

621.316.925

0-35

Библиотека электротехника

Н. И. Овчаренко

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ
АВТОМАТИКА
СИНХРОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ
И КОМПЕНСАТОРОВ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

“Библиотечки электротехника”:

- Могузов В. Ф. **Обслуживание силовых трансформаторов** (часть 1).
 Овчинников В. В. **Защита электрических сетей 0,4 – 35 кВ** (часть 2).
 Георгиади В. Х. **Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд** (части 1 – 3).
 Файбисович Д. Л., Карапетян И. Г. **Укрупненные стоимостные показатели электрических сетей 35 – 1150 кВ**.
 Добрусин Л. А. **Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники**.
 Киреева Э. А., Орлов В. В., Старкова Л. Е. **Электроснабжение цехов промышленных предприятий**.
 Киреева Э. А. **Справочные материалы по электрооборудованию**.
 Семенов В. А. **Противоаварийная автоматика в ЕЭС России**.
 Торопцев Н. Д. **Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок**.
 Иноземцев Е. К. **Ремонт асинхронных электродвигателей электростанций**.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. **Российские и зарубежные газеты и журналы**.

Индексы “Библиотечки электротехника”

— приложения к журналу **“Энергетик”**

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

Адрес редакции
 журнала **“Энергетик”**:

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06, факс 234-74-21.

E-mail: energy@mail.magelan.ru; energetick@mail.ru.

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу **“Энергетик”**

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 10 (70)

Н. И. Овчаренко

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ АВТОМАТИКА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ

Москва

ИТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2004

29044

НИГРЭС

НАУЧНО-
 ТЕХНИЧЕСКАЯ
 БИБЛИОТЕКА

Главный редактор журнала "Энергетик" А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

"Библиотечки электротехника"

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабал

Овчаренко Н. И.

О-35 Микропроцессорная автоматика синхронных генераторов и компенсаторов. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2004. — 96 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик". Вып. 10 (70)].

Рассматриваются алгоритмы функционирования и техническая реализация разработанных в последнее время микропроцессорных программных устройств автоматического управления нормальными режимами работы синхронных генераторов, а также вращающихся и статических компенсаторов реактивной мощности.

Для эксплуатационного персонала электрических станций и подстанций.

ISSN 0013-7278 © НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2004

Предисловие

Внедрение в технику автоматического управления электроэнергетическими системами методов и технических средств обработки информации цифровой вычислительной техникой обусловило создание электроэнергетическими научно-исследовательскими организациями микропроцессорных автоматических устройств управления нормальным режимом работы синхронных генераторов электрических станций и компенсаторов реактивной мощности подстанции [1 – 3]. Эти устройства являются интеллектуальными техническими средствами с присущими микропроцессорной вычислительной технике информационными свойствами и сервисными функциями, существенно повышающими эффективность автоматического управления.

Микропроцессорным автоматическим устройствам присущи важные преимущества и достоинства:

многофункциональность и малые размеры;

возможность удаленного (от ПЭВМ автоматизированного рабочего места оператора) изменения настройки и программ функционирования;

автоматическое тестирование и самодиагностика;

выдача оператору информации о состоянии управляемых электроэнергетических объектов;

регистрация и хранение информации о развитиях аварийных ситуаций, функционировании и эффективности действия устройств автоматического управления;

возможность вхождения в состав автоматизированного управления электрической станцией и электроэнергетической системой и др.

Разработаны цифровые автоматические синхронизаторы генераторов аналого-цифровой — в Белорусской политехнической академии [7]; цифровой с аналоговым импульсным преобразователем — в научно-технической фирме (НТФ) "Радиус-Автоматика" типа "Спринт" [6] и полнофункциональный микропроцессорный

АС-М — во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) [5]. В ВЭИ как ведущей научно-исследовательской организации по разработке автоматических устройств управления нормальными режимами создан первый микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения (АРВ) синхронных генераторов сильного действия АРВ-СДМ [8], находящийся в эксплуатации на нескольких электростанциях. Совместно с АО "Электросила" в ВЭИ и во ВНИИ "Электромаш" (г. Санкт-Петербург) разработаны новые более совершенные микропроцессорные автоматические регуляторы возбуждения синхронных генераторов [9, 10] и создан [18] двухканальный микропроцессорный АРВ перспективных асинхронизированных генераторов. Разработаны [11 — 14] микропроцессорные автоматический регулятор частоты вращения и активной мощности гидро- и турбогенераторов, электрическая часть автоматической системы регулирования частоты и активной мощности (ЭЧСР-М) синхронных генераторов и программная автоматика оптимального распределения нагрузки тепловой электростанции между турбогенераторами. Разработаны алгоритмы наиболее эффективного, обеспечивающего полную загрузку синхронных компенсаторов потребляемой реактивной мощности, автоматического регулирования их знакопеременного тиристорного возбуждения [2]. В связи с созданием мощных статических реакторно-конденсаторных с управляемым тиристорным преобразователем компенсаторов (СТК) [15] разработана микропроцессорная система автоматического управления ими [16].

Акционерным обществом "АББ Реле-Чебоксары" и НТФ "Радиус-Автоматика" поставляются микропроцессорные автоматические регуляторы коэффициентов трансформации трансформаторов собственных нужд синхронных генераторов.

Указанные микропроцессорные автоматические устройства и рассматриваются в настоящей брошюре.

**Замечания и пожелания по данной брошюре
просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала "Энергетик".**

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Микропроцессорные автоматические синхронизаторы генераторов

1.1. УСЛОВИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Вырабатывающие электроэнергию генераторы электрических станций в составе электроэнергетических систем (ЭЭС) работают синхронно — вращаются с одинаковой частотой, соответствующей единой номинальной частоте промышленного переменного тока $f_c = 50$ Гц, или $\omega_c = 2\pi f_c = 100\pi$ рад/с. Механическая частота вращения определяется числом пар полюсов роторов, представляющих собой электромагниты постоянного тока. Турбогенераторы тепловых электростанций (ТЭС) обычно с двухполюсным ротором вращаются с частотой 50 с⁻¹ или 3000 мин⁻¹. Тихоходные гидрогенераторы гидравлических электростанций (ГЭС) с многополюсным ротором имеют частоту вращения $150 - 300$ мин⁻¹.

