

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ВЯЗОВСКИЙ АНАТОЛИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ
АСИНХРОННОГО ХОДА ПРИ ПОТЕРЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ
МАШИН ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Специальность 05.13.05 –
"Элементы и технические средства управления и
регулирования"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1975

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электротехники"
Челябинского политехнического института им.Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
А.В.ФИЕВ

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
Г.М.ТОРБЕНКОВ

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
И.М.СЕРЫЙ (г.Свердловск);

кандидат технических наук, доцент
Г.А.КОМИССАРОВ (г.Челябинск).

Ведущее предприятие - районное энергетическое управление
"Челябэнерго"

Автореферат разослан "___" 1975 г.

Защита диссертации состоится "___" 1975 г., в
час., в ауд.244 на заседании Совета приборостроительного и
энергетического факультетов Челябинского политехнического института
им.Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся
темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или
прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу:
454044, г.Челябинск, 44, проспект им. В.И.Ленина, 76.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА,
доцент, кандидат технических наук

(КОРОЛЕНКО Ю.А.)

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Увеличение производства электроэнергии в СССР осуществляется с одной стороны на основе внедрения новых энергоагрегатов большой единичной мощности, а с другой, за счет повышения производительности и экономической эффективности работы энергосистем и максимального использования имеющихся резервов.

В связи с этим непрерывно растут требования, предъявляемые к имеющимся средствам автоматики и релейной защиты и возникает необходимость в создании новых автоматических устройств, повышающих надежность и эффективность работы энергетического хозяйства.

За прошедшее десятилетие разработан и широко внедрен ряд мероприятий, направленных на повышение устойчивости и бесперебойности работы энергосистем таких как автоматическое регулирование возбуждения, автоматическое повторное включение линий и др. В последние годы внедряется несинхронное АПВ и аварийное регулирование мощности энергоблоков. Проводятся работы по кратковременному использованию асинхронных режимов и режимов работы турбогенераторов (ТГ) с недовозбуждением.

Среди аварий на электрических станциях значительное место занимают аварии, связанные с переходом генераторов в асинхронный режим и в том числе случаи асинхронного хода (АХ), обусловленные потерей возбуждения.

Согласно эксплуатационному циркуляру № 3-8/70, ТГ мощностью до 300 МВт включительно должны обеспечиваться защитой от АХ при потере возбуждения. Задачей защиты является кратковременное сохранение машины в работе в асинхронном режиме с целью обеспечения бесперебойного питания потребителей и последующей ресинхронизации её после ликвидации аварии или перевода ТГ на резервный возбудитель.

Широкое внедрение на электрических станциях турбоблоков мощностью 300 и более МВт повышает требования к защитам от АХ при потере возбуждения и в первую очередь по быстродействию. Это объясняется тем, что критический асинхронный момент таких машин меньше их номинальной мощности, а это приведет к тому, что при потере возбуждения при работе с полной нагрузкой скорость ротора быстро достигает критического значения (за время около 5с) и генератор отключается от сети автоматом безопасности.

Усложнение режимов работы ТГ, допустимых в практике, в частности использование работы с невозбуждением, существенно повышает требова-

ния к устройствам защиты и по надежности. Под понятием надежности защиты здесь подразумевается четкая работа её в любых случаях АХ при потере возбуждения независимо от причин аварии с одной стороны, и отсутствие ложного срабатывания в других, как нормальных, так и аварийных ситуациях, таких как режим с недовозбуждением, качания, рафорсировка возбуждения и др.

Вопросам теории и экспериментальному исследованию асинхронных режимов, режимов работы с недовозбуждением, при качаниях и, в частности, АХ без возбуждения, посвящено ряд работ советских и зарубежных авторов: А.И.Важнова, В.А.Веникова, Е.Я.Казовского, Ф.Л.Когана, Т.Лайбля, А.Т.Лебедева, Л.С.Линдорфа, Л.Г.Мамионица, В.И.Мангилева, Н.Н.Поляка, И.А.Сыромятникова, А.М.Уфимцева, В.А.Файбисовича, А.А.Хачатурова, А.П.Чистикова и др. Основной целью исследований асинхронных режимов в этих работах является изучение параметров и характеристик, а также определение возможностей кратковременного использования работы синхронного генератора в установившемся асинхронном режиме. Однако в этих работах не освещен достаточно полно вопрос, касающийся параметров ТГ и режима его работы при непосредственном переходе из синхронного в асинхронный режим. В то время как для оценки существующих средств защиты, классификации их и выбора наиболее оптимального способа и разработки устройства выявления АХ при потере возбуждения, отвечающего современным требованиям, совершенно необходимо знать параметры именно при переходе из одного режима в другой. Поэтому возникает необходимость проведения дополнительных теоретических исследований, касающихся поведения крупных ТГ при переходе их в асинхронный режим и при качаниях.

В опубликованных научных работах изучение качаний синхронных генераторов связано с рассмотрением вопросов устойчивости и определения времени отключения коротких замыканий, поэтому оно правомерно проводится без учета демпферного момента машин. В случае же решения задачи отстройки от качаний защит от АХ требуется исследование нелинейных колебаний машины с учетом демпферного тормозного момента, так как пренебрежение им не позволяет определить максимально возможного периода колебаний.

Анализ переходных электромеханических процессов ТГ при потере возбуждения насколько нам известно вообще не освещен в литературе. В то же время исследование динамики процессов при потере возбуждения крупных ТГ необходимо для выработки требований по быстродействию к устройствам защиты при потере возбуждения и определения необходимого

воздействия на регуляторы мощности турбины для обеспечения своевременной разгрузки блока. Последнее особенно важно для крупных турбоблоков, не имеющих специальных быстродействующих систем аварийной разгрузки.

