

6
А-59

Министерство морского флота

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ МОРСКОЕ УЧИЛИЩЕ
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

П. М. БАЙКОВ

На правах рукописи

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ
МЕЖДУ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ
СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ**

Специальность 232 «Электрооборудование судов»

Автореферат

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

ЛЕНИНГРАД

1971

Министерство морского флота

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ МОРСКОЕ УЧИЛИЩЕ
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

П. М. БАЙКОВ

На правах рукописи

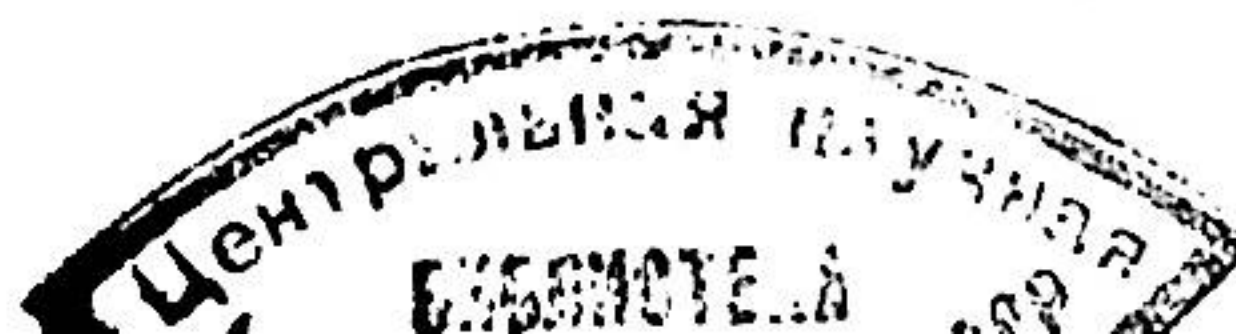
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ
МЕЖДУ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ
СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Специальность 232 «Электрооборудование судов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1971



Работа выполнена в Ленинградском высшем инженерном морском училище имени адмирала С. О. Макарова.

Научный руководитель —

кандидат технических наук, доцент Н. Н. НИКИФОРОВСКИЙ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Г. Ф. СУПРУН,
кандидат технических наук, доцент Г. А. МЕЛЕШКИН.

Ведущее предприятие —

Автореферат разослан « . . . » 1971 г.

Защита диссертации состоится « 1 » *апреля* 1971 г.

на заседании Совета электромеханического и радиотехнического факультетов ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова по адресу: Ленинград, В. О., Косая линия, д. 15-а.

Ученый секретарь Совета
ЭМФ и РТФ ЛВИМУ
имени адмирала С. О. Макарова, доцент

(КРАЧИНО В. В.)

В электроэнергетических системах современных судов морского флота в качестве источников электроэнергии преобладающее распространение получили синхронные генераторы с приводом от двигателей внутреннего сгорания — дизелей. Дизельгенераторы (ДГ), оборудованные совершенными автоматическими регуляторами напряжения (АРН) и скорости вращения (АРС) поддерживают постоянство напряжения и частоты с высокой точностью. Техничко-экономические преимущества параллельной работы ДГ определяются распределением нагрузки между ними. Повышение точности автоматического распределения нагрузки между ДГ способствует более полному использованию установленной мощности электростанции, в эксплуатации позволяет вводить в работу дополнительный ДГ при большей загрузке электростанции и тем самым экономить как топливо, так и моторесурс ДГ. Повышение точности распределения нагрузки между ДГ увеличивает запас динамической устойчивости и способствует увеличению надежности электроснабжения судна.

При постоянной нагрузке электростанции распределение ее между ДГ изменяется во времени, а отклонение от равномерного распределения нагрузки между ДГ можно представить как аperiodическую (постоянную) неравномерность распределения нагрузки между ДГ с наложением периодического перераспределения нагрузки между ними. Практика показывает, что периодическое перераспределение нагрузки в установившихся режимах параллельной работы ДГ может быть весьма значительным. Так на т/х Вацлав Воровский при параллельной работе ДГ амплитуда колебаний активной мощности достигла 50%, а тока 30÷40% от номинальных. Аналогичные явления наблюдаются и на ряде других судов и имелись при стендовых испытаниях новых дизельгенераторов. Из опыта эксплуатации ДГ следует, что периодическое перераспределение нагрузки возрастает к концу межремонтного периода ДГ.

Значительное уменьшение периодического перераспределения нагрузки достигается совершенствованием топливной аппаратуры и АРС дизелей. Однако цикличность работы ди-

зелей и некоторая неравномерность распределения нагрузки между цилиндрами неизбежны, а АРС будучи общим для всех цилиндров дизеля не может скорректировать перераспределение нагрузки между цилиндрами. Обычно уменьшение неравномерности скорости вращения дизеля, вызванной циклическостью его работы и неравномерностью распределения нагрузки по цилиндрам, и ограничение амплитуды колебаний нагрузки ДГ при параллельной работе достигается за счет увеличения момента инерции ротора ДГ, так чтобы резонансная зона колебаний была удалена от возможных частот колебаний вращающихся моментов. Увеличение маховых масс роторов путем установки маховиков утяжеляет и удорожает ДГ, что для судовых электроэнергетических систем особенно нежелательно.

