

На правах рукописи

ШИНКЕВИЧ Алексей Григорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СОВМЕСТИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ
СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА И НАГРУЗКИ.

Специальность 05.14.02 – электростанции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2003

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Орлов Анатолий Васильевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Абрамович Борис Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Латышко Владимир Данилович

Ведущая организация: Инженерный центр Научно-производственного объединения ОАО «Звезда».

Защита состоится “09” апреля 2004 г. в 10 часов на заседании диссертационного Совета К 212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “09” марта 2004 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета К 212.229.02
к.т.н., доцент

А.В. Терешкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Энергетика является определяющей отраслью экономики страны и важнейшей составляющей существования. При этом, с одной стороны, единая энергетическая система (ЕЭС) России, централизованное обеспечение потребителей электроэнергией и теплом – это, безусловно, основа и главный гарант надежного энергоснабжения страны, ее энергетической безопасности. С другой стороны, по разным оценкам от 50 до 70% территории России не имеют централизованного электроснабжения. Обеспечить этих потребителей электроэнергией и теплом возможно только с помощью малой энергетики, т.е. системами автономного энергоснабжения (САЭ).

Основной признак САЭ – это соизмеримость электрофизических параметров источника электроэнергии и участков системы. Это очень важное свойство, т.к. именно оно определяет гораздо большую, по сравнению с локальными участками ЕЭС, чувствительность САЭ к совместимости параметров нагрузки в системе между собой и источником энергии.

Переход локального участка ЕЭС (ЛУ ЕЭС) в режим САЭ приводит к принципиальным изменениям соотношения электрофизических параметров, т.к. источником энергии в ЛУ ЕЭС был трансформатор, а стал – синхронный генератор соизмеримой мощности с нагрузкой.

В такой системе меняются не только параметры переходных процессов (набросов и сбросов нагрузки и коротких замыканий) но и меняется реакция на нелинейную и емкостную нагрузку. Ограниченные возможности синхронного генератора по потреблению реактивной мощности приводят к искажению синусоиды при наличии потребителей несинусоидального тока и неуправляемому росту напряжения при емкостной нагрузке.

Последнее особенно важно, т.к. при отключении электропитания ЛУ ЕЭС от трансформаторной подстанции, во время перехода на питание от ДЭС оказываются отключенными все потребители. После запуска ДЭС и включения ге-

нераторного автомата на синхронный генератор оказываются подключенными разветвленные кабельные сети, т.е. емкостная нагрузка. Картина усугубляется, если в ЛУ ЕЭС были потребители искажающие синусоиду (преобразователи частоты, индукционные нагреватели и др.), для компенсации влияния которых на качество электроэнергии применялись резонансные фильтрокомпенсирующие и устройства компенсации $\cos \varphi$. При отключенных потребителях это тоже емкостная нагрузка. Реакцией может быть лавинообразный рост напряжения или такое же нарастание искажения синусоиды напряжения.

В связи с вышеизложенным, исследование возможности использования в САЭ синхронных генераторов источников электроэнергии – дизельгенераторов в качестве устройств компенсации избытка емкостной мощности, разработка методики определения максимально допустимой емкостной нагрузки синхронных генераторов и анализ параметров, влияющих на эту величину, является актуальной научно-практической задачей.

Целью диссертационной работы является разработка методов и технических средств для стабилизации параметров качества электрической энергии в САЭ путем компенсации избытка емкостной мощности САЭ синхронными генераторами источника.

Научно-техническая проблема применения в САЭ способа компенсации избытка емкостной мощности синхронными генераторами резервного источника включает следующие основные вопросы:

- определение максимально допустимой емкостной нагрузки синхронных генераторов;
- определение параметров, влияющих на величину допустимой емкостной нагрузки генератора;
- исследование возможности повышения величины допустимой емкостной нагрузки серийно выпускаемых генераторов;
- исследование влияния емкости кабельных линий на качество переходных процессов в системе, устойчивости нагрузки, а также устой-

чивости параллельной работы дизель-генераторов источника между собой и с промышленной сетью.

- исследование условий самовозбуждения синхронных генераторов и асинхронных двигателей в САЭ с избыточной емкостью.