Говоря об устройствах защиты ТГ от АХ при потере возбуждения, следует разделить их на две основные части: выявитель АХ при потере возбуждения и система аварийной разгрузки блока.

В работах Г.И.Атабекова, А.Б.Барзами, М.А.Берковича, В.Н.Долгополова, В.Г.Подобедова, В.Е.Полякова, М.Г.Портного, И.М.Серого, В.А.Семенова, А.И.Федосеева, В.А.Фабриканта, А.Г.Шейнкмана, А.А.Янко-Триницкого и др., а также зарубежных авторов, приводятся данные исследования асинхронных режимов, предлагается ряд способов и устройств выявления АХ и освещается анализ работы их применительно к некрупным синхронным машинам. Однако в этих работах вопросам классификации, установления требований и выбора оптимальных вариантов устройств, а также исследованию качественных показателей - точности, быстродействия и надежности схем выявления АХ при потере возбуждения крупных ТГ уделено совершенно недостаточное внимание. Это во многом объясняется тем, что широкое внедрение мощных ТГ (300 и более МВт) наблюдается только в последние годы.

Цель работы. Настоящая работа, посвященная разработке и исследованию устройств выявления АХ при потере возбуждения мощных ТГ, отвечающих современным требованиям и тенденциям в развитии электроэнергетики, ставит своей целью решить следующие вопросы:

1. Провести исследование работы крупных ТГ при переходе их из синхронного в асинхронный режим при медленном снижении тока возбуждения и разработать на его основе требования к устройствам защиты мощных ТГ при потере возбуждения.

2. Выполнить анализ электромеханических переходных процессов крупных ТГ при качаниях и потере возбуждения с целью определения необходимого быстродействия устройств выявления АХ и системы аварийной разгрузки блока.

3. Разработать классификацию и провести обзор и сравнительную оценку существующих способов и устройств выявления АХ при потере возбуждения применительно к современным мощным ТГ.

4. Установить оптимальный способ и разработать на его основе устройство выявления АХ при потере возбуждения.

5. Проанализировать работу основных элементов и провести оценку точности, быстродействия и надежности устройства.

6. Провести экспериментальные лабораторные и промышленные исследования внедренных на электрических станциях опытных образцов защиты.

Методика выполнения исследований. С целью выработки основных требований к устройствам выявления АХ при потере возбуждения, а также классификации и оценки существующих способов и устройств защиты проведен анализ перехода ТГ из синхронного в асинхронный режим в статике.

При анализе процесса глубоких качаний ТГ с учетом демпферного момента использовался метод фазовой плоскости при кусочно-линейной аппроксимации асинхронной характеристики машины.

Выражения динамических характеристик токов, электромагнитного момента и реактивной мощности ТГ в переходном электромеханическом режиме при потере возбуждения установлены на основе решения системы дифференциальных уравнений Парка-Горева методом вариации постоянной.

Расчет электромеханического переходного процесса по полученным выражениям с учетом изменения мощности турбины осуществлен на ЭЦВМ.

Анализ электромагнитных процессов в основных элементах устройства выявления АХ – реле реактивной проводимости и реле активной мощности – проведен методом сопряжения интервалов при кусочно-линейной аппроксимации характеристик диодов. Выражения для выходного сигнала получены с помощью метода малого параметра, а основные характеристики точности и быстродействия рассчитаны на ЭЦВМ.

Экспериментальные исследования точности, быстродействия и надежности устройств выполнены как в лабораторных, так и в натурных условиях на действующих опытно-промышленных образцах защиты крупных турбогенераторов ряда ГРЭС.

Научная новизна. В работе впервые на основе анализа перехода ТГ в асинхронный режим при медленном снижении тока возбуждения, а также учитывая современный уровень развития энергосистем, установлены основные требования к устройствам защиты от АХ при потере возбуждения мощных ТГ, проведена классификация и оценка существующих способов и устройств защиты. Впервые выполнен анализ электромеханических переходных процессов ТГ мощностью 300 МВт при глубоких качаниях с учетом демпферного момента и потере возбуждения, позволивший определить требования по быстродействию к устройствам защиты и показать невозможность использования для машин такой и большей мощности

существующих способов и устройств защиты. Предложен новый способ, разработано и внедрено новое устройство для выявления АХ при потере возбуждения, теоретические и экспериментальные исследования которого показали полное соответствие его установленным требованиям.

Практическая ценность. По разработанной принципиальной схеме ВАХ и расчету всех его элементов выполнены четыре опытно-промышленных образца устройства, три из которых установлены на генераторах 200 и 300 МВт и успешно эксплуатируются.

Ориентировочный эффект от внедрения одного устройства составляет 15 тыс. рублей в год. Результаты исследований трехфазных измерительных преобразователей реактивных мощности и тока, а также однофазных и трехфазных реле реактивной проводимости позволили дать конструктивные рекомендации, направленные на повышение точности и быстродействия перечисленных устройств.

Разработанные схемы трехфазных измерительных преобразователей реактивной мощности и тока, реле реактивной проводимости, а также датчиков углов δ_r и ψ имеют самостоятельное значение и могут быть использованы для решения ряда других задач измерений, релейной защиты и автоматики.

Методика расчета глубоких качаний и электромеханических переходных процессов ТГ рекомендуется для исследований режимов широкого круга синхронных машин.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались и обсуждались:

а) на научно-технической конференции по обмену опытом эксплуатации устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики в энергосистемах Урала (г.Свердловск, 1974);

г) на девятой городской научно-практической конференции (г.Челябинск, 1974);

д) на ежегодных научно-технических конференциях ЧПИ им.Ленинского комсомола в 1972-1975 годах.