Еще в 1938 г. М. М. Ботвинником был предложен способ искусственного демпфирования синхронных машин путем изменения возбуждения с частотой колебаний ротора и заданным фазовым сдвигом относительно колебаний ротора. В дальнейшем рядом специалистов исследовалось влияние периодического изменения возбуждения на вынужденные колебания и устойчивость синхронной машины при работе в мощной электрической системе. Однако возможности уменьшения периодического перераспределения нагрузки между ДГ судовых электроэнергетических систем путем такого искусственного демпфирования генераторов до настоящего времени не изучены, не нашли отражения в литературе и не используются. Нет работ, в которых освещалось бы влияние отбора мощности последовательным трансформатором системы прямого фазового компаундирования на колебания, хотя известно, что повышение активного сопротивления цепи статора увеличивает склонность синхронной машины к самораскачиванию.

Для оценки допустимой неравномерности распределения нагрузки между генераторами судовых электрических станций имеются нормативные требования Морского Регистра Союза ССР, но распространить их на периодическое перераспределение нагрузки между ДГ нет видимых оснований. Имеющиеся в других источниках рекомендации по оценке допустимых периодических колебаний синхронных машин существенно отличаются друг от друга, к тому же из-за отличия исходных условий не могут быть непосредственно использованы для оценки периодического перераспределения нагрузки между ДГ судовых электроэнергетических систем. Не изучена работа релейных защит в условиях периодических колебаний нагрузки.

Из изложенного следует, что наряду с изучением причин и способов уменьшения периодических возмущений со стороны дизеля, актуальной задачей является изучение последствий и способов уменьшения периодического перераспределения нагрузки между ДГ при заданных периодических возмущениях со стороны дизелей. В задачи реферируемой работы входило:

1. Исследование влияния периодического перераспределения нагрузки между ДГ на работу судовой электростанции (СЭС) в части уменьшения вращающегося резерва и располагаемой мощности СЭС, увеличения потерь и изменения запаса динамической устойчивости, а также анализ работы релейной защиты в условиях периодических колебаний нагрузки.

2. Анализ возможностей уменьшения периодического перераспределения нагрузки между ДГ путем искусственного демпфирования генераторов автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) по производным нагрузки при поддержании постоянства напряжения на шинах электростанции и заданных колебаниях вращающихся моментов ПД.

3. Учет влияния систем прямого фазового компаундирования на периодическое перераспределение нагрузки между ДГ как источников питания систем АРВ и последовательно включенной в линии генераторов нагрузки.

4. Разработка систем АРВ, обеспечивающих искусственное демпфирование генераторов, и экспериментальная проверка их эффективности для уменьшения периодического перераспределения нагрузки между генераторами при заданных периодических возмущениях со стороны первичных двигателей.

В первой главе рассматривается влияние постоянной неравномерности распределения и периодического перераспределения нагрузки на основные показатели параллельной работы генераторов. В действующих нормативах Регистра Союза ССР периодическое перераспределение нагрузки между генераторами не упоминается. Допустимая неравномерность распределения нагрузки между генераторами при параллельной работе и допустимая циклическая неравномерность скорости вращения дизелей привода синхронных генераторов (СГ), косвенно ограничивающая периодическое перераспределение нагрузки между ними при параллельной работе, между собой не согласуются. При допустимой амплитуде колебаний скорости вращения и частотах менее 5 гц амплитуда колебаний мощности может сколько угодно превосходить допустимую ($\pm 10\%$) неравномерность распределения на-

грузки между генераторами. Так же не согласуются между собой и другие имеющиеся в литературе нормативные рекомендации. Выполненный в главе анализ показал, что как постоянная неравномерность распределения нагрузки, так и периодическое перераспределение нагрузки между генераторами, снижают вращающийся резерв и располагаемую мощность СЭС, приводят к увеличению потерь в системе генерирования, могут уменьшить запас динамической устойчивости, а периодические колебания нагрузки способны вызывать в работе релейной защиты значительные отклонения от заданных при настройке уставок.

Располагаемая мощность и, соответственно, снижение вращающегося резерва мощности СЭС в рассматриваемом режиме могут определять по выражениям:

$$P_p = 1 - (\Delta P_{m0} + \Delta P_{mц});$$

$$S_p = \sqrt{1 - \Delta S_n^2 - \Delta S_{m0}^2};$$

(1)

где P_p, S_p — располагаемая активная и полная мощность электростанции;

$\Delta P_{m0}, \Delta S_{m0}$ — неизменное во времени отклонение от пропорционального распределения активной и полной мощности для наиболее загруженного ДГ;

$\Delta P_{mц}$ — разность между максимальной и допустимой неравномерностью распределения нагрузки между цилиндрами наиболее загруженного ДГ;

ΔS_n — среднеквадратичное (действующее) значение периодического перераспределения полной мощности (тока) генераторов.