В установившемся режиме параллельной работы одноименные (фазные или междуфазные) ЭДС генератора E_r и напряжение $U_{ш}$ шин электростанции сдвинуты по фазе на рабочий угол δ_r , определяемый активной мощностью, отдаваемой генератором в ЭЭС:

$$P_r = (E_r U_{ш} / X_r) \sin \delta_r, \quad (1.1)$$

где $X_r = X_d$ — внутреннее, практически индуктивное (синхронное) сопротивление обмоток статора генератора в установившемся режиме его работы.

При электромеханических переходных процессах (качаниях) угол δ_r колебательно изменяется с амплитудой, не превышающей $\delta_{гм} < \pi/2$.

Перед включением генератор G (рис. 1.1) возбуждается: контактом автомата гашения поля ASV обмотка ротора LG подключается к возбудителю GE , при этом контактор KM отключает от нее гаситель-

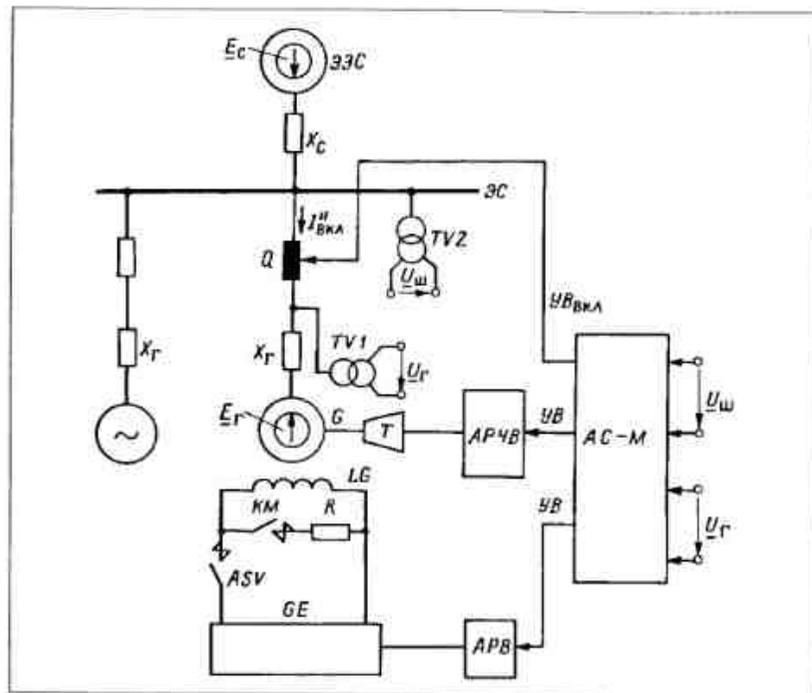


Рис. 1.1. Упрощенная схема электрической части электростанции и автоматического управления синхронным генератором при его подтожке и включении на параллельную работу с электроэнергетической системой

ный резистор R . В момент включения выключателя Q (замыкания его контактов) ЭДС холостого хода генератора должна совпадать по фазе с напряжением на шинах электростанции — угол δ_r должен быть равен нулю.

Совпадение по фазе ЭДС E_r генератора и напряжения $U_{ш}$ на шинах электростанции — **первое условие включения генератора на параллельную работу**.

Вторым очевидным условием является равенство амплитуд (или действующих значений) ЭДС генератора и напряжения на шинах электростанции.

Однако перед включением генератор разворачивается турбиной, его частота вращения ω_r увеличивается, а если и устанавливается, то обычно несколько меньшей, а иногда и большей указанной синхронной $\omega_c = \omega_n = 100\pi$ рад/с, т.е. всегда имеет место разность частот

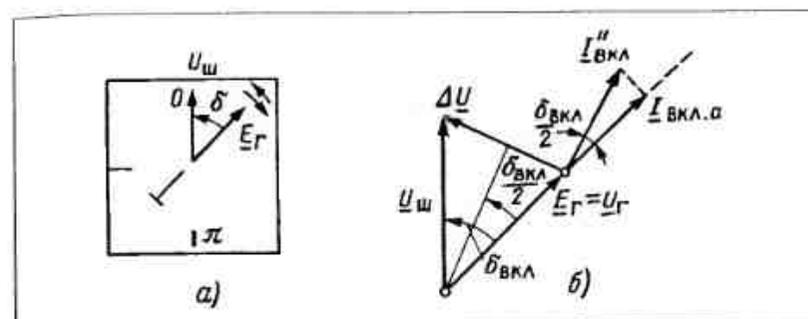


Рис. 1.2. Схема синхроскопа (а) и векторная диаграмма напряжений и токов в момент включения генератора (б)

вращения — частота скольжения генератора $\omega_s = \omega_c - \omega_r$. Она должна быть весьма малой перед включением синхронного генератора: ее относительное абсолютное значение (скольжение генератора) не должно превышать

$$s = \omega_r / \omega_c = 1 - \omega_r / \omega_c \leq \pm 0,01 = \pm 1,0\%.$$

При большем скольжении после включения генератора под влиянием избыточной кинетической энергии ротора, пропорциональной ω_s^2 , могут развиваться настолько сильные его качания, что генератор выпадет из синхронизма.

Близкая к синхронной частота вращения генератора — третье условие успешной его синхронизации.

Неравенство частот вращения $\omega_r \neq \omega_c$ обуславливает периодические изменения угла δ_r :

$$\delta_r = \omega_s t$$

— вращение вектора E_r относительно вектора $U_{ш}$.

Вращение отображается синхроскопом (рис. 1.2, а), расположенным на шите электростанции (колонке синхронизации): его стрелка, символизирующая вектор E_r , вращается (как секундная стрелка часов, но может вращаться и в обратную сторону, если $\omega_r > \omega_c$). Вектор $U_{ш}$ предполагается неподвижным, расположенным вертикально и направленным вверх (указывающим 12 ч). В частности, при указанном скольжении $s = 0,01$ стрелка синхроскопа совершает один оборот за 2 с. Совпадение векторов E_r и $U_{ш}$ соответствует $\delta_{вкл} = 0$.