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ и получено 2 авторских свидетельства.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 139 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками, осциллограммами и таблицами на 61 странице, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 80 наименований и приложения (25 страниц текста).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе устанавливаются основные требования к устройствам выявления АХ при потере возбуждения мощных ТГ; дается классификация и обзор существующих способов и устройств, и на основе сравнительного анализа выбирается наиболее оптимальный способ регистрации перехода рабочего угла δ_r ТГ через 90° . С этой целью проводится анализ работы ТГ в блоке с трансформатором на шины станции при медленном снижении тока возбуждения и далее в установившемся асинхронном режиме без возбуждения.

По полученным соотношениям построена картина данного процесса, отражающая изменение параметров режима ТГ и определены их значения, соответствующие необходимому условию перехода в асинхронный режим ($\delta_r = 90^\circ$).

По результатам исследований с учетом жестких требований по быстродействию для машин мощностью 300 МВт и более, а также современных тенденций в развитии релейной защиты и автоматики энергосистем на основе применения полупроводниковых элементов, сформулированы следующие требования к устройствам выявления АХ при потере возбуждения мощных ТГ:

1. Устройство должно быть быстродействующим, способным выявлять АХ по крайней мере в течение менее полуоборота угла δ_r .
2. Уставка реле выявителя не должна зависеть от режима работы ТГ — его активной нагрузки и напряжения.
3. Устройство должно выявлять потерю возбуждения независимо от причин аварии, т.е. обладать универсальностью.
4. Оно должно быть надежно отстроено от качаний, режимов недовозбуждения, расфорсировок и от неполнофазных аварийных режимов в системе.
5. С целью повышения надежности и качества работы устройство должно быть выполнено на статических элементах без движущихся частей и без применения электромеханических реле.
6. Желательно иметь устройство, не требующее подстройки перед включением его после вывода машины из ремонта.

Способы регистрации перехода ТГ в асинхронный режим ($\delta_r > 90^\circ$) можно разделить на две основные группы: прямые и косвенные. Анализом установлено, что прямые способы регистрации изменения угла δ_r для выявления АХ, предполагающие непосредственную связь с быстро вращающимся валом машины, нельзя считать перспективными для турбогенераторов в связи с их нетехнологичностью и необходимостью повторных

настроек после ремонта ротора. Косвенные способы выявления АХ по параметрам режима цепей ротора, а также ряд способов по параметрам цепей статора (например, по току статора) нельзя использовать для защиты мощных ТГ от АХ при потере возбуждения, так как они не обеспечивают достаточных быстродействия и надежности при работе защиты. Детальный анализ косвенных способов выявления АХ по параметрам режима цепи статора показал, что наиболее выгодным следует считать метод, базирующийся на измерении реактивной проводимости на шинах генератора B_r , так как уставка реле реактивной проводимости ($B_{ry} = \frac{1}{x_d}$), соответствующая переходу в асинхронный режим ($\delta_r = 90^\circ$), не зависит ни от активной нагрузки, ни от напряжения генератора. Эта уставка соответствует углу $\delta_r = 90^\circ$ как по статической, так и по динамической угловым характеристикам реактивной мощности ТГ. Все рассмотренные способы выявления АХ требуют отстройки от качаний. Осуществление отстройки путем введения временной задержки на срабатывание выходного органа защиты значительно снижает их быстродействие и для мощных ТГ не приемлемо.

Во второй главе для решения вопроса о необходимом быстродействии работы выявителей АХ при потере возбуждения мощных ТГ проводится анализ электромеханических переходных процессов при качаниях и потере возбуждения. Учет демпферного момента при анализе глубоких качаний необходим для установления максимально возможного периода и правильного выбора времени отстройки. Решение нелинейного уравнения движения ТГ с этой целью было проведено методом фазовой плоскости при кусочно-линейной аппроксимации асинхронной характеристики тремя прямыми.

Проведенный таким образом анализ качаний турбогенератора типа ТВ-300 показал, что для отстройки устройства выявления потери возбуждения необходима задержка времени 1,5 - 2с, а не 0,5 - 0,7с, как указано в литературе на основе решения процесса без учета демпферного тормозного момента и при линеаризации угловой характеристики синхронного момента ТГ.

Для определения требований по быстродействию к устройствам защиты рассматривался наиболее тяжелый режим потери возбуждения (типа отключения АГУ или инвертирования тиристорного возбудителя), когда ток в обмотке, а вместе с ним и синхронный тормозной момент снижаются наиболее быстро. Использование статических характеристик машины для анализа такого режима оказалось недопустимым, т.к. полу-

ченная расчетная кривая 2 изменения скольжения S генератора ТГВ-300 (рис. I) совершенно не отражает сложного характера экспериментальной кривой I. Поэтому для анализа данного процесса были определены из решения уравнений Парка-Горева динамические характеристики электромагнитного момента M и реактивной мощности Q_r синхронного генератора. Для турбогенератора как неявнополосной машины они имеют вид:

$$M = \frac{Ux_{ad}}{x_d} i_{so} e^{-\frac{t}{T_s}} \sin \delta_r - \frac{Ux_{ad}(P_f x_{1ad} - \chi_{1d})}{(x_{1d} x_d - x_{ad}^2)(P_f - P)} i_{so} (e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \sin \delta_r + \frac{U^2 x_{ad}^2}{x_d (x_{1d} x_d - x_{ad}^2)} \cdot \frac{sT}{1 + (sT)^2} (1 - e^{-\frac{t}{T}}); \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{Ux_{ad}}{x_d} i_{so} e^{-\frac{t}{T_s}} \cos \delta_r + \frac{Ux_{ad}(P_f x_{1ad} - \chi_{1d})}{(x_{1d} x_d - x_{ad}^2)(P_f - P)} i_{so} (e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \cos \delta_r - U^2 \left\{ \frac{x_{1d}}{x_{1d} x_d - x_{ad}^2} \cdot \frac{(sT)^2}{1 + (sT)^2} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \frac{1}{x_d} \cdot \frac{1}{1 + (sT)^2} + \frac{1}{x_d} \left[1 - \frac{1}{1 + (sT)^2} \right] e^{-\frac{t}{T}} \right\}, \quad (2)$$