Возможные изменения токов возбуждения генераторов, связанные с перераспределением нагрузки между генераторами сказываются меньше и не ограничивают располагаемую мощность электростанции.

В общем случае из-за нелинейной зависимости потерь и затрат от нагрузки ДГ минимум их значений при заданных ДГ и достаточном вращающемся резерве мощности СЭС обеспечивается при таком распределении нагрузки между ними, когда удельные приросты затрат на производство электроэнергии для всех параллельно работающих ДГ равны между собой, а в частном случае при параллельной работе одностип-

ных ДГ — при распределении нагрузки пропорционально их номинальным мощностям. Периодическое перераспределение нагрузки в любом случае является отклонением от оптимума и вызывает дополнительные потери и затраты на производство электроэнергии. При одностипных генераторах добавочные потери электроэнергии в системе генерирования без учета потерь в демпферных контурах роторов могут определяться по выражению:

$$\Delta P = (r_a + x_d^2 P_{fxx}) \sum_{i=1}^k \Delta I_{0i}^2 + r_a \sum_{i=1}^k \Delta I_{ni}^2 + P_{fxx} \sum_{i=1}^k \Delta I_{fni}^2; \quad (2)$$

где r_a и x_d — активное и продольное индуктивное сопротивление генераторов с учетом сопротивлений линий и систем прямого компаундирования;

P_{fxx} — мощность возбуждения генератора на холостом ходу в статорных относительных единицах (о. е.);

$\Delta I_{0i}, \Delta I_{ni}$ — среднее значение и среднеквадратичное значение периодической составляющей отклонения тока нагрузки i -го генератора от значения при пропорциональном распределении нагрузки;

ΔI_{fni} — среднеквадратичное значение периодической составляющей тока возбуждения i -го генератора в о. е. при базисном токе возбуждения холостого хода.

Выполненный анализ влияния периодических колебаний контролируемых режимных параметров на работу релейной защиты показал, что такие колебания нарушают работу защиты. При малых периодических колебаниях выдержка времени остается неизменной, а чувствительность защиты повышается с увеличением колебаний, т. е.

при

$$\frac{A_{\max} - A_{\min}}{(1 - k_g) A_y} \leq 1; \quad (3)$$

$$A_{0cp} = A_y - 0,5 (A_{\max} - A_{\min}); \quad (4)$$

$$A_{0вз} = k_g A_y + 0,5 (A_{\max} - A_{\min});$$

где $A_{\max}, A_{\min}$ — максимальное и минимальное значение контролируемого параметра при колебаниях;

A_y, k_g — уставка и коэффициент возврата защиты;

A_{0cp} , $A_{0вз}$ — средние значения контролируемого параметра, при которых защита срабатывает и возвращается в исходное состояние.

При больших колебаниях, определяемых условием

$$\frac{A_{\max} - A_{\min}}{(1 - k_s) A_y} \geq 1 \quad (5)$$

выдержка времени защиты увеличивается, а чувствительность защиты может как увеличиваться, так и уменьшаться с увеличением колебаний в зависимости от скорости возврата защиты в исходное состояние. При одинаковой скорости работы защиты в направлениях срабатывания и возврата чувствительность защиты не зависит от амплитуды колебаний и определяется выражением

$$A_{0cp} = 0,5(1 + k_s) A_y. \quad (6)$$

Если скорость возврата больше скорости срабатывания, то чувствительность защиты уменьшается с ростом колебаний; наоборот, если скорость срабатывания превышает скорость возврата, то чувствительность защиты продолжает увеличиваться с ростом колебаний. При больших колебаниях на работе защиты сказываются как значения коэффициентов возврата, так и временные характеристики реле. В работе дается графо-аналитический метод определения среднего значения контролируемого параметра, при котором защита срабатывает, и метод определения выдержки времени.

Влияние периодического перераспределения нагрузки между ДГ на запас динамической устойчивости исследуется аналитическим методом для случая наиболее тяжелой аварии — короткого замыкания (к.з.) вблизи шин электростанции — при допущениях обычно принимаемых в расчетах устойчивости методом «площадей». Показано, что на запасе динамической устойчивости сказывается соотношение продолжительности к.з. и периода колебаний ДГ в доаварийном режиме, соотношение собственной и вынужденной частот колебаний, амплитуда колебаний мощности ДГ в доаварийном режиме и в особенности фаза колебаний ДГ в момент к.з. Даются расчетные формулы для определения запаса динамической устойчивости. Выведенные зависимости иллюстрируются графиками. С учетом постоянной неравномерности распределения нагрузки между ДГ периодическое перераспределение нагрузки в зависимости от фазы колебаний в момент

к.з. может как уменьшать, так и увеличивать запас динамической устойчивости. Даже при к.з. в наиболее неблагоприятный момент периодическое перераспределение нагрузки сказывается на уменьшении запаса устойчивости значительно слабее, чем постоянная неравномерность распределения нагрузки между ДГ.