В связи с непрерывным изменением угла сдвига фаз возникает вероятность ошибочного, абсолютно недопустимого включения генератора при значительных углах сдвига фаз, особенно при $\delta_r = \pi$, т.е. когда ЭДС генератора и напряжение на шинах электростанции находятся в противофазе. В этом случае по обмоткам статора генератора будет проходить ударный ток включения, в худшем случае при $\delta_r = \pi$ — в 2 раза больший тока трехфазного короткого замыкания (КЗ) на его выводах.

В связи с указанным существует главная, крайне ответственная задача выбора момента времени подачи воздействия (команды) на включение выключателя Q синхронного генератора (см. рис. 1.1), имеющего собственное время включения $t_{вкл} = 0,2 \div 0,5$ с.

Таким образом, воздействие (команда) на включение выключателя синхронизируемого генератора формируется с опережением указанного момента времени совпадения по фазе ЭДС генератора и напряжения шин электростанции.

1.2. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИНХРОНИЗАТОРОВ

При автоматическом управлении включением генератора на параллельную работу (его автоматической синхронизации) выбор момента времени подачи команды на включение выключателя определяет автоматическое устройство — автоматический синхронизатор.

В эксплуатации находятся полупроводниковые автоматические синхронизаторы с постоянным временем опережения (АСПВО). Они обеспечивают опережающую выдачу команды на включение выключателя Q генератора (см. рис. 1.1) по устанавливаемому не зависящему от частоты скольжения ω_s времени опережения, равному времени включения выключателя $t_{он} = t_{вкл} = \text{const}$.

Для фиксирования опережения используется напряжение биеений u_s (рис. 1.3) двух равных по амплитуде E_m синусоидальных напряжений с близкими частотами — вторичных [на выводах измерительных трансформаторов $TV1$ и $TV2$ (см. рис. 1.1)] напряжений одноименных фаз генератора $u_r = E_m \sin \omega_r t$ и шин электростанции $u_{ш} = E_m \sin \omega_c t$.

$$u_s = u_{ш} - u_r = E_m (\sin \omega_c t - \sin \omega_r t) = 2E_m \sin \frac{\omega_c - \omega_r}{2} t \cos \frac{\omega_c + \omega_r}{2} t \approx \approx 2E_m \sin \frac{\omega_s}{2} t \cos \omega_c t. \quad (1.2)$$

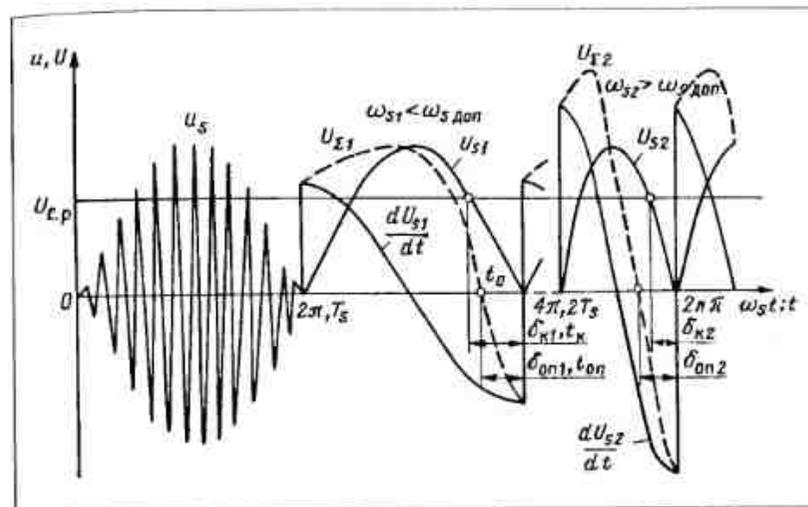


Рис. 1.3. Временные графики напряжения биеения u_s , напряжения U_s , его производной и их суммы

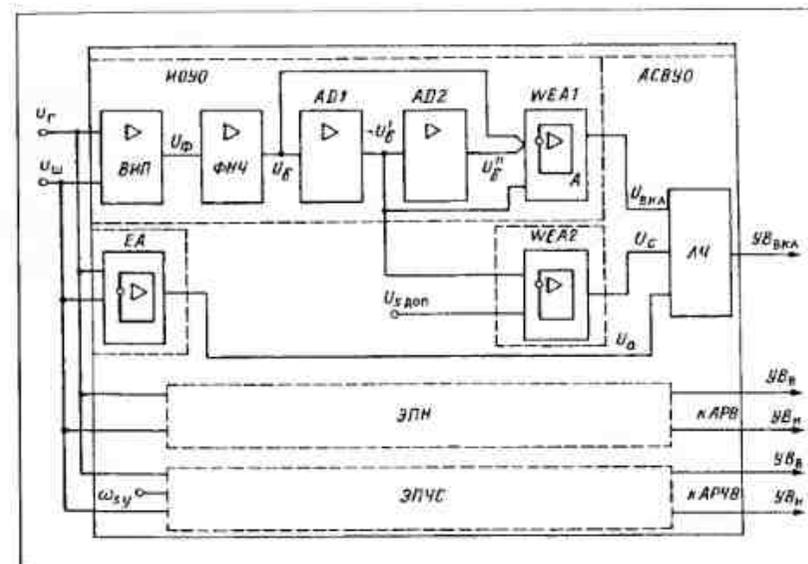


Рис. 1.4. Упрощенная функциональная схема автоматического синхронизатора с вычисляемым углом опережения

На колонке синхронизации действующее значение напряжения биенной демонстрируется вольтметром, показания которого изменяются колебательно с частотой скольжения от нулевого значения до максимального, соответствующего $U_{\text{ши}} = 2E$.

Напряжение U_s , выпрямленное и сглаженное фильтром нижних частот (ФНЧ) (см. рис. 1.4), задерживающим косинусоидальную составляющую (1.2) с частотой $(\omega_c + \omega_s)/2 \approx \omega_c$, изменяется по полусинусоиде (см. рис. 1.3) с частотой $\omega_s/2$:

$$U_s = 2E \sin(\omega_s t/2) \quad (1.3)$$

и проходит через нуль в моменты времени T_s, nT_s , соответствующие значениям текущего угла сдвига фаз $\delta_r = 2\pi; 2n\pi$, т.е. именно в моменты времени совпадения по фазе напряжений генератора $U_r = E_r$ и шин $U_{\text{ши}}$ электростанции.