Методика выполнения исследований. Для исследования электрофизических процессов самовозбуждения синхронных генераторов при емкостной нагрузке, определения зон устойчивой параллельной работы дизельгенераторов на емкостную и смешанную нагрузку в различных режимах функционирования САЭ и разработки конструктивных решений по синхронным генераторам использовались методы математического моделирования электрических машин и анализ их характеристических уравнений по критериям Найквиста и Гурвица.

Для исследования эффективности предлагаемых технических решений использовались результаты натурных исследований полномасштабной физической модели на испытательном стенде завода ОАО «Звезда».

Научная новизна. Предложен новый метод компенсации емкостной мощности в САЭ на основе специфических конструктивных особенностей явнополюсных синхронных генераторов, используемых в дизельных электростанциях САЭ, путем перекрытия части сечения магнитопровода в зоне полюсного основания немагнитной прокладкой, что обеспечивает нелинейность характеристики намагничивания в начальной части и увеличивает за счет этого компенсирующую способность синхронного генератора.

Создана общая методика определения основных параметров этих генераторов, для обеспечения их параметрической совместимости с остальным оборудованием САЭ.

Исследованы условия самовозбуждения синхронных генераторов и асинхронных двигателей и определены условия возникновения резонанса в САЭ с избыточной емкостью.

Разработан комплекс рекомендаций по проектированию систем возбуждения СТ с увеличенным воздушным зазором, их универсальная структура, ал-

горитм системы автоматического регулирования возбуждения и даны рекомендации по ее практическому внедрению.

Исследованы вопросы устойчивости ДГ усовершенствованной конструкции и переходных процессов в САЭ.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Проведенные исследования показывают практическую целесообразность и технические преимущества САЭ с компенсацией избытка емкостной мощности синхронными генераторами источника. Совмещение для этих генераторов функций выработки электроэнергии и компенсации избытка емкостной мощности не ухудшает статические и динамические характеристики САЭ и способствует улучшению качества электрической энергии, повышению надежности и экономических показателей САЭ за счет исключения из ее состава специальных индуктивных устройств.

Научные исследования, выполненные в настоящей работе, послужили основой для разработки ОАО «Звезда» технических требований на ДГ с синхронным генератором, способным обеспечить нормальную работу при реальных величинах емкостной мощности САЭ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на V Санкт-Петербургской ассамблее молодых ученых и специалистов: “Технические науки – предприятиям региона” (Санкт-Петербург, 2000), Международной научно-практической конференции: “Постсоветское градостроительство, проблемы и перспективы” (Санкт-Петербург, 2001) и НТС ОАО «Звезда» 2002, 2003 г.г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 3 печатные работы.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 160 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 53 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 119 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается, что новое законодательство создало предпосылки для активного развития САЭ, анализируется современное состояние систем энергоснабжения автономных объектов и перспективы повышения их эффективности и развития в связи с принятием Думой закона «Об электроэнергетике».

Акцентируется внимание на отличительных особенностях САЭ от крупных энергосистем, а также на вопросе параметрической совместимости силового электрооборудования, критерием которой является запас генерирующих установок по электромагнитной мощности, т.к. ограниченные возможности синхронных генераторов источников по потреблению реактивной мощности приводят к искажению синусоиды напряжения и тока, в особенности при наличии нелинейных потребителей и неуправляемому росту напряжения. Обосновывается актуальность и направленность темы диссертационной работы.

В первой главе производится анализ проблем обеспечения стабильности параметров качества электроэнергии в САЭ с учетом их современного состояния и перспектив использования.

Производится сравнение существующих традиционных способов компенсации емкостной мощности в САЭ по различным признакам, таким как: конструкционное исполнение, назначение и область применения, виды систем компенсации. Рассматриваются обобщенные достоинства и недостатки наиболее распространенных путей компенсации емкости на автономных объектах.

На основе анализа этих сведений вносится предложение об использовании доработанных синхронных генераторов автономных источников в целях компенсации избытка емкостной мощности. Основным преимуществом такого способа является то, что процесс компенсации, также как и выработки электроэнергии, естественно автоматизирован, т.е. генератором компенсируется такая величина избытка емкостной мощности, которая имеется в системе в данный

момент. Причем, емкостная нагрузка генератора оказывает благоприятное влияние на качество переходных процессов в системе, выражающееся в сокращении длительности и уменьшении величины изменения напряжения.

В заключение главы формулируется цель и задачи исследования диссертационной работы.