где U - напряжение на шинах генератора;

i_{so} - ток в обмотке возбуждения в предаварийном режиме;

$T_s = \frac{1}{P_f}$ - постоянная времени затухания тока в обмотке возбуждения;

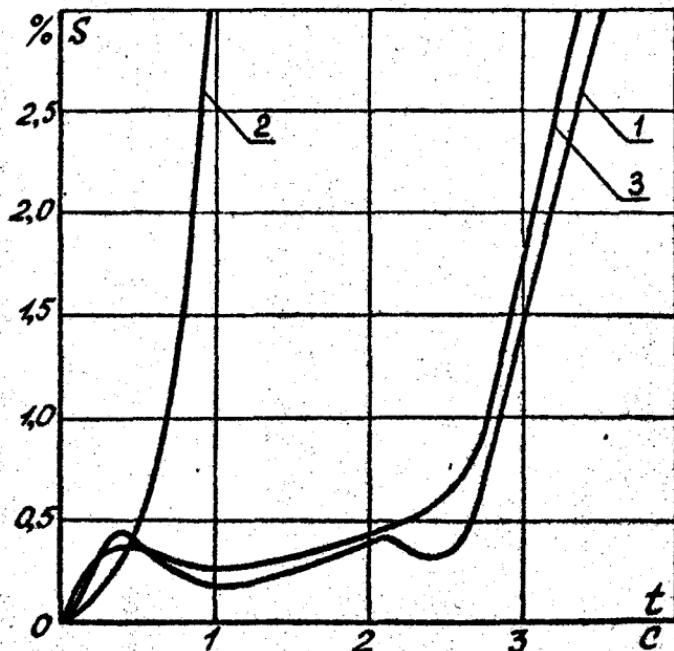
$T = \frac{1}{P} = \frac{x_{1d} x_d - x_{ad}^2}{\chi_{1d} x_d}$ - эквивалентная постоянная машины характеризующая данный процесс;

$x_d, x_{ad}, x_{1d}, x_{1ad}, \chi_{1d}$ - параметры машины;

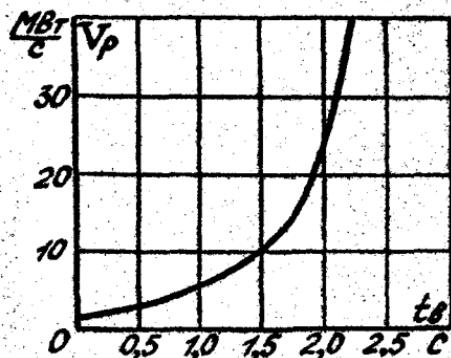
s - скольжение, принятное положительным при скорости ротора выше синхронной.

Полученные выражения позволили объяснить сложный характер экспериментальной кривой I изменения скольжения T_1 в рассматриваемом случае потери возбуждения и рассчитать переходный процесс (кривая 3) с помощью уравнения движения машины

$$T_1 \frac{d^2 \delta_r}{dt^2} + M = M_T \quad (3)$$



PLIC.1



PLIC.2

и уравнения, определяющего связь между напряжениями генератора U и шин станции U_c :

$$U^2 = U_c^2 + 2x_r Q_r. \quad (4)$$

При анализе оказалось необходимым учесть не только изменения напряжения на шинах генератора в ходе переходного процесса, но и параметров χ_m и x_{idc} . Для определения времени разгона ТГ ока-

залось возможным использовать усредненные значения χ_{id} и x_{idc} , которые в относительных единицах для ТГВ-300 соответственно равны

0,0013 и 0,2. Исследование процесса разгрузки турбоблока 300 МВт при инвертировании возбудителя показало, что при достаточно быстром выявлении потери возбуждения за время t_b менее 1с (рис.2), существует возможность сохранения блока в работе даже при небольшой скорости его разгрузки V_p (около $5 \frac{\text{МВт}}{\text{с}}$). При более позднем выявлении АХ, особенно позже 2с, требуемая скорость разгрузки резко увеличивается (более чем в 10раз). Для сохранения генераторов мощностью 300 МВт в асинхронном режиме при потере возбуждения быстродействие устройства выявления АХ должно быть не ниже 1с.