Автоматический синхронизатор фиксирует момент времени выдачи команды на включение генератора по переходу через нулевое значение суммы напряжения U_s и напряжения U , моделирующего скорость изменения напряжения U'_s :

$$U_{\Sigma} = k_1 U_s + k_2 U'_s, \quad (1.4)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты, определяющие уставку времени опережения автоматического синхронизатора.

Скорость изменения функции определяется ее производной $U'_s = dU_s/dt$, получаемой дифференцированием [3]; производная синусоидальной функции времени является косинусоидальной функцией, умноженной на частоту, в данном случае на $\omega_s/2$.

Поэтому, поскольку напряжение U_s изменяется во времени в соответствии с полусинусоидами, изменение напряжения U'_s происходит по полукосинусоидам (см. рис. 1.3).

В соответствии с формулами (1.3) и (1.4)

$$U_{\Sigma} = E(2k_1 \sin \frac{\omega_s}{2} t + k_2 \omega_s \cos \frac{\omega_s}{2} t). \quad (1.5)$$

Оказывается [3], что при углах опережения $\delta_{\text{оп}} < \pi/3$ интервал времени между моментами переходов через нулевые значения напряжения U_{Σ} и напряжения U_s практически не зависит от разности частот ω_r . Указанный интервал и есть время опережения $t_{\text{оп}}$ (см. рис. 1.3), поскольку, как указывалось, в момент перехода через нуль напряжения U_{Σ} синхронизатор выдает воздействие на включение

выключателя, а в момент перехода через нуль напряжения U_s ЭДС генератора E_r совпадает по фазе с напряжением $U_{\text{ши}}$ на шинах электростанции.

Действительно, приравнивание нулю выражения (1.5) дает

$$2k_1 \sin \frac{\omega_s}{2} t_0 + k_2 \omega_s \cos \frac{\omega_s}{2} t_0 = 0. \quad (1.6)$$

С учетом того, что согласно графикам (см. рис. 1.3) углы $\omega_s t_0$ и $\omega_s t_{\text{оп}}$ являются дополнительными к углу 2π (при замене $\omega_s t_0$ на $\omega_s t_{\text{оп}}$ синус меняет знак), после деления обеих частей равенства (1.6) на $\cos(\omega_s t_{\text{оп}}/2)$ получается

$$-2k_1 \operatorname{tg}(\omega_s t_{\text{оп}}/2) + k_2 \omega_s = 0. \quad (1.7)$$

При ограничении угла опережения $(\omega_s t_{\text{оп}}/2) < \pi/6$ тангенс угла численно практически совпадает со значением угла в радианах [3]. Поэтому, согласно равенству (1.7), после замены $\operatorname{tg}(\omega_s t_{\text{оп}}/2)$ на угол $\omega_s t_{\text{оп}}/2$ получается, что время $t_{\text{оп}}$ не зависит от угла $\omega_s t_{\text{оп}}$:

$$t_{\text{оп}} \approx k_2/k_1. \quad (1.8)$$

Определяющий таким способом время опережения автоматический синхронизатор включает генератор при $\delta_{\text{вкл}} = 0$, однако только при постоянной (установившейся) частоте вращения ω_r синхронного генератора.

Угол опережения синхронизатора и частота скольжения генератора ограничиваются необходимостью указанного примерного численного равенства угла сдвига фаз в радианах и его тангенса. Максимальная разность частот, при которой синхронизатор включает генератор, остается существенно меньшей допустимой по условию устойчивости синхронизации.

Допустимая частота скольжения $\omega_{\text{слон}}$ контролируется синхронизатором путем задания ему допустимого угла опережения $\delta_{\text{оп, доп}}$, поскольку, в частности, установившаяся (неизменная) частота определяется как

$$\omega_{\text{слон}} = \delta_{\text{оп, доп}} / t_{\text{вкл}}$$

Временные графики (см. рис. 1.3) иллюстрируют процесс контроля $\omega_{\text{слон}}$ синхронизатором с постоянным временем опережения.

Производится сопоставление времени опережения $t_{оп} = \text{const}$ с изменяющимся обратно пропорционально частоте ω_s временем контроля t_k или углом контроля δ_k :

$$t_k = \delta_{оп,лон} / \omega_s; \quad \delta_k < \delta_{оп,лон} \quad (1.9)$$

Если частота скольжения $\omega_s < \omega_{слон}$ (см. рис. 1.3), то время $t_k > t_{оп}$, а если $\omega_s > \omega_{слон}$, то $t_k < t_{оп}$. Начало отсчета времени контроля t_k фиксируется измерительным реле минимального напряжения, подключенным к напряжению U_{δ} с установленным напряжением срабатывания [см. (1.6)]:

$$U_{с.р} = 2E \sin(\delta_{оп,лон} / 2). \quad (1.10)$$

При $\omega_{sl} < \omega_{слон}$ первым по времени срабатывает реле напряжения, а затем синхронизатор, и реализация его сигнала на включение генератора разрешается. При $\omega_{sl} > \omega_{слон}$ сигнал синхронизатора появляется до срабатывания реле напряжения, и его действие на включение генератора запрещается.

Однако при переменной частоте скольжения ω_s , т.е. при наличии ускорения вращения генератора a_s , включение происходит при некотором угле $\delta_{вкл} \neq 0$. При этом возникает ударный ток включения генератора $I_{вкл}^*$, возбуждаемый геометрической разностью напряжений U_r и $U_{ш}$, равной (см. рис. 1.2, б)

$$\Delta U = 2E \sin(\delta_{вкл} / 2). \quad (1.11)$$

Ток включения $I_{вкл}^*$, ограничиваемый сверхпереходным внутренним сопротивлением генератора $X_d^* \ll X_d$, оказывает ударное динамическое воздействие на обмотки генератора, а его активная составляющая $I_{вкл,а}$ (см. рис. 1.2, б), совпадающая по фазе с ЭДС генератора, создает ударный вращающий момент на вал синхронного генератора.