Во второй главе дается анализ особенностей работы синхронных генераторов на емкостную нагрузку и излагается методика определения основных параметров генераторов, обеспечивающих их нормальную работу в САЭ без индуктивных устройств, определены факторы, влияющие на значение допустимой для синхронных генераторов емкостной нагрузки, и рассмотрены некоторые особенности электромагнитных переходных процессов синхронных генераторов при изменении величины емкостной нагрузки.

На рис.1 приведены диаграммы напряжений синхронного генератора для индуктивного и емкостного характера нагрузки.

Максимально допустимое значение емкостного тока генератора имеет место при $\dot{E}_0=0$, т.е. при полном отсутствии тока возбуждения генератора, когда номинальное значение напряжения на зажимах генератора обеспечивается намагничивающим потоком реакции якоря по продольной оси машины.

Допустимое значение емкостной нагрузки синхронного генератора (Q_3) в относительных единицах:

$$Q_3 = \frac{S_2}{x_{*d}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что, зная полную мощность синхронного генератора S_2 и его синхронное реактивное сопротивление по продольной оси x_{*d} можно определить величину предельной емкостной нагрузки, при которой $U=U_n$, $I_B=0$ и синхронный генератор становится неуправляемым. При емкостной нагрузке, превышающей значение допустимой емкостной нагрузки генератора (т.е. $x_c < x_d$), напряжение на зажимах генератора будет выше номинального.