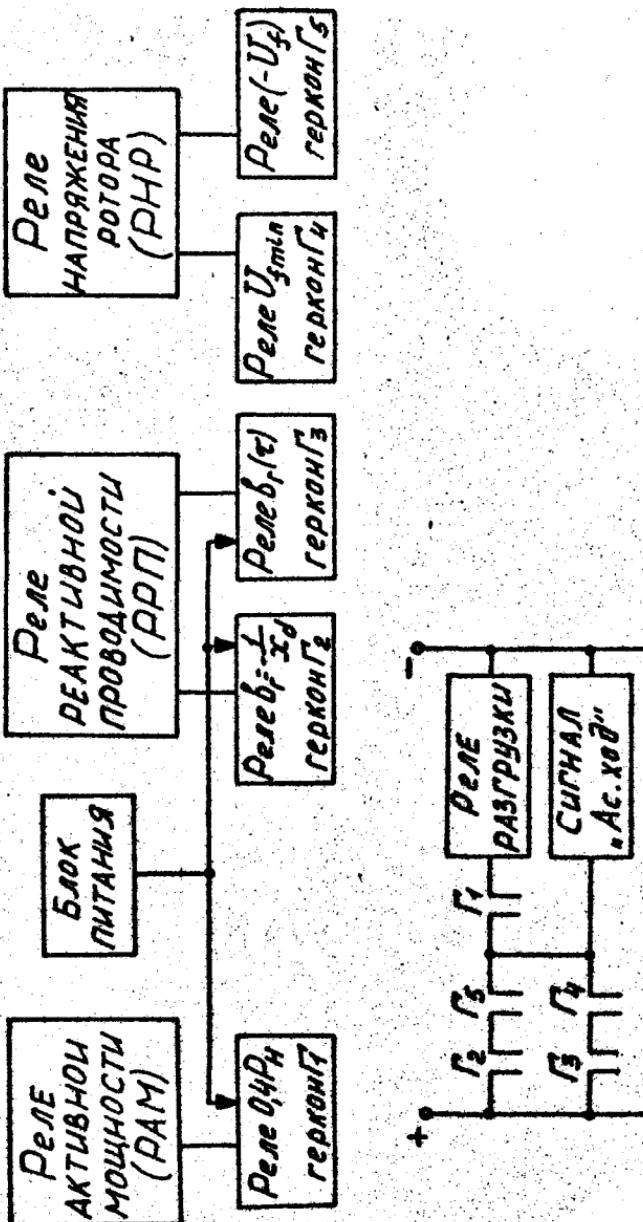
В третьей главе для исключения задержки времени, осуществляющей отстройку от качаний, предлагается использовать совместно с реле реактивной проводимости (РН) реле напряжения ротора (РНР), т.е. реализовать комбинированный способ для выявления АХ при потере возбуждения ТГ. Блок-схема устройства представлена на рис.3

Основной элемент схемы - РН, имеет два выходных геркона:

G_2 - срабатывающий мгновенно при достижении уставки $B_{ry} = \frac{1}{x_d}$ и G_3 - замыкающийся с задержкой времени. Реле напряжения ротора (РНР) имеет также два выходных геркона: G_4 - срабатывающий при снижении напряжения возбуждения до уровня, соответствующего пределу статической устойчивости ТГ при номинальной нагрузке и G_5 - замыкающийся при изменении полярности напряжения на кольцах ротора. В соответствии со схемой пусковых цепей (рис.3) для выявления АХ при потере возбуждения предусмотрены две параллельные цепочки управления. Первая из них, обеспечивающая максимальное быстродействие работы устройства, состоит из последовательно соединенных контактов G_2 и G_5 . Она осуществляет срабатывание исполнительных реле в тех случаях, когда ток возбуждения, а вместе с ним и синхронный тормозной момент, уменьшаются быстро (случайное отключение

Рис. 3

Пусковые цепи



АП, переход тиристорного возбудителя в инверторный режим и т.д.) и ротор ТГ разгоняется быстро. При этом в связи с быстрым спаданием тока возбуждения напряжение на колышах ротора ТГ практически мгновенно меняет знак и срабатывает геркон Γ_5 . Быстродействие выявления АХ определяется здесь лишь временем достижения уставки по \dot{I}_r , когда замыкается геркон Γ_2 . Отстройка от режимов качаний и расфорсировки в этом случае осуществляется за счет последовательного включения контактов Γ_2 и Γ_5 . При глубоких качаниях ротора хотя и возможно кратковременное замыкание контакта Γ_2 , но контакт Γ_5 остается разомкнутым и устройство работать не будет; при расфорсировке - наоборот, может замкнуться контакт Γ_5 , но остается разомкнутым контакт Γ_2 .

Вторая цепь управления, состоящая из последовательно включенных контактов Γ_3 и Γ_4 , обеспечивает работу устройства во всех остальных случаях потери возбуждения. Отстройка от качаний здесь осуществляется за счет задержки на срабатывание геркона Γ_3 . Геркон Γ_4 служит для отстройки от ложной работы устройства при работе ТГ в зоне искусственной устойчивости.

При выявлении асинхронного хода по любой из рассмотренных цепей управления срабатывает сигнальное реле, а также реле разгрузки блока, если активная мощность ТГ превышает допустимую в асинхронном режиме ($0,4 P_M$). Для этого в устройстве предусмотрено реле активной мощности (РАМ) с соответствующей уставкой.

Основной элемент схемы - реле реактивной проводимости может быть построено по двум принципам. В основе работы реле, реализующего первый принцип (РПИ-1), лежит сравнение выпрямленных значений двух электрических величин, сформированных из входных тока I и напряжения U , в соответствии с выражением

$$|\dot{E}_1| = |jk_1 \dot{I}| - |\dot{E}_2| = |\dot{U} - jk_1 \dot{I}| = 0. \quad (5)$$

Второй тип реле (РПИ-2) основан на сравнении сигналов, пропорциональных реактивной составляющей тока исследуемой цепи и напряжения этой цепи.

Анализ методической погрешности наиболее распространенной однофазной схемы РПИ-1 показал, что основным фактором, определяющим погрешность, является неидентичность параметров источников сравниваемых напряжений реле. Достижение идентичности может быть обеспечено введением добавочного сопротивления в схему реле. Схема РПИ-2, хотя и обеспечивает несколько меньшую точность работы, чем РПИ-1, явля-

ется предпочтительнее, так как на базе её может быть создано трехфазное РНП, необходимое для генераторов 300 и более МВт. Кроме того, на этом принципе можно получить унифицированные как одно, так и трехфазные схемы не только РНП, но и измерительных преобразователей активных и реактивных мощностей и составляющих токов. На основе анализа быстродействия однофазных схем РНП установлено, что непосредственное их использование для выявления АХ возможно лишь на генераторах мощностью до 200 МВт включительно, т.к. время их срабатывания сравнимо с необходимым временем выявления потери возбуждения.