Во второй главе рассматриваются возможности уменьшения периодического перераспределения нагрузки между СГ при заданных периодических колебаниях вращающих моментов первичных двигателей (ПД) за счет искусственного демпфирования (ИД) автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) в функции производных рабочего угла, активной мощности и тока нагрузки СГ. Анализ проведен операторным методом с использованием упрощенных линеаризованных уравнений СГ. Возможность использования таких уравнений при анализе установившихся колебаний обоснована в монографии * И. Д. Урусова. В этой главе предполагалось, что нагрузка электростанции постоянна, системы АРН обеспечивают постоянство напряжения сети, а ИД сказывается лишь на периодическом перераспределении нагрузки между СГ. В отличие от простейшей системы «СГ — мощная сеть» здесь рассмотрена параллельная работа СГ, имеющих произвольное соотношение мощностей, а постоянство частоты не оговаривается. При принятых условиях и заданных колебаниях вращающих моментов ПД периодическое перераспределение нагрузки между СГ определяется эквивалентным возмущающим моментом ПД

$$m_{12}(p) = \frac{T_{j2}m_1(p) - T_{j1}m_2(p)}{T_{j1} + T_{j2}} \quad (7)$$

эквивалентной постоянной времени инерции роторов агрегатов

$$T_{j12} = \frac{T_{j1}T_{j2}}{T_{j1} + T_{j2}} \quad (8)$$

и эквивалентным коэффициентом электромагнитного момента при взаимном движении роторов СГ

$$C_{12}(p) = \frac{C_1(p)C_2(p)}{C_1(p) + C_2(p)} \quad (9)$$

* Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины. Изд. АН СССР, 1960.

согласно выражению для колебаний роторов

$$\Delta\delta_{12} = \frac{m_{12}(p)}{p^2 T_{j12} + C_{12}(p)} \quad (10)$$

ИД может существенно изменять коэффициенты электромагнитных моментов СГ $C_1(p)$, $C_2(p)$ и $C_{12}(p)$, вызывать изменение частоты свободных колебаний роторов, удалять ее от частоты возмущений и вследствие этого уменьшать периодическое перераспределение нагрузки между СГ. Коэффициенты электромагнитного момента СГ при ИД могут определяться по выведенным выражениям:

$$C_\delta(p) = C_n(p) + C_f(p) R_\delta(p) \quad (11)$$

— при АРВ в функции производных рабочего угла δ СГ;

$$C_p(p) = \frac{C_n(p)}{1 - C_f(p) R_p(p)} \quad (12)$$

— при АРВ в функции производных активной мощности СГ;

$$C_I(p) = C_n(p) + \frac{I(p) C_f(p) R_I(p)}{1 - A_f(p) R_I(p)} \quad (13)$$

— при АРВ в функции производных тока нагрузки СГ.

Здесь обозначено:

$C_n(p)$ — коэффициент электромагнитного момента СГ при неизменном возбуждении;

$C_f(p)$ — коэффициент электромагнитного момента при колебаниях напряжения возбуждения и неизменном рабочем угле δ ;

$R_\delta(p)$, $R_p(p)$, — передаточные коэффициенты систем АРВ по

$R_I(p)$ по производным рабочего угла, активной мощности и тока нагрузки СГ, соответственно;

$I(p)$, $A_f(p)$ — коэффициенты связи между колебаниями рабочего угла, напряжения возбуждения и колебанием тока нагрузки СГ.

Дается также вывод выражений для определения колебаний активной мощности, тока нагрузки и напряжения возбуждения СГ при АРВ. Проанализировано влияние параметров ИД на процесс установившихся вынужденных колебаний СГ. Показано, что наиболее эффективно ИД при АРВ по производным рабочего угла, весьма близко к нему по эффективности АРВ по производным активной мощности, наимень-

ший эффект дает АРВ по производным тока нагрузки СГ. Установлены пределы значений передаточных коэффициентов АРВ по величине и по фазе, обеспечивающие эффективное ИД и устойчивую работу СГ. Показано, что ИД позволяет уменьшить колебания рабочего угла, активной мощности и тока нагрузки СГ при колебаниях близких к резонансу и в послерезонансной области. При колебаниях в дорезонансной области уменьшение колебаний любого режимного параметра может быть достигнуто за счет увеличения других. Эффект ИД уменьшается с уменьшением активной нагрузки электростанции.

