных организациях при выборе уставок в схемах защиты от многофазных замыканий и замыканий на землю, расчетах пусковых токов и продолжительности разгона электропривода, моделировании переходных режимов и т.д.

Основные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать также при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам электротехнических специальностей в технических учебных заведениях страны.

Перспективы дальнейшей разработки проблемы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание систем управления коэффициентом РМ:

– в состав которых входят несколько синхронных двигателей с регулируемым возбуждением;

– с управлением возбуждения синхронных двигателей в функции РМ асинхронных и синхронных двигателей, участвующих в режимах пуска и самозапуска;

– с дискретно-непрерывным алгоритмом управления, когда на время интенсивного потребления РМ, параллельно с синхронными двигателями, включается емкостная нагрузка.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в библиографических и реферативных базах данных Scopus и Web of Science:

1. Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A. The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 29-30 June, 2017 – IEEE Xplore, 2017. – Англ.

2. Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A. Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference series, Vol. 944, conf. 1, doi:10.1088/1742-6596/944/1/012064, 2018. – Англ.

- в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Котенев В.И., Котенев А.В., Осипов В.С., Кочетков В.В. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки, Ч. 2 –2012. – С. 127–135.

4. Котенев В.И., Кочетков В.В., Осипов В.С. Определение параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с фазным и короткозамкнутым ротором. // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки». – 2013. -№3(39). – С. 175-184.

5. Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная модель системы электроснабжения при управлении параметрами ее режима. // Известия высших учебных заведения. Электромеханика, вып. 5 – 2014. – С. 103-106.

6. Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения изменением реактивной мощности синхронного двигателя и статических компенсирующих устройств. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки, Ч. 4 (44) –2014. – С. 122-129.

7. Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В. Определение сопротивлений короткозамкнутого асинхронного двигателя по каталожным данным. // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки». – 2016. - №1(49). – С. 103-109.
 8. Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным. // Известия высших учебных заведения. Электромеханика, вып. 6 – 2016. – С. 13-17.
- в прочих сборниках и материалах:**
9. Котенев В.И., Кочетков В.В. Дискретно-аналоговая система управления напряжением узла нагрузки электрической системы. // II Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в энергетике»: сборник статей, вып. II, Пенза, 2014 – С. 71-75.
 10. Кочетков В.В. Шишков А.Г. Комплексная система автоматического управления параметрами узла нагрузки системы электропитания. В сб.: X Международная молодежная научная конференция "Тинчуринские чтения", т. 1 – Казань, 2015 – С. 87-88.
 11. Котенев В.И., Кочетков В.В., Петров В.В. Моделирование системы автоматического управления напряжением системы электропитания с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI международной научно-практической конференции, Саратов, 2015 – С. 126-127.
 12. Котенев В.И., Кочетков В.В., Елькин Д.А. Математическая модель синхронного двигателя в электрической сети с нестабильным напряжением. // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII международной научно-практической конференции – Саратов, 2016 – С. 105-106.
 13. Кочетков В.В. Изменение мощности и напряжения в узле нагрузки электрической системы при пуске асинхронного двигателя с учетом понижения напряжения в сети. // Материалы докладов XX аспирантско–магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», т. 1 – Казань, 2016 – С. 25-28.
 14. Кочетков В.В. Управление возбуждением синхронного двигателя на постоянство реактивной мощности узла нагрузки электрической системы. // Материалы докладов XX аспирантско–магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», т. 1 – Казань, 2016 – С. 28-31.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 3 от 11 сентября 2018 г.)
Заказ № 529 Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244