Современные аналоговые микросхемные [2] и разработанные в последнее время цифровые микропроцессорные [5, 6] автоматические синхронизаторы вычисляют угол опережения в соответствии с равномерно ускоренным (или замедленным) законом вращения синхронного генератора с изменяющейся частотой вращения гене-

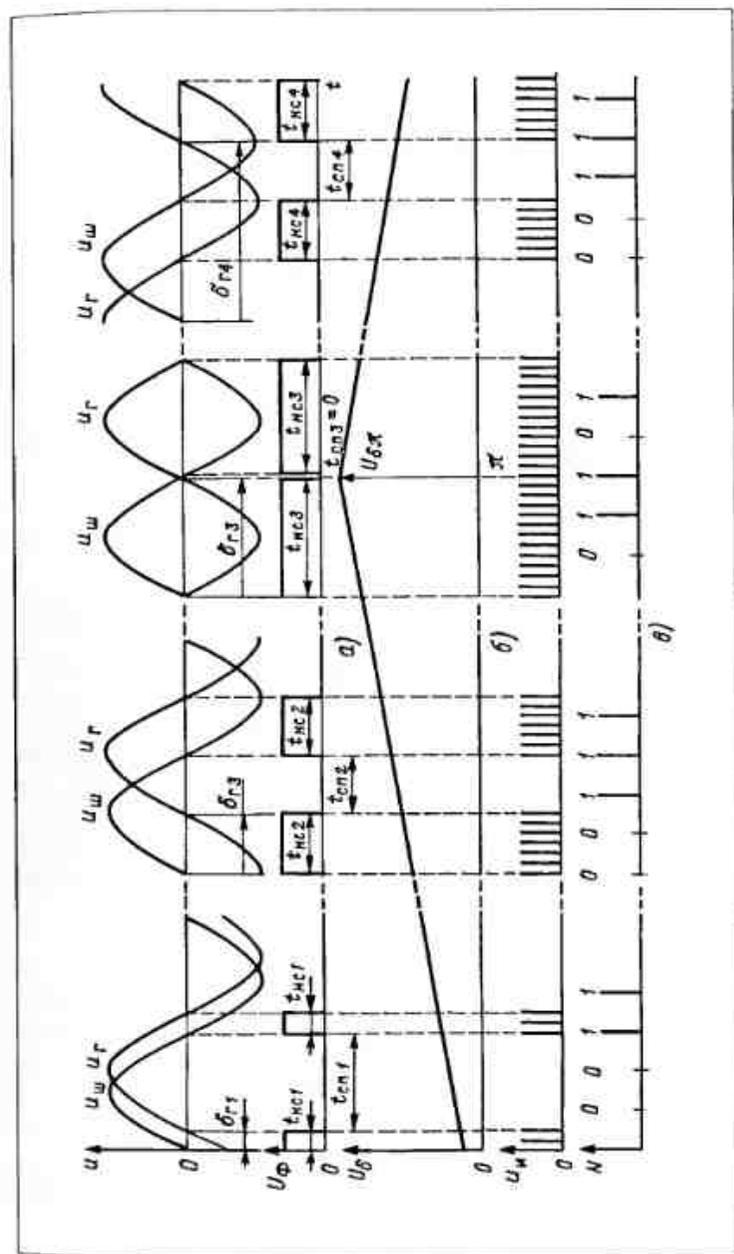


Рис. 1.5. Временные графики цифрового (а), непрерывного (б) и цифровых численно-аналогового (в) и в последовательном двоичном коде (z) сигналов информации об угле δ сдвига фаз между напряжениями на шинах электростанции и синхронного генератора

ратора при постоянном ускорении a_y . При времени включения выключателя $t_{\text{вкл}}$

$$\delta_{\text{он}} = \omega_{\text{сл}} t_{\text{вкл}} \pm a_y \frac{t_{\text{вкл}}^2}{2}, \quad (1.12)$$

где $\omega_{\text{сл}}$ — частота скольжения в начальный момент вычисления угла $\delta_{\text{он}}$.

Такие синхронизаторы не имеют ограничений по углу опережения или частоте скольжения генератора и принципиально при любых их значениях обеспечивают включение синхронного генератора на параллельную работу в момент совпадения по фазе его ЭДС E_1 и напряжения $U_{\text{ш}}$ на шинах электростанции при указанном законе вращения генератора перед его синхронизацией.

Однако в случае более сложного процесса его вращения с переменным ускорением они также могут работать с погрешностью, т.е. включать выключатель синхронного генератора при некотором угле $\delta_{\text{вкл}} \neq 0$. Но это уже весьма маловероятно.

Автоматические синхронизаторы с вычисляемым углом опережения АСВУО (рис. 1.4) используют информацию непосредственно о текущем угле δ_r . В синхронизаторах времяимпульсным преобразователем ВИП формируется сигнал в виде последовательности импульсов $U_{\text{ф}}$ постоянного напряжения, длительность которых пропорциональна углу сдвига фаз δ_r , а именно равна времени несовпадения $t_{\text{нс}}$ по знаку мгновенных значений напряжений u_r и $u_{\text{ш}}$ — значение $u_{\text{ш}}$ положительно, а u_r — отрицательно или наоборот (рис. 1.5, а). Время $t_{\text{нс}}$ отображает угол δ_r сдвига фаз потому, что он равен $\delta_r = \omega_c t_{\text{нс}}$, а синхронная частота вращения в нормальном режиме работы ЭЭС, как указывалось, неизменна — равна $\omega_c = 2\pi f_c = 100\pi$ рад/с.

Постоянная составляющая U_{δ} времяимпульсного напряжения $U_{\text{ф}}$, выделяемая фильтром нижних частот (ФНЧ, см. рис. 1.4) аналогового синхронизатора, пропорциональна углу δ_r и при его изменениях непрерывно возрастает или убывает от нуля до π и от π до нуля соответственно (рис. 1.5, б).