В третьей главе дается анализ системы прямого фазового компаундирования (ПФК) СГ применительно к режиму установившегося периодического перераспределения нагрузки между СГ при параллельной работе. Система ПФК рассматривается как источник энергии возбуждения СГ, управляемый устройством ИД, и как добавочное, привносимое в цепь статора СГ сопротивление, обусловленное отбором мощности последовательным трансформатором ПФК. Напряжение на выходе системы ПФК ($\dot{U}_f$) определяется не только нагрузкой СГ ($\dot{I}$, $\dot{U}$), но и нагрузкой самой системы ПФК ($\dot{I}_f + \dot{I}_s$) и описывается уравнением:

$$\dot{U}_f = k_{1u} \dot{U} + jk_{2u} \dot{I} - jk_{3u} (\dot{I}_f + \dot{I}_s). \quad (14)$$

Привносимое системой ПФК в цепь статора СГ сопротивление Z_k определяется сопротивлением к.з. Z_T последовательного трансформатора ПФК, напряжением на выходе системы ПФК и током нагрузки СГ и в общем случае описывается уравнением:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_m + \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}}. \quad (15)$$

Все выражения, описывающие систему ПФК даются как в неподвижной, так и в связанной с ротором СГ координатных системах. Приводятся выражения для определения коэффициентов уравнений по заданным электрическим параметрам элементов системы ПФК, разработаны методы определения коэффициентов по данным трех опытов, а так же методика приближенного определения коэффициентов по известным параметрам СГ. Предложена круговая диаграмма системы ПФК, помогающая наглядно анализировать режимы работы системы ПФК как источника питания, и иллюстрирую-

шая характер привносимого в цепь статора СГ добавочного сопротивления. Выполненный анализ показал, что привносимое системой ПФК сопротивление является переменной величиной, зависящей от нагрузки генератора, и в нормальных эксплуатационных режимах СГ имеет емкостной характер. При нагрузках СГ, больших $1/5$ номинальной, величина привносимого сопротивления незначительна (менее 0,05) и не может вызвать самораскачивания и существенно повлиять на процесс установившихся вынужденных колебаний СГ. При переходе СГ в двигательный режим, а также при к.з. на выходе системы ПФК или вблизи шин ГРЩ, характер привносимого сопротивления изменяется на индуктивный. Активная составляющая привносимого сопротивления становится отрицательной при емкостной нагрузке СГ, когда напряжение на выходе системы ПФК ниже, чем в режиме холостого хода СГ. Показано, что уравнивающие соединения между выходами систем ПФК СГ исключают возможность раздельного АРВ СГ и искусственного демпфирования, а также приводят к более резкой зависимости привносимого сопротивления от нагрузки СГ. Система ПФК как источник энергии близка по своим характеристикам к источнику тока и приближенно описывается уравнением:

$$i_f + i_s = -jk_{11}\dot{U} + k_{21}i \quad (16)$$

Полученные в работе выражения позволяют оценить вносимую таким приближением погрешность. АРВ компаундированного СГ в функции производных режимных параметров производится посредством управляемого шунта с передаточной функцией $L_{\Pi}(p)$, который включается на выходе системы ПФК параллельно обмотке возбуждения СГ. В этом случае изменения напряжения возбуждения СГ могут быть описаны линеаризованным уравнением

$$\Delta\dot{U}_f = R_{s0}\Delta I_s + I_{s0}L_{\Pi}(p)\Delta\Pi; \quad (17)$$

где: R_{s0} и I_{s0} — сопротивление и ток управляемого шунта в исходном режиме. При совместном решении уравнений СГ и управляемой системы ПФК получены выражения функциональной зависимости между передаточными функциями $R_{\Pi}(p)$ всей системы АРВ и передаточными функциями $L_{\Pi}(p)$ шунта, управляемого по производным рабочего угла, активной мощности и тока нагрузки СГ. Полученные зависимости показывают возможность ИД колебаний компаундированных СГ и

уменьшения периодического перераспределения нагрузки между ними, позволяют находить передаточную функцию $L_{\Pi}(p)$ шунта по передаточной функции $R_{\Pi}(p)$ системы АРВ, которая определена по методике, изложенной во второй главе реферируемой работы.

В четвертой главе излагается методика и результаты исследования параллельной работы СГ на аналоговых вычислительных машинах. Применение АВМ было обусловлено необходимостью более полного учета факторов, определяющих параллельную работу СГ (АРС первичных двигателей, систем АРВ как устройств АРН и распределения реактивной нагрузки), с целью проверки принятых в предыдущем анализе исходных допущений, а также для оценки устойчивости и эффективности искусственного демпфирования колебаний при нерегулярных возмущениях. СГ моделировались по полным линеаризованным уравнениям Парка—Горева с частичным использованием в модели схем замещения, учитывалось насыщение по продольной оси полюсов. Нагрузка представлялась шунтом постоянной проводимости.