В четвертой главе показано, что для повышения быстродействия за счет снижения пульсаций выходного сигнала, точности с учетом возможной несимметрии тока нагрузки по фазам, а также увеличения выходной мощности, для крупных ТГ необходимо использовать не однофазный, а трехфазный выявитель АХ.

Основным элементом разработанного автором трехфазного выявителя является реле реактивной проводимости трехфазной цепи, построенное по принципу РНП-2. В главе производится анализ трехфазных измерительных преобразователей реактивных мощности и тока, на основе которых может быть реализовано трехфазное РНП в соответствие с выражением

$$B = \frac{Q_x}{U} = \frac{1}{\sqrt{3}U} (I_A \sin \varphi_A + I_B \sin \varphi_B + I_C \sin \varphi_C), \quad (6)$$

где Q_x - суммарная реактивная мощность трехфазной цепи;
 U - линейное напряжение.

Предложенные датчики трехфазных реактивных мощности и тока, в основе которых лежит сумма - разностный способ, являются не формальным объединением трех однофазных датчиков, а представляют собой оригинальные схемы (трех или двухэлементные), позволяющие получать трехфазный сигнал с одного выхода. Основным преимуществом таких схем при измерении трехфазной мощности является возможность уменьшения числа квадратичных элементов до двух. Исследования трехфазного измерительного преобразователя реактивной мощности позволили для уравновешенной трехфазной цепи создать двухэлементную схему. За счет соответствующего подключения такой датчик в симметричном режиме работает без методической погрешности, а при допустимой несимметрии токов методическая погрешность его не более 1%. На базе полученной двухэлементной схемы построены трехфазные преобразователь реактивного тока и реле реактивной проводимости с достаточно высокими показате-

лями точности и быстродействия. Сопоставляя сложность реализации датчика реактивной мощности по сравнению с датчиком реактивного тока, а также на их основе самого РПИ, для выявителя АХ принятая двухэлементная схема измерительного преобразователя реактивного тока.

Схема трехфазного РПИ представлена на рис. 4. Здесь на трансформаторах ТрI+Трб и мостах B_c и B_g собран преобразователь реактивного тока. Выходной сигнал этого преобразователя сравнивается с током $\frac{U}{x_d}$, пропорциональным напряжению сети. Реле срабатывает, когда среднее значение суммарного напряжения на выходе устройства становится равным нулю:

$$I \sin \varphi + \frac{U}{x_d} = 0 \quad \text{т.е.} \quad B_{ry} = \frac{I \sin \varphi}{U} = -\frac{1}{x_d}.$$

В связи с последовательным и встречным соединением обмоток промежуточных трансформаторов ТрЗ + Трб на входе выпрямительного моста суммы B_c возникают напряжения:

$$U_{rc} = U_{ab} + i_c R_w; \quad U_{ac} = -(U_{bc} + i_a R_w); \quad U_{rc} - U_{ac} = -(U_{ca} + i_b R_w).$$

Таким образом, за счет напряжений $(U_{rc} - U_{ac})$ и $(U_{rc} - U_{bc})$ при уравновешенной трехфазной системе получаются напряжения U_{ca} и $i_b R_w$ третьей фазы цепи. В результате шестифазного выпрямления напряжений двухэлементный преобразователь работает как рассмотренный выше трехэлементный при условии $i_a + i_b + i_c = 0$.

Исследование погрешности трехфазного РПИ показало, что она довольно велика в режимах работы генератора близких к номинальному по активной мощности, однако в отличие от однофазного РПИ его методическая погрешность не зависит от сопротивления нагрузки реле. Соответствующим подбором уровня срабатывания выходного органа РПИ можно обеспечить в номинальном режиме работы генератора снижение методической погрешности до нуля. При реально существующих отклонениях от номинального режима погрешность работы реле в этом случае не превышает 2,5%. Анализ пульсаций выходного напряжения трехфазного РПИ показал, что амплитуда основной гармоники пульсаций примерно в три раза меньше чем у однофазного реле при тех же параметрах элементов схемы; частота пульсаций при этом в три раза выше. Поэтому включение емкостного фильтра здесь более эффективно и обеспечивает высокий коэффициент возврата с быстродействием в десять раз большим, чем у однофазной схемы. Дополнительной мерой снижения пульсаций явилось включение добавочных симметрирующих сопротивлений R_{sym} для уравнивания внутренних сопротивлений источников сравниваемых напряжений реле. Рассмотрение работы трехфазного РПИ при неполно-