Так как угол при вращательном движении является аналогом пути поступательного движения, а круговая частота скольжения ω_s — аналогом скорости, то сигнал информации об ω_s формируется дифференцированием напряжения U_{δ} дифференциатором АД1 (см. рис. 1.4). Как указывалось, производная определяет скорость

изменения функции. Получасное напряжение U'_{δ} отображает частоту скольжения:

$$|U'_{\delta}| = U_{\omega} - dU_{\delta}/dt - \omega_s, \quad (1.13)$$

Аналогично сигнал информации об ускорении a_y в виде напряжения U''_{δ} формируется дифференцированием напряжения U'_{δ} (дифференциатор АД2):

$$|U''_{\delta}| = U_a = dU'_{\delta}/dt = d^2U_{\delta}/dt^2 - a_y. \quad (1.14)$$

По напряжениям U'_{δ} и U''_{δ} согласно (1.12) и вычисляется угол опережения.

Сигнал $U_{\text{вкл}}$ (см. рис. 1.4) автоматический синхронизатор выдает при условии

$$\delta + \delta_{\text{он}} = 2\pi, \quad (1.15)$$

т.е. при равенстве (в аналоговом синхронизаторе) нулю суммы напряжений U_{δ} и U'_{δ} , U''_{δ} , умноженных согласно (1.12) на соответствующие коэффициенты, отображающие $t_{\text{вкл}}$ и $t_{\text{вкл}}^2/2$.

Сигнал $U_{\text{вкл}}$ формирует аналоговый сумматор-компаратор (элемент сравнения суммы напряжений в данном случае с нулевым значением) WEAL: он выполняется на интегральном операционном усилителе А, на два входа (прямой и инверсный — обозначен кружочком) которого поступают положительные напряжения U_{δ} и U'_{δ} и отрицательное напряжение U''_{δ} (дифференциатор АД1, также выполняемый на интегральном операционном усилителе, меняет знак напряжения U'_{δ} при его дифференцировании).

Однако сигнал $U_{\text{вкл}}$ преобразуется в управляющее воздействие $U_{\text{ВВкл}}$ на включение выключателя Q (см. рис. 1.1) генератора логической частью ЛЧ только при наличии сигнала U_c (см. рис. 1.4) от сумматора-компаратора WEAL о том, что $\omega_s < \omega_{\text{слдоп}}$ (моделируется напряжением $U_{\text{слдоп}}$) и сигнала U_n от компаратора ЕА, сравнивающего амплитуды напряжений $U_{\text{ш}}$ и U_r , т.е. при выполнении всех трех условий точной синхронизации.

При $|\omega_s| > \omega_{\text{слдоп}}$ или неравенстве амплитуд (действующих значений) напряжений $U_{\text{ш}} \neq U_r$ устройство точной автоматической синхронизации формирует управляющие воздействия $U_{\text{Вв}}$ (выше) или $U_{\text{Вн}}$ (ниже) на автоматический регулятор частоты вращения АРЧВ и регулятор возбуждения АРВ синхронного генератора, формируемые измерительными элементами подгонки частоты скольжения к уста-

новленной (синхронизатор имеет уставку по частоте скольжения $\omega_{\text{сл}}$) ЭПЧС и подгонки абсолютных значений напряжений ЭПН, входящих в его состав.

В цифровых автоматических синхронизаторах прямоугольный импульс напряжения $U_{\text{пр}}$ преобразуется в числоимпульсный сигнал в виде последовательности счетных (тактовых) импульсов $u_{\text{т}}$, размещающихся на интервале времени $t_{\text{тс}}$ (рис. 1.5, *в*). Число N единичных импульсов преобразуется в цифровой сигнал в двоичной системе счисления, по которой функционирует микропроцессор, например в последовательный двоичный код (рис. 1.5, *з*). Затем производится численное дифференцирование, определяющее двоичные коды скольжения и ускорения вращения генератора.

Вычисление угла опережения производится цифровым сумматором. Хотя, как указывалось, автоматические синхронизаторы с вычисляемым углом опережения могут работать с любым его значением, оно ограничивается принудительно на уровне $\delta_{\text{оп,доп}} = 2\pi/3$. Это необходимо и для ограничения частоты скольжения, допустимой по условию устойчивости синхронизации генератора.

1.3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИНХРОНИЗАТОРЫ

Научно-технической фирмой (НТФ) "Радиус-Автоматика" и Всероссийским электротехническим институтом разработаны и поставляются цифровые микропроцессорные автоматические синхронизаторы типов "Спринт" и АС-М соответственно [5, 6]. Они являются специализированными цифровыми вычислительными устройствами и производят:

дискретизацию по времени с интервалом T , составляющим небольшую долю периода $T_{\text{п}}$ промышленной частоты (обычно $T = T_{\text{п}}/20 = 1 \text{ мс}$ или $T = T_{\text{п}}/12 = 1,66 \text{ мс}$) мгновенных значений ЭДС генератора $E_g = U_g$ и напряжения $U_{\text{ш}}$ на шинах электростанции, т.е. формирование дискретных мгновенных значений-выборок $U_g(nT) = U_g(nT)$ и их преобразование в цифровые сигналы в двоичной системе счисления (двоичные коды);

вычисление амплитуд напряжений и их разностей $\Delta U_m(nT)$ в каждый интервал дискретизации;

фиксирование один раз за период $T_{\text{п}}$ дискретных значений частоты скольжения $\omega_s(nT)$ и вычисление дискретных значений ускорения вращения генератора $a_s(nT)$;

вычисление 1 раз за период скольжения T_s угла опережения синхронизатора по соотношению, соответствующему формуле (1.12):

$$\delta_{\text{оп}}(nT_s) = \omega_s(n_0 T) t_{\text{вкл}} + a_s(nT) (t_{\text{вкл}}^2)/2 = \omega_s(n_0 T) t_{\text{вкл}} + \omega_s(nT) \pm \omega_s(n-1) T [(t_{\text{вкл}}^2)/(2T)]; \quad (1.16)$$

вычисление длительностей импульсных сигналов и формирование времени импульсных управляющих воздействий УВ на микроэлектродвигатели установочных элементов автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генератора G и частоты вращения (АРЧВ) турбины T (см. рис. 1.1 и 1.4) с уменьшающимися длительностями по мере приближения амплитуды ЭДС генератора к амплитуде напряжения шин электростанции, а частоты скольжения генератора к установившейся $\omega_{\text{ст}}$, оптимальной для функционирования автоматического синхронизатора;

формирование дискретного воздействия $UB_{\text{вкл}}$ на электромагнит включения длительностью, достаточной для включения выключателя Q (см. рис. 1.1).