Моделирование систем АРВ производилось с учетом статизма регулирования по напряжению и реактивной мощности, обеспечивающего равномерное распределение реактивной нагрузки между СГ при отсутствии колебаний. Система АРВ с тиристорным возбудителем рассматривалась в соответствии с экспериментальными данными как управляемый источник напряжения и моделировалась по уравнению:

$$\Delta U_f = \frac{1}{1+pT_{12}} \left\{ \left[-\left(k_1 \frac{U_{q0}}{U_0} - k_2 I_{d0}\right) \Delta U_q - \left(k_1 \frac{U_{d0}}{U_0} + k_2 I_{q0}\right) \times \right. \right. \\ \left. \times \Delta U_d - k_2 U_{d0} \Delta I_q + k_2 U_{q0} \Delta I_d \right] \pm \frac{k_3 p \Delta \Pi}{1+pT_3} \pm \frac{k_4 p^2 \Delta \Pi}{(1+pT_3)(1+pT_4)} \cdot \quad (18)$$

При моделировании системы ПФК с тиристорным шунтом учитывалось ее эквивалентное внутреннее сопротивление в соответствии с уравнением

$$\Delta U_f = -k_{uq} \Delta U_q - k_{ud} \Delta U_d - k_{Iq} \Delta I_q + k_{Id} \Delta I_d - k_f \Delta I_f \pm \\ \pm \frac{k_{\Pi 1} p \Delta \Pi}{1+pT_3} \pm \frac{k_{\Pi 2} p^2 \Delta \Pi}{(1+pT_3)(1+pT_4)} \cdot \quad (19)$$

Проводимость уравнивательных соединений между выходами систем ПФК в общем случае принималась конечной, модели-

рование производилось на одном операционном усилителе по уравнению:

$$I_{yp} = \frac{U_{f1} - U_{f2}}{r_{yp}(1 + pT_{yp})} \quad (20)$$

АРС первичного двигателя (ПД) представлялся апериодическим звеном первого порядка с зоной нечувствительности. Моделирование АРС производилось на пассивных элементах $R-C$ с использованием диодов и опорных напряжений для воспроизведения зоны нечувствительности. Приращение вращающего момента ПД определялось по уравнению:

$$\Delta m_{\partial} = \frac{s}{pT_r + \delta_r} \cdot 1\left(|s| - \frac{\varepsilon}{2}\right) - Ds + m(t) \quad (21)$$

где s — относительное изменение скорости вращения (скольжение);
 T_r и δ_r — постоянная времени и статизм АРС;
 D — коэффициент самовыравнивания скорости ПД;
 ε — степень нечувствительности АРС;
 $1\left(|s| - \frac{\varepsilon}{2}\right)$ — единичная функция Хэвисайда;
 $m(t)$ — периодическая составляющая момента вращения ПД, задаваемая внешним генератором колебаний.

Математическая модель на АВМ позволяет просто и наглядно определить границы устойчивости параллельной работы СГ, выбрать структуру и коэффициенты усиления по разным входам систем регулирования. Выбор параметров АРВ в части, касающейся искусственного демпфирования (ИД), можно произвести согласно рекомендациям второй главы реферируемой работы, но полную оценку устойчивости системы целесообразно проводить на модели по характеру изменения режимных параметров после возмущения кратковременным включением генератора гармонических колебаний $m(t)$.

Проведенная на АВМ проверка структуры систем АРВ для СГ лабораторного макета электростанции и для судовых СГ с характерными для их параметрами показала, что введение в АРВ первой производной рабочего угла, активной мощности или тока нагрузки СГ вызывает увеличение частоты свободных колебаний роторов. Инвертированная первая производная вызывает уменьшение частоты свободных колебаний. Введение второй производной тех же режимных параметров

ускоряет затухание свободных колебаний мало сказываясь на частоте. Инвертированная вторая производная вызывает автоколебания в системе и нарушение устойчивости. Для обеспечения устойчивости коэффициенты усиления по входам АРВ не должны превышать предельных значений, которые зависят от параметров СГ. При больших коэффициентах усиления по входам производных тока нагрузки СГ могут наблюдаться автоколебания повышенной частоты даже без самораскачивания роторов СГ. Проведенные на АВМ в широком объеме исследования показали, что введение в закон АРВ производных нагрузки обеспечивает эффективное уменьшение периодического перераспределения нагрузки между СГ, вызванного колебаниями вращающих момент ПД. Стабилизация напряжения на шинах электростанции при этом не нарушается, что подтверждает правомерность принятых во второй главе исходных допущений. При вынужденных колебаниях в после-резонансной области, характерных для работы судовых дизельгенераторов, или в зоне резонанса, на вход систем АРВ необходимо подавать инвертированную первую и вторую производные нагрузки СГ. Искусственное демпфирование обеспечивает уменьшение амплитуды периодического скольжения роторов СГ и тем самым способствует более спокойной работе АРС ПД. Значительные колебания напряжений возбуждения СГ не вызывают больших колебаний токов возбуждения, а при невысокой степени демпфирования приводят даже к уменьшению их колебаний. Анализ показал, что искусственное демпфирование колебаний за счет АРВ по производным рабочего угла и активной мощности СГ практически равноценны по эффективности, а эффективность АРВ по производным тока нагрузки СГ значительно ниже. Перераспределение средней активной нагрузки между СГ при неизменной нагрузке электростанции практически не сказывается на эффекте ИД. При обычных нагрузках электростанции эффективность ИД высока и только при малых нагрузках ($P_0 < 0,2$) резко снижается. Изменение реактивной нагрузки электростанции и перераспределение ее между СГ при АРВ по производным рабочего угла и активной мощности не оказывает существенного влияния на эффект ИД, но при АРВ по производным тока нагрузки СГ изменения коэффициента мощности приводят к резкому изменению эффекта ИД. Система АРВ с входом производных тока нагрузки СГ, настроенная на уменьшение колебаний при индуктивном характере нагрузки, даже при незначительной емкостной нагрузке