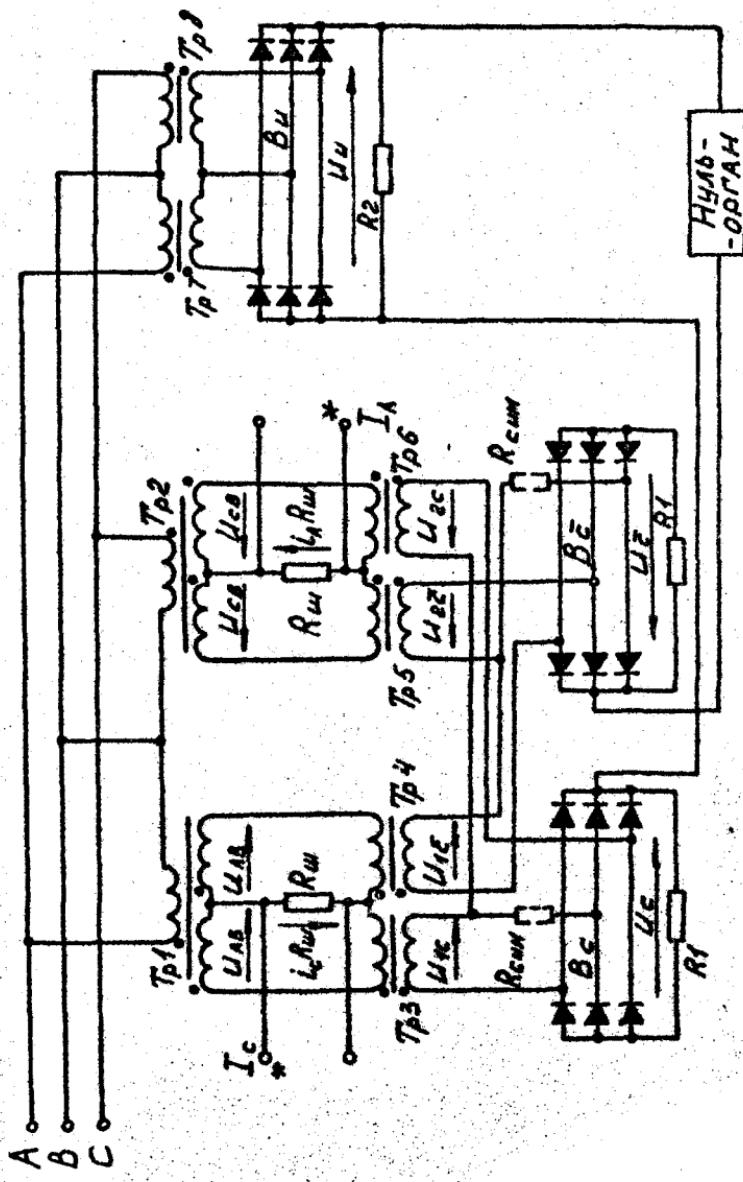


Рис. 4

фазных режимах показало, что ложного срабатывания реле при самых различных видах несимметрии в системе невозможно. Работоспособность схемы сохраняется также и при снятии напряжения с любой входной фазы устройства. Разработанная полная принципиальная схема ВАХ, выполненная на базе трехфазных двухэлементных РН и РМ, по быстродействию, точности и надежности работы в возможных аварийных ситуациях полностью удовлетворяет установленным в первой главе требованиям, предъявляемым к защите от АХ мощных турбогенераторов.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований опытно-промышленных образцов трехфазного выявителя асинхронного хода (ВАХ), целью которых являлось:

1. Оценка качественных показателей точности и быстродействия работы ВАХ при потере возбуждения ТГ при различных параметрах режима с учетом изменения напряжения генератора и активной нагрузки.

2. Подтверждение надежной работы его во всех возможных аварийных ситуациях, связанных с переходом ТГ в асинхронный режим при потере возбуждения, а также при возвращении схемы в исходное состояние в режимах ресинхронизации.

3. Проверка на отсутствие ложного срабатывания устройства при работе ТГ с недовозбуждением, при качаниях, расфорсировке возбуждения и неполнофазных режимах в системе.

4. Испытание прочности изоляции элементов ВАХ с учетом возможных перенапряжений и проверка работы элементов схемы во взаимодействии.

5. Температурные испытания устройства.

Выполнить все перечисленные пункты испытаний в натурных условиях на электростанции оказалось невозможным, так как это связано с достаточно длительным выводом из нормальной работы агрегатов большой мощности. Поэтому часть экспериментов проводилась в лабораторных условиях. Повышение достоверности результатов лабораторных исследований было достигнуто за счет испытаний 4-х различных опытно-промышленных устройств, предназначенных для работы на разного типа генераторах четырех ГРЭС. Стендовые лабораторные испытания РН четырех устройств ВАХ подтвердили данные теоретических исследований точности реле и позволили сделать вывод, что суммарная относительная погрешность их не превышает 3%.

Экспериментальные исследования быстродействия выявителя АХ

также подтвердили данные анализа схемы РПИ. Максимальное время срабатывания реле при подключении всей схемы к питющей сети не более 0,1 с, что вполне достаточно для обеспечения защиты мощных ТГ от АХ при потере возбуждения.

Проверка на стенде показала, что РПИ не срабатывает ложно при любых отключениях токов и напряжения со стороны питающей сети; работоспособность реле сохраняется и при значительном снижении напряжений вплоть до 25% от U_n .

Для промышленных испытаний ВАХ были разработаны датчики δ_f и ψ для измерения углов в диапазоне $0 \pm 90^\circ$. Достоинством этих схем при испытаниях ВАХ явилось то, что значению измеряемого угла 90° всегда точно соответствует максимальная величина выходного сигнала. Приведенная погрешность этих датчиков при измерении углов в широком диапазоне $0 \pm 90^\circ$ составила 3%. Осциллографирование процессов потери возбуждения турбогенераторов ТГВ-300 и ТГВ-320 подтвердило работоспособность ВАХ в различных случаях аварии и надежную отстройку его от ложного срабатывания в режимах расфорсировки возбуждения. Быстро действие выявления АХ при потере возбуждения, обеспечиваемое ВАХ, оказалось вполне достаточным для осуществления своевременной разгрузки блока 300 МВт без значительных выбросов скольжения.

В заключении сформулированы следующие основные результаты диссертационной работы:

1. На основе анализа перехода ТГ в асинхронный режим при медленном снижении тока возбуждения, а также учитывая современный уровень развития энергосистем, установлены основные требования к устройствам защиты от АХ при потере возбуждения крупных ТГ.

2. Проведена классификация и оценка существующих способов и устройств защиты и выбран наиболее оптимальный способ регистрации перехода рабочего угла δ_f через 90° с помощью измерения реактивной проводимости на шинах генератора.