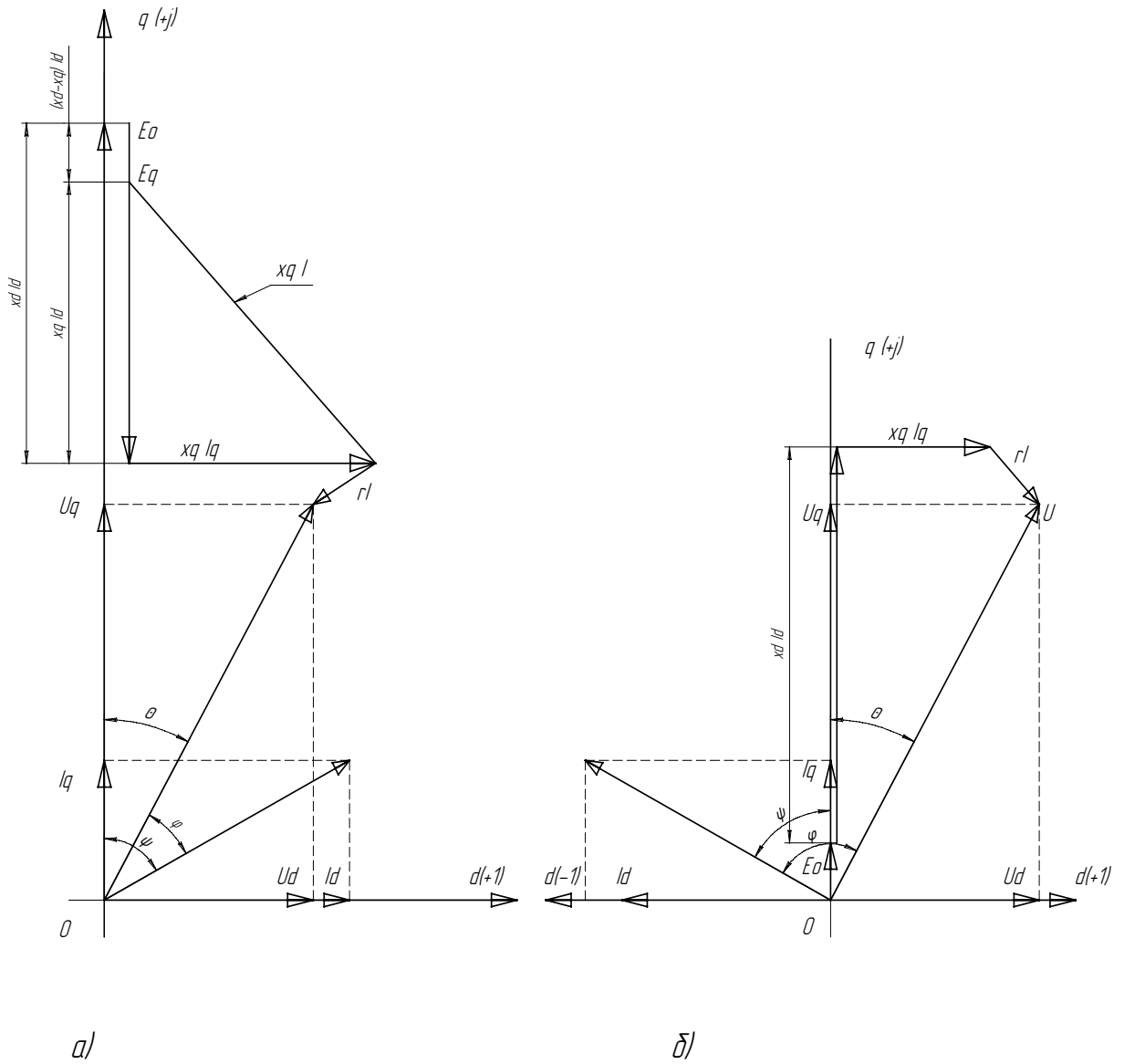


Рис. 1

Как видно из уравнения (1), величина допустимой емкостной нагрузки генератора определяется синхронным реактивным сопротивлением по продольной оси $x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}$. Величины x_{ad} и $x_{\sigma a}$ определяются выражениями:

$$x_{ad} = \frac{2 \cdot m \cdot f \cdot l \cdot (k_{wa} \cdot W)^2 \cdot k_d \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot D}{P \cdot \delta \cdot 10^8}; \quad (2)$$

$$x_{\sigma a} = \frac{2 \cdot m \cdot f \cdot l \cdot (k_{wa} \cdot W_a)^2}{P \cdot \delta \cdot 10^8} \left[\frac{0,8 \cdot \pi^2 \cdot k_{ba} (k_{xb} \lambda_{\kappa 3} + \lambda_n)}{mqk_{wa}^2} + \frac{k_d 0,4 \pi D}{P \cdot \delta \cdot k_w^2} \cdot \sum_{n \neq 1} \left(\frac{k_{wn}}{n} \right)^2 + \frac{1,6}{l} (l_{\lambda 1} + 2l_{\lambda 2}) \right], \quad (3)$$

где k_{wa} , W_a , k_d , p , δ , k_{ba} , q , k_{xb} , m , $\lambda_{\kappa 3}$, λ_n , k_{wn} – общепринятые обозначения конструктивных и электрофизических параметров явнополусных синхронных генераторов.

Выражения (2) и (3) дают представление о зависимости x_d от конструктивных параметров машины.

Величина воздушного зазора δ наравне с размерами D и l генератора является одним из наиболее важных параметров машины, определяющим допустимую емкостную нагрузку и техникоэкономические показатели машины.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что при использовании в емкостном квадранте синхронного генератора, рассчитанного для работы в индуктивном квадранте, повышение его допустимой емкостной нагрузки может быть достигнуто за счет увеличения магнитного сопротивления цепи машины, т.е. увеличения результирующего воздушного зазора. При этом возможны два варианта увеличения магнитного сопротивления машины:

1. увеличение непосредственно воздушного зазора δ между статором и ротором;
2. устройство немагнитной прокладки, частично перекрывающей сечение магнитопровода между полюсами и остовом вала ротора).

Из этих вариантов наиболее целесообразным следует признать вариант 2.

Система АРВ генераторов стремится поддержать заданное напряжение на зажимах генератора. При этом в генераторе после наброса емкостной нагрузки происходят следующие процессы:

- первоначальное повышение напряжения до значения $E \cdot \frac{x_c}{x_c - x_d}$, которое по мере затухания свободных токов в демпферной обмотке и обмотке возбуждения стремится к значению $E \cdot \frac{x_c}{x_c - x_d}$, (с учетом насыщения магнитной цепи машины);
- снижение тока возбуждения системой АРВ, способствующее поддержанию заданного уровня напряжения.

Напряжение на зажимах генератора в переходном режиме определяется из условия наложения вышеуказанных явлений.

Повышение напряжения на зажимах генератора приводит к насыщению магнитной цепи машины, а следовательно к уменьшению значений реактивных сопротивлений генератора (рис.2).

При включении емкостной нагрузки на невозбужденный генератор, рост напряжения начинается от величины напряжения, обусловленной остаточной э.д.с. машины и проходит последовательно все точки характеристики намагничивания до установившегося режима. Емкостный ток, протекая по цепи статора, приводит к увеличению магнитного потока машины, что вызывает увеличение напряжения на зажимах генератора и внешней цепи. Увеличение напряжения приводит к дальнейшему увеличению емкостного тока.