может усиливать колебания вплоть до нарушения устойчивости. При системах АРВ вида ПФК с управляемым шунтом эффективность ИД несколько ниже, а зависимости эффективности ИД от величины и коэффициента мощности нагрузки электростанции более явно выражены.

В пятой главе произведена экспериментальная проверка возможности уменьшения периодического перераспределения нагрузки между СГ путем АРВ по производным нагрузки при колебаниях вращающих моментов ПД. Системы АРВ по производным активной мощности и по производным тока нагрузки были разработаны как для СГ с тиристорным возбудителем, так и для СГ с ПФК, на основе созданной в ЛВИМУ им. адм. Макарова инж. В. Е. Покровским тиристорной системы АРН, которая успешно эксплуатируется на ряде судов Балтийского морского пароходства. Экспериментальные исследования проводились на стенде в лаборатории электрооборудования судов ЛВИМУ. Стенд имел два СГ типа МСА-72/4А мощностью 15 кВА с ПД постоянного тока. Разработанные системы АРВ обеспечивали параллельную работу СГ без уравнительных связей между цепями возбуждения и параллельную работу СГ с сетью Ленэнерго. Колебания вращающих моментов ПД создавались специально разработанным устройством, позволявшим изменять частоту и амплитуду колебаний в широких пределах.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность расширения функций систем АРВ, способность систем АРВ одновременно с поддержанием постоянства напряжения на шинах ГРЩ автономной электроэнергетической системы и автоматическим распределением реактивной нагрузки уменьшать периодическое перераспределение нагрузки между СГ. Уменьшение вынужденных колебаний достигается удалением зоны критической частоты от частоты вынужденных колебаний за счет изменения коэффициентов электромагнитных моментов СГ при периодическом АРВ. При параллельной работе СГ в результате подключения к системам АРВ каналов производных активной мощности было получено изменение частоты свободных колебаний роторов с 4,55 Гц до 2,5 Гц, что эквивалентно увеличению постоянных времени инерции роторов СГ в 3,3 раза. При параллельной работе одного СГ с сетью подключение к системе АРВ канала производных активной мощности вызвало изменение частоты свободных колебаний с 3,56 Гц до 2,78 Гц. Сравнение показывает, что эффективность ИД больше при работе СГ в автономной системе. Проведен-

ные исследования широкого диапазона режимов работы СГ экспериментально подтвердили эффективность ИД генераторов по производным нагрузки. Результаты экспериментов хорошо согласуются с выводами теоретического анализа и зависимостями, полученными на АВМ. Расчетные и экспериментальные данные достаточно близки, что показано в таблице, иллюстрирующей эффективность ИД по производным активной мощности при параллельной работе СГ в автономной системе. В таблице дается отношение амплитуд колебаний при ИД к амплитудам колебаний при отсутствии ИД.

Данные режима и метод определения	$P_0=0,515; \cos \varphi_0=0,7$ $f_v=3,54 \text{ Гц}$			$P_0=0,59; \cos \varphi_0=$ $=0,63 f_v=3,87 \text{ Гц}$			$P_0=0,29; \cos \varphi_0=1$ $f_v=4,02 \text{ Гц}$		
	$\frac{\Delta P_0}{\Delta P}$	$\frac{\Delta I_0}{\Delta I}$	$\frac{\Delta I_{f0}}{I_{f0} \Delta P}$	$\frac{\Delta P_0}{\Delta P}$	$\frac{\Delta I_0}{\Delta I}$	$\frac{\Delta I_{f0}}{I_{f0} \Delta P}$	$\frac{\Delta P_0}{\Delta P}$	$\frac{\Delta I_0}{\Delta I}$	$\frac{\Delta I_{f0}}{I_{f0} \Delta P}$
Эксперимент	0,285	0,437	0,45	0,177	0,373	0,025	0,46	0,397	0,06
Расчет на АВМ	0,31	0,40	0,38	0,23	0,35	0,1	0,52	0,43	0,1
Приближенный расчет	0,37	0,45	0,3	0,28	0,39	0,1	0,6	0,51	0,12

Проверку СГ, имеющих АРВ с каналом ИД, на устойчивость необходимо производить при максимальной активной нагрузке, когда из-за неточностей настройки систем АРВ в наибольшей мере может проявиться склонность СГ к самораскачиванию.