3. Выполнен анализ электромеханических переходных процессов мощных ТГ при качаниях и потере возбуждения, позволивший определить требования по быстродействию к устройствам защиты от АХ при потере возбуждения и показать невозможность использования для защиты машин мощностью 300 и более МВт существующих способов и устройств защиты.

4. Из анализа работы машин мощностью 300 МВт при потере возбуждения с учетом изменения мощности турбины, определена необходимая скорость разгрузки блока в зависимости от времени выявления АХ, обеспечивающая сохранение ТГ в работе при потере возбуждения без увеличения оборотов ротора до критических.

5. Предложен новый способ и разработана блок-схема нового устройства защиты крупных ТГ от АХ при потере возбуждения, обеспечивающего установленные требования.

6. Проведен анализ основного элемента устройства выявления АХ при потере возбуждения (ВАХ) – реле реактивной проводимости (РРН) в однофазном исполнении, и исследована точность и быстродействие его работы. Показано, что однофазные схемы РРН не обладают достаточным быстродействием для работы в устройствах защиты от АХ при потере возбуждения мощных ТГ, а могут быть использованы лишь для защиты генераторов мощностью до 200 МВт.

7. Проанализирована работа предложенных трехфазных схем измерительных преобразователей реактивной мощности и реактивной составляющей тока и показана возможность построения двухэлементной схемы, для измерения реактивной мощности в уравновешенной трехфазной системе при несимметрии токов, с методической погрешностью не более 1%.

8. На основе трехфазной схемы измерительного преобразователя реактивной составляющей тока разработана схема трехфазного реле реактивной проводимости.

9. Выполнен анализ работы трехфазной схемы РРН и показаны его высокие точность, быстродействие и надежность, полностью удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к устройствам защиты при потере возбуждения мощных ТГ.

10. По разработанной принципиальной схеме ВАХ и расчету всех его элементов выполнены четыре опытно-промышленных образца устройства, три из которых установлены сейчас на генераторах 200 и 300МВт и успешно эксплуатируются в течение более года.

II. Проведены лабораторные (стендовые) испытания четырех устройств ВАХ, предназначенных для работы на различных ТГ, сняты характеристики реле, входящих в состав устройств, и подтверждены результаты теоретических выводов, сделанных в отношении точности и быстродействия их работы.

12. Для исследования точности работы ВАХ в промышленных условиях разработаны и построены датчики углов δ_r и ψ , обладающие вполне приемлемыми для этих целей показателями.

13. Проведены промышленные испытания ВАХ на турбоблоках ТВБ-300 и ТВБ-320 Троицкой и Кармановской ГРЭС с осциллографированием широкого круга электрических величин при различных случаях потери возбуждения, в результате которых и в реальных условиях были подтверждены работоспособность, необходимое быстродействие, точность и надежность работы устройства.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Вязовский А.К., Монюшко Н.Д., Рязанов Ф.П., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Выявление асинхронного режима турбогенератора при потере возбуждения. Сб."Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧИИ, 1973, № 124.
2. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Индикация асинхронного хода мощных турбогенераторов. "Тезисы докладов и сообщений научно-технической конференции по обмену опытом эксплуатации устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики в энергосистемах Урала. Свердловск, 1974.
3. Вязовский А.К., Монюшко Н.Д., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Выявление асинхронного хода при потере возбуждения мощных турбогенераторов. "Электрические станции", № 2. 1975.
4. Вязовский А.К., Баев А.В. К вопросу отстройки от качаний устройств автоматики асинхронного хода турбогенератора. "Электрические станции", № 12, 1974.
5. Вязовский А.К., Баев А.В., Столбов Ю.А. Определение времени разгона турбогенератора до установившегося скольжения при потере возбуждения. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧИИ, 1974, № 141.
6. Вязовский А.К., Рязанов Ф.П., Монюшко Н.Д., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Экспериментальное исследование устройств выявления потери возбуждения турбогенератора ТГВ-300. Там же.
7. Вязовский А.К. Токи и моменты синхронной машины в переходном режиме при инвертировании системы возбуждения. Сб. "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧИИ, 1975, № 158.
8. Вязовский А.К., Марко Г.В., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Анализ работы измерительных преобразователей реактивных мощности и тока трехфазной сети". Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧИИ, 1975, № 160.
9. Вязовский А.К., Баев А.В., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Устройство для защиты турбогенератора при потере возбуждения. Там же.
10. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М., Хуснуллин З.С. Аппроксимация нелинейных зависимостей с помощью стабилитронов. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". (Краткое изложение докладов к научно-технической конференции), Челябинск, ЧИИ, 1969.

- II. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М., Хуснуллин З.С.
О влиянии сопротивления нагрузки на работу статического преобразователя мощности. Сб. "Вентильные преобразователи в энергетических установках", Челябинск, ЧИИ, 1970, № 70
- I2. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М., Хуснуллин З.С.
Некоторые вопросы работы и наладки двухэлементного статического преобразователя активной мощности. Там же.
- I3. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М., Хуснуллин З.С.
Расчет преобразователя для измерения мощности в рабочем диапазоне. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧИИ, 1970, № 80.
- I4. Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М. Двухэлементный трехфазный статический преобразователь мощности. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧИИ, 1971, № 96.
- I5. Буликтю А.Д., Вязовский А.К., Столбов Ю.А., Торбенков Г.М.
Устройство для измерения мощности трехфазной цепи переменного тока. Авт.св.СССР, № 263739, от 28.VI.1969 г.
- I6. Вязовский А.К., Баев А.В., Монюшко Н.Д., Столбов Ю.А.,
Торбенков Г.М. Устройство для защиты турбогенератора при потере возбуждения. Авт.св.СССР, № 456338, от 19.XI.1972 г.