Максимальный провал напряжения под действием систем АРВ генераторов будет определяться факторами:

- скоростью нарастания тока возбуждения, обусловленного системой АРВ;
- скоростью затухания свободных токов в демпферной обмотке и обмотке возбуждения.

Генератор ЕС-52-4, $I_H=15,7$ А, $\cos\varphi=0,8$, $n=1500$ об./мин., 5 кВт, $U_H=230$ В
 $X^*d=1,98$ (ненасыщенное значение из опытов Х.Х. и К.З.), I_p при К.З. и номинальном токе 6 А

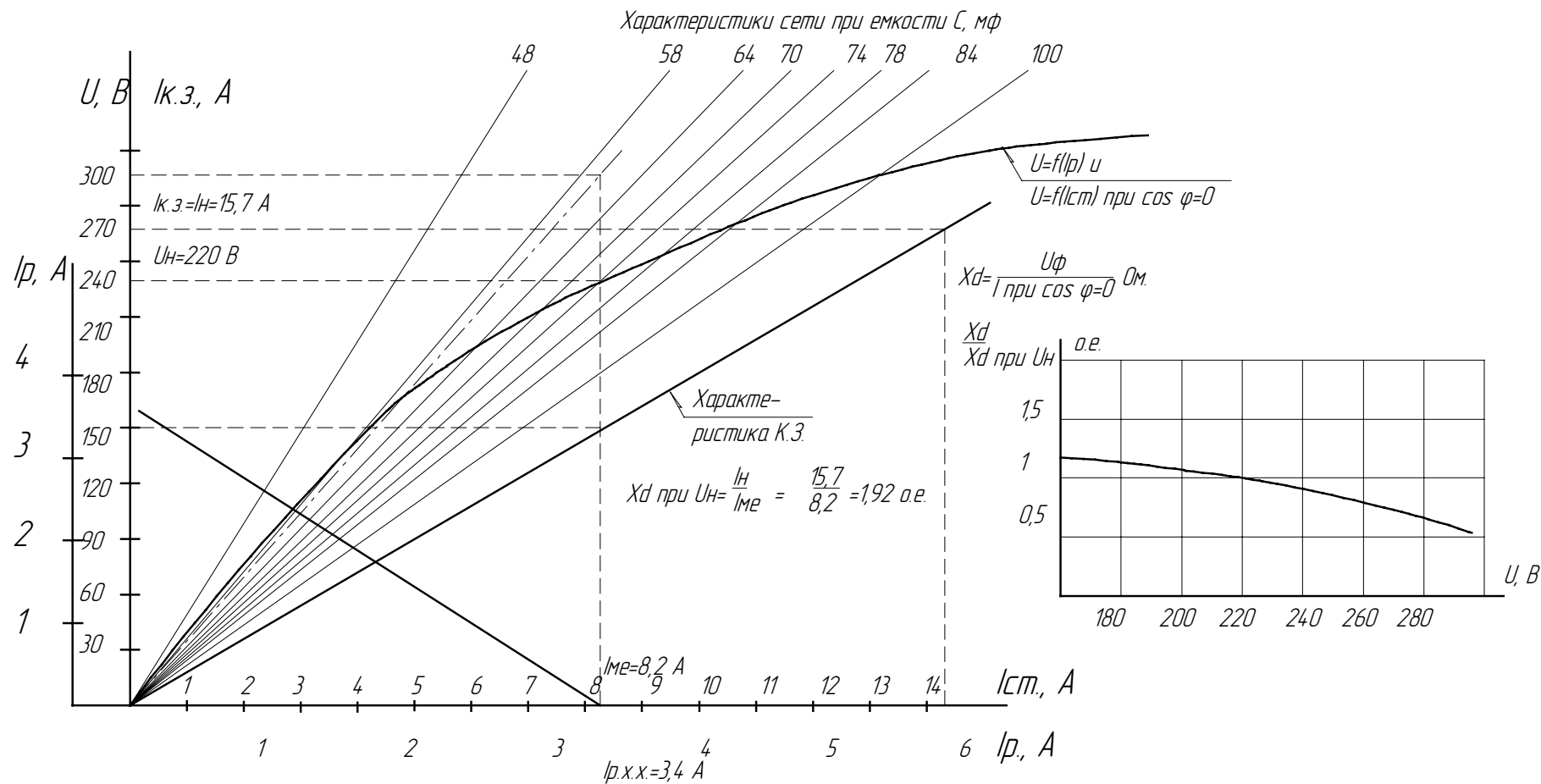


Рис. 2.