Информационные функции микропроцессорных синхронизаторов прежде всего состоят в выдаче на экран встроенного жидкокристаллического дисплея в диалоговом режиме информации о:

правильности подключения к измерительным трансформаторам напряжения ($TV1, TV2$ на рис. 1.1) и к цепям управления приводами установочных элементов АРВ и АРЧВ и электромагнита включения выключателя;

уставках синхронизатора — установленных значениях допустимых разности амплитуд и частоты скольжения генератора и времени опережения включения выключателя;

ЭДС генератора и напряжении шин электростанции и частоте вращения генератора;

истинных значениях разности амплитуд, частоты скольжения, угла опережения, угла включения и времени включения выключателя;

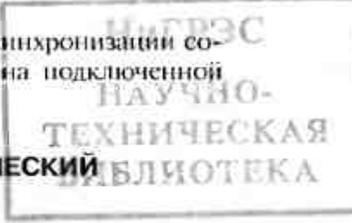
длительности процесса синхронизации, времени и дате его проведения.

Информация о десяти последних процессах синхронизации сохраняется в памяти и может анализироваться на подключенной ПЭВМ.

1.4. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНХРОНИЗАТОР "СПРИНТ"

Конструктивно автоматический синхронизатор размещен в плоском металлическом корпусе (рис. 1.6, *а*) с передним подключением внешних цепей: сборка винтовых зажимов (клемм) и контро-

двух



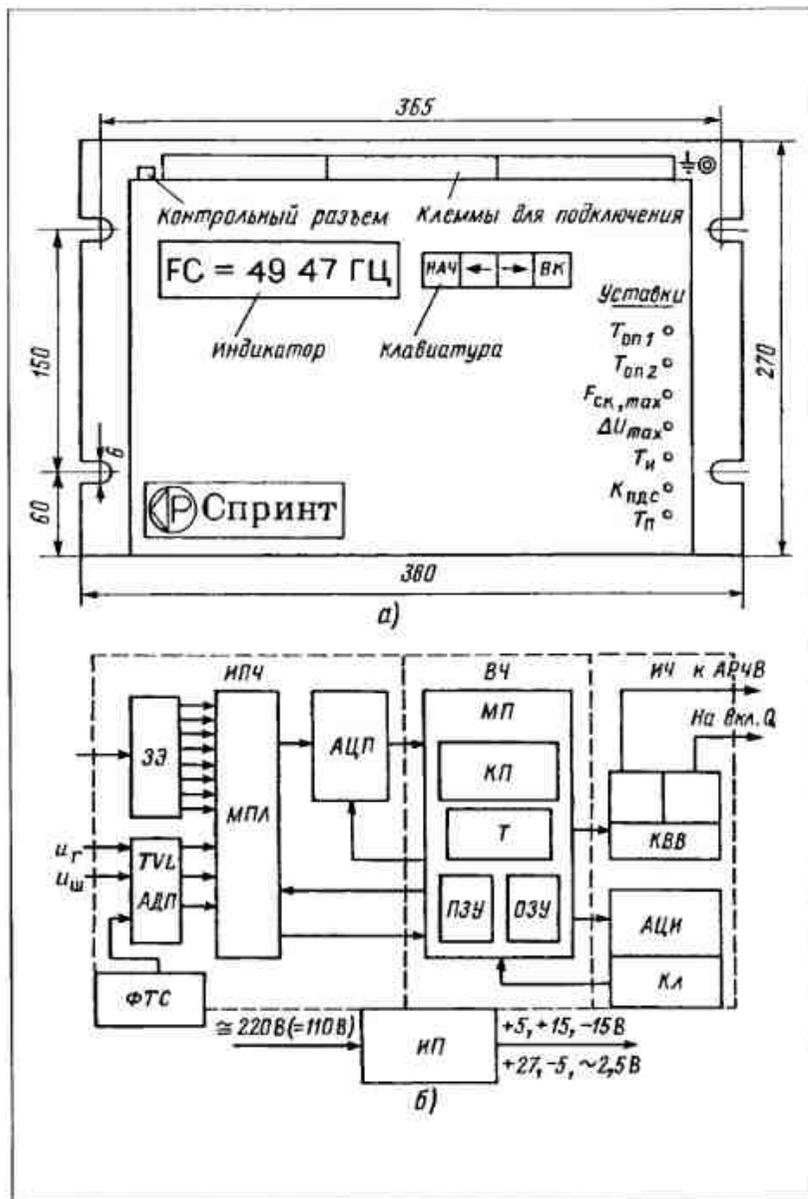


Рис. 1.6. Внешний вид (а) и структурная схема (б) микропроцессорного автоматического синхронизатора "Спринт"

льный разъем закрываются отдельными прозрачными крышками. На передней панели расположены жидкокристаллический алфавитно-цифровой индикатор и клавиатура диалогового режима. На правой части передней панели расположены с обозначенными назначениями движки резисторов переменного сопротивления настройки синхронизатора.

Основной вычислительной частью ВЧ (рис. 1.6, б) автоматического синхронизатора является микропроцессор МП типа К1810ВМ88 с оперативным ОЗУ и постоянным ПЗУ запоминающими устройствами, контроллером прерываний КП и таймерами Т.

Измерительно-преобразовательная часть ИПЧ содержит вторичные измерительные трансформаторы TVL напряжений u_r и $u_{ш}$; аналого-дискретные преобразователи АДП синусоидальных напряжений в прямоугольные импульсы с длительностями, равными полупериодам измененных напряжений u_r и $u_{ш}$; аналоговый переключатель — мультиплексор МПЛ, подключающий к аналого-цифровому преобразователю АЦП цепи аналоговых сигналов; задающий (установочный) элемент ЗЭ и формирователь тестовых сигналов ФТС.