Основные результаты работы

1. Исследовано влияние периодического перераспределения нагрузки между СГ на работу судовой электростанции (СЭС). Показано, что периодическое перераспределение нагрузки между СГ вызывает увеличение потерь электроэнергии и снижает вращающийся резерв мощности СЭС, может уменьшать запас динамической устойчивости СГ и нарушать работу релейной защиты.

2. Предложены приближенные расчетные выражения для сравнительной оценки постоянной неравномерности распределения и периодического перераспределения нагрузки между СГ по величине добавочных потерь, снижению вращающегося резерва мощности СЭС и уменьшению запаса динамической

устойчивости. Сформулированы условия, при которых колебания режимных параметров могут повышать и понижать чувствительность и приводить к затягиванию времени срабатывания релейной защиты. Предложен графо-аналитический метод определения отклонений в работе защиты от заданных уставок.

3. Показана возможность и эффективность уменьшения периодического перераспределения нагрузки между СГ, вызванного колебаниями вращающего момента ПД, при реальной в эксплуатации активной нагрузке СЭС ($P_{ст} > 0,2 \Sigma P_{нг}$) за счет расширения функций систем АРВ путем подключения к ним каналов производных нагрузки СГ. Предложен аналитический метод определения передаточных функций АРВ по каналам производных нагрузки и метод расчета вынужденных колебаний СГ с использованием комплексных коэффициентов электромагнитных моментов и элементов частотных характеристик СГ.

4. Проанализированы системы ПФК как источники энергии возбуждения и как добавочные сопротивления цепи статора СГ. Показано, что привносимое системой ПФК в цепь статора сопротивление имеет активно-емкостной характер; величина его обратно-пропорциональна току нагрузки СГ, при реальной в эксплуатации нагрузке ($I_r > 0,2 I_{нг}$) составляет не более 0,05 отн. ед. и поэтому не может вызвать самораскачивания и существенно повлиять на вынужденные колебания СГ. Уравнительные соединения между выходами систем ПФК исключают возможность уменьшения колебаний за счет АРВ и обуславливают более сильную зависимость привносимого ПФК сопротивления от нагрузки СГ. Показана возможность, а также особенности АРВ по производным нагрузки при возбуждении СГ от систем ПФК, обусловленные мягкостью их внешней характеристики.

5. Разработаны и экспериментально исследованы системы АРВ по производным активной мощности и производным тока нагрузки для СГ с тиристорным возбудителем и для СГ с системой ПФК. Разработанные системы АРВ способны значительно изменять (в 1,2—1,8 раз) частоту свободных колебаний роторов СГ, обеспечивают эффективное уменьшение периодического перераспределения нагрузки между СГ при колебаниях вращающих моментов ПД, поддерживают постоянство напряжения в автономной электроэнергетической системе и устойчивое распределение реактивной нагрузки между СГ. Результаты экспериментов подтвердили выводы теорети-

ческих исследований. Показано, что наиболее эффективно АРВ по производным активной мощности.

6. Изложена методика использования АВМ для анализа периодического перераспределения нагрузки между СГ при колебаниях вращающих моментов ПД, для выбора структуры и передаточных коэффициентов систем АРВ с каналами производных нагрузки СГ.

7. Предложенный метод оценки влияния периодического перераспределения нагрузки между СГ на работу СЭС может быть использован при уточнении нормативных требований к судовым ДГ, при оценке параллельной работы СГ и при корректировке уставок релейной защиты в процессе эксплуатации.

8. Автоматическое регулирование возбуждения по производным нагрузки, обеспечивая значительный сдвиг критических частот колебаний роторов СГ, позволяет уменьшать вес и габариты маховиков и тем самым снизить вес и уменьшить стоимость ДГ без существенного увеличения затрат на системы АРВ.

Материалы диссертации докладывались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЛВИМУ имени адмирала С. О. Макарова в 1967, 1968 и 1969 годах.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Байков П. М. Расчет качаний судовых синхронных генераторов. Труды ЦНИИМФ, вып. 76. Изд. Транспорт, Л., 1967.
2. Байков П. М. Сравнительная оценка периодического перераспределения нагрузки между синхронными генераторами. Труды ЦНИИМФ, вып. 99. Изд. Транспорт, Л., 1968.
3. Байков П. М. О влиянии неравномерности распределения нагрузки между синхронными генераторами на работу судовых электроэнергетических систем. Научно-технический сборник УУЗ и ММФ «Судовые силовые установки», вып. 7. Изд. Транспорт, Л., 1968.
4. Байков П. М. Об учете системы прямого фазового компаундирования в уравнениях статора синхронного генератора. Материалы научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ЛВИМУ. Часть I, изд. ЛВИМУ, Л., 1968.