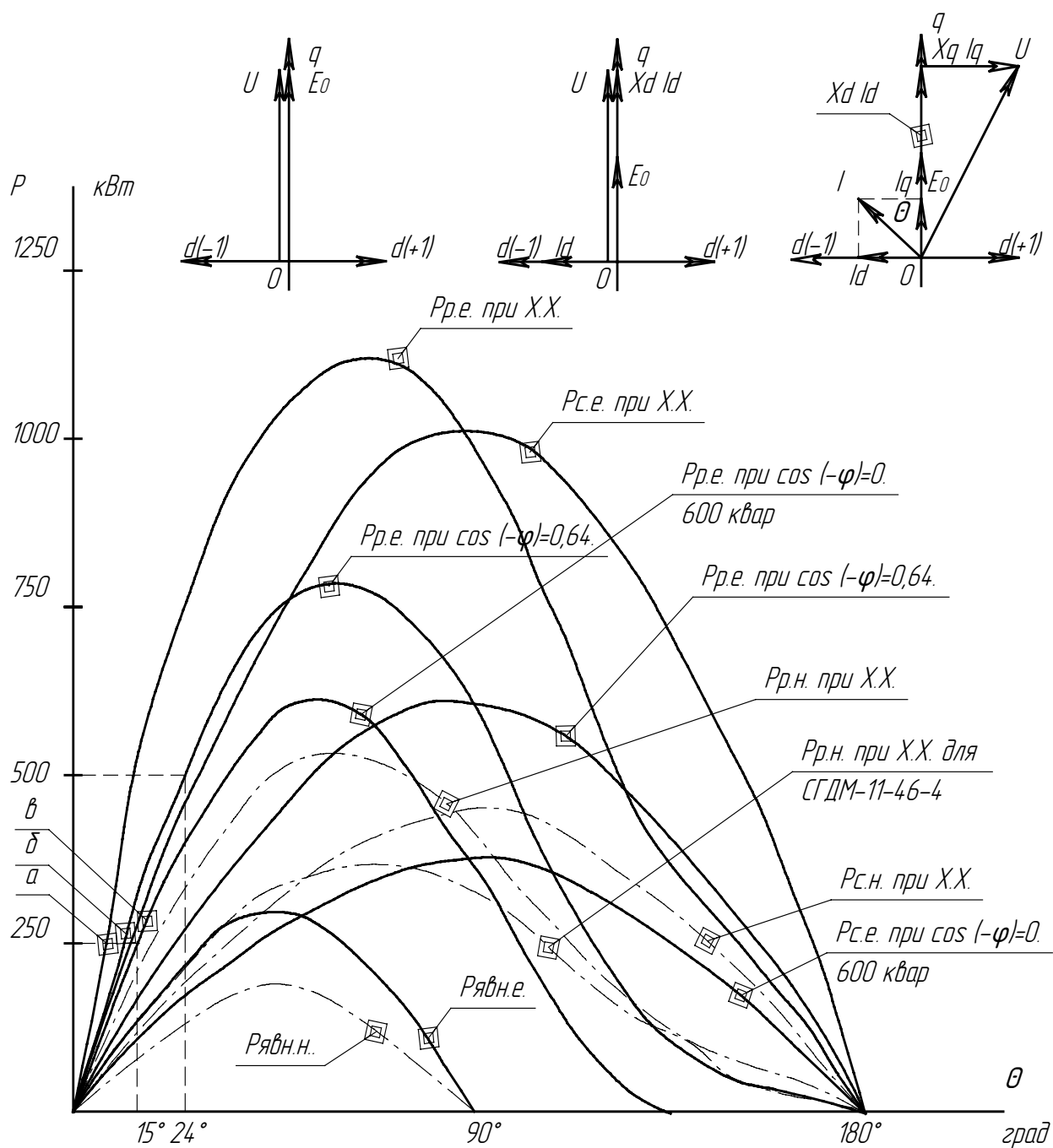
В третьей главе приведены результаты исследований условий самовозбуждения синхронных генераторов и асинхронных двигателей в САЭ на основе требований к структуре автономной системы энергоснабжения, описанных в первой главе путем исследования характеристического уравнения системы.

Анализ расчетных данных показывает, что зона асинхронного самовозбуждения зависит от конструкции демпферной обмотки машины, причем, наличие демпферной обмотки приводит к некоторому расширению зоны асинхронного самовозбуждения. Продольная демпферная обмотка практически не оказывает влияния на верхнюю границу асинхронного самовозбуждения, и несколько сдвигает нижнюю границу в сторону меньших значений x_c . Этот сдвиг зависит от величины постоянных времени T'_{d0} и T''_{d0} . Поперечная демпферная обмотка приводит к некоторому расширению как верхней, так и нижней границы асинхронного самовозбуждения. При этом, расширение границ самовозбуждения определяется величиной постоянных времени T'_{d0} и T''_{d0} . Для генераторов СГД-625-1500 установлено, что если в цепи, "машина-емкость" имеется активное сопротивление $r_a > \frac{x_d - x_q}{2}$ достаточное для устранения синхронного самовозбуждения, то этого значения активного сопротивления достаточно также для устранения асинхронного самовозбуждения машины без демпферной и с демпферной обмоткой.

Расчеты подтверждают также, что физическая природа резонанса при работе синхронных генераторов на емкостную нагрузку в САЭ заключается в образовании колебательного контура из значительных емкостей протяженных кабельных линий и индуктивности синхронных генераторов, трансформаторов и линий электропередачи.

В четвертой главе рассмотрен вопрос, имеющий наибольшее практическое значение для САЭ – устойчивость нагрузки и влияние емкости кабельных линий на устойчивость параллельной работы синхронных генераторов.

Как видно из рис. 3, где построены угловые характеристики серийно вы-



Pr.e., Ps.e., Рявн.е. - соответственно результирующая, синхронная и мощность явнополюсности генератора СГДС-12-42-4 с увеличенным сопротивлением магнитной цепи.
Pr.n., Ps.n., Рявн.н. - то же серийно выпускаемого генератора СГДС-12-42-4.

Рис. 3

пускаемого генератора СГДС-12-42-4 и того же генератора, рассчитанного для работы на емкостную нагрузку, минимальное значение $P_{эм}$ для генератора, работающего в емкостном квадранте, будет при чисто емкостной нагрузке, а для генератора, применяемого только для работы в индуктивном квадранте, - при холостом ходе.

Коэффициент запаса статической устойчивости синхронного генератора с увеличенным сопротивлением магнитной цепи при самом неблагоприятном режиме (чисто емкостная нагрузка) равен 20%, того же серийно выпускаемого генератора при $P_{эм}$, соответствующей холостому ходу генератора, - 6%. Увеличение коэффициента запаса устойчивости генератора, специально рассчитанного для работы в САЭ, несмотря на емкостной характер нагрузки, объясняется уменьшением значений x_d и x_q , что приводит к значительному увеличению устойчивости.

Особо важное значение для обеспечения статической устойчивости двух генераторов соизмеримой мощности при емкостной нагрузке имеет положительный статизм (повышение напряжения на зажимах генератора с ростом емкостного тока) и идентичность характеристик регулирования напряжения обоих генераторов. Если характеристики регулирования напряжения приближаются к статической, то параллельная работа генераторов связана с неравномерным распределением реактивных нагрузок и возможностью автоколебаний. В то время, как при отрицательном статизме параллельная работа генераторов становится неустойчивой даже при условиях и параметрах, соответствующих устойчивому состоянию генераторов без системы регулирования возбуждения.

В главе исследованы наиболее опасные режимы, нарушающими синхронную работу генераторов, в том числе такие как короткие замыкания в системе.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные практические выводы:

1. Применяемые в настоящее время в САЭ источники электроэнергии не

- способны нормально работать ввиду того, что величина емкостной мощности систем больше максимально допустимой емкостной нагрузки генераторов.
2. Увеличение допустимой емкостной нагрузки существующих генераторов (применяемых в САЭ) может быть достигнуто за счет увеличения сопротивления магнитной цепи машины, т.к. величина максимально допустимой емкостной нагрузки генератора обратно пропорциональна величине синхронного реактивного сопротивления по продольной оси машины (x_d).
 3. Увеличение сопротивления магнитной цепи машины за счет устройства немагнитной прокладки между полюсами и остовом вала ротора (т.е. устройство в магнитной цепи машины быстронасыщающегося участка) позволяет увеличить на 20 - 30% полную мощность синхронных генераторов, применяемых в САЭ, при использовании их для работы в режиме емкостной нагрузки, по сравнению с их номинальной мощностью. Это позволяет применять существующие генераторы (после модернизации) в качестве источников электроэнергии в САЭ без установки специальных индуктивных устройств.
 4. Условия возникновения самовозбуждения (резонансных явлений) в САЭ могут быть определены путем исследования характеристического уравнения этой системы. Резонансные явления в САЭ как для генераторов с демпферной обмоткой, так и без нее, невозможны, если активное сопротивление в цепи машина – емкость $R < \frac{x_d - x_q}{2}$. Применяемые в САЭ синхронные генераторы с целью исключения резонансных явлений, вызванных асимметрией магнитной цепи машины, должны иметь полную демпферную обмотку с величиной отношения x_q'' к x_d'' не более 1,35.
 5. Самовозбуждение синхронных генераторов в САЭ при выполнении кабельных линий сечением до 50 мм² невозможно, так как соотношение ем-

костного и активного сопротивлений кабельной линии 6(10) кВ сечением до 50 мм² таковы, что при емкостной нагрузке, соответствующей зоне самовозбуждения генератора, активное сопротивление достаточно для предотвращения самовозбуждения.

6. Величина изменения напряжения на зажимах генератора в момент наброса и сброса емкостной нагрузки определяется соотношением величины сопротивления емкостной нагрузки x_c и параметрами генератора x''_d и x'_d . Наброс емкостной нагрузки сопровождается повышением, а сброс – провалом напряжения на зажимах генератора. При набросе и сбросе емкостной нагрузки x_c , равной величине x_d генератора, первоначальное отклонение напряжения для генераторов, применяемых в САЭ, составляет 7-14% от U_n .
7. Выбор параметров систем автоматического регулирования возбуждения генераторов, применяемых в САЭ, должен производиться с учетом емкостного характера нагрузки генератора. Системы АРВ генераторов при типовой настройке, учитывающей только работу генераторов в индуктивном квадранте, не способны обеспечить регулирование напряжения по заданным статическим характеристикам при емкостной нагрузке генераторов.
8. Емкостной характер нагрузки САЭ не приводит к снижению запаса статической устойчивости параллельной работы генераторов автономного источника между собой и с САЭ. Необходимым условием статической устойчивости параллельной работы генераторов при емкостном характере нагрузки, является положительный статизм характеристики регулирования напряжения (повышение напряжения с ростом реактивной нагрузки).
9. Емкостной характер нагрузки не снижает статическую устойчивость системы генератор-нагрузка и способствует повышению динамической устойчивости этой системы. Запуск асинхронных двигателей от генератора,

работающего в режиме емкостной нагрузки, сопровождается практически одинаковым (несколько меньшим) провалом напряжения как и запуск той же асинхронной нагрузки от генератора, работающего на холостом ходу, но с меньшей длительностью восстановления напряжения (некоторое расхождение в величине провала напряжения в этих случаях объясняется разным характером изменения во времени величины $x_d(t)$ генератора). При включении синхронного генератора на полную нагрузку (наиболее тяжелый режим для автономного источника САЭ) емкость кабельных линий способствует протеканию переходного процесса с более высоким качеством, выражающимся в меньшем провале и длительности восстановления напряжения, что имеет большое практическое значение для САЭ.

Основные работы, опубликованные по материалам диссертации:

1. Шинкевич А.Г. Проблемы использования дизельгенераторов ограниченной мощности в системах электроснабжения предприятий нефтегазодобычи // Энергетика в нефтегазодобыче / Москва: – Информэлектро., 2004. № 1 – с. 5 – 7.
2. Шинкевич А.Г. Синтез локальных и автономных систем электроснабжения бытовых и промышленных потребителей несинусоидального тока, соизмеримых по мощности с источником // Постсоветское градостроительство. Проблемы и перспективы. Сб. докладов и тезисов международной научно-практической конференции 16 - 17 апреля 2001 года / Под редакцией Митягина С.Д.. – Санкт-Петербург, 2001. с. – 164 – 165.
3. Шинкевич А.Г. Синтез локальных систем электроснабжения при наличии в структуре потребителей несинусоидального тока, соизмеримых по мощности с источником // Пятая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000. – с. 59.