Комплект выходных электромагнитных реле КВР, формирующих времяимпульсные воздействия на АРЧВ турбины и дискретные воздействия на включение выключателя Q (см. рис. 1.1) генератора; алфавитно-цифровой индикатор АЦИ и клавиатура КЛ образуют исполнительную часть ИЧ). Бестрансформаторный источник питания ИП может подключаться к переменному или постоянному напряжению.

Логическим элементом совпадения (операция И) сигналов в виде указанных прямоугольных импульсов, формируемых АДП из положительного и отрицательного полупериодов напряжений u_r и $u_{ш}$ соответственно, вырабатывается времяимпульсный сигнал U_{ϕ} (см. рис. 1.4), длительность импульсов которого отображает угол δ сдвига фаз напряжений U_r и $U_{ш}$. Он выводится на контрольный разъем для возможности его наблюдения на экране внешнего осциллографа. На контрольный разъем выведено и напряжение биений u_s (см. рис. 1.3).

Времяимпульсный сигнал U_{ϕ} преобразуется в цифровой (см. рис. 1.5), отображающий дискретные значения угла сдвига фаз $\delta(nT)$. Из него, как указывалось, численным дифференцированием формируются цифровые сигналы информации о частоте скольжения $\omega_s(nT)$ и ускорении $a_s(nT)$ вращения синхронного генератора.

Автоматический синхронизатор обеспечивает следующие режимы работы:

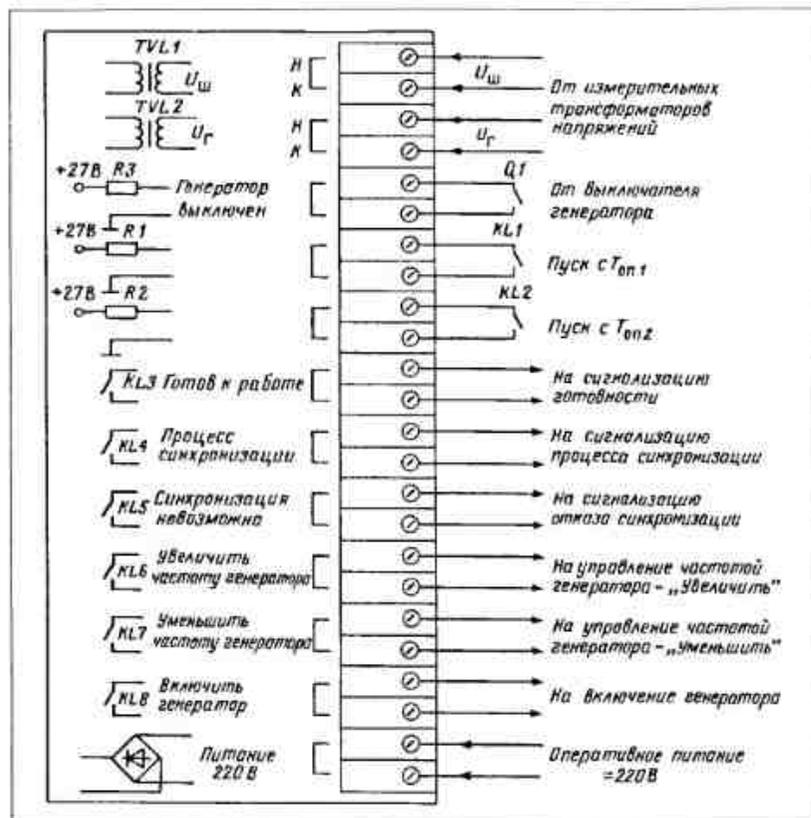


Рис. 1.7. Схема подключения синхронизатора к измерительным трансформаторам напряжения и цепям автоматического управления синхронным генератором

УСТАВКИ. в котором производится ввод или изменения установленных значений (уставок) контролируемых величин; контроль всех подводимых к устройству сигналов с непосредственным отображением текущих значений контролируемых величин;

ПРОСМОТР всех зафиксированных в памяти микропроцессора параметров последних десяти, как указывалось, процессов синхронизации;

РАБОТА, при которой производится процесс автоматической синхронизации генератора.

Режим **УСТАВКИ** диалоговый, устанавливается кнопкой **ВК** клавиатуры (см. рис. 1.6, а). Затем кнопками, обозначенными

стрелками, последовательно вызываются на индикатор установленные значения величин настройки — уставки. При необходимости они изменяются часовой отверткой, перемещающей движки резисторов переменного сопротивления уставок: времени опережения $T_{оп1}$ или $T_{оп2}$, максимальной (допустимой) частоты скольжения $F_{склmax} < 1$ Гц, допустимой разности действующих значений $\Delta U_{max} < 10\%$ напряжений генератора и шин электростанции: начальной длительности T_n импульсных воздействий на АРЧВ турбины и постоянной длительности $T_{п} < 4,0$ с паузы между ними и так называемого коэффициента подстройки $K_{пос} < 2,0$ с/Гц, определяющего зависимость длительности импульсов от разности $\Delta\omega_3(nT)$ частоты скольжения $\omega_3(nT)$ и ее установленного (постоянного для синхронизатора) значения $F_{sv} = 0,2$ Гц.

После ввода уставок контролируются входные сигналы в режиме **КОНТРОЛЬ**, а затем устройству переводится в режим **РАБОТА**. При этом производится автоматический тестовый контроль. При его успешности на экране индикатора появляется сигнал "Готов к работе".

На рис. 1.7 приведена схема подключения микропроцессорного автоматического синхронизатора "Спринт" к первичным измерительным трансформаторам напряжения $TV1$ (см. рис. 1.1) генератора U_g и $TV2$ шин электростанции $U_{ш}$ через вторичные измерительные трансформаторы $TVL1$, $TVL2$ к цепям внешних сигналов, в частности к источникам релейных сигналов "Пуск" (контакты $KL1$, $KL2$) с временем опережения $T_{оп1}$ или $T_{оп2}$, устанавливаемым резисторами R_1 , R_2 , и к вспомогательному контакту Q_1 выключателя генератора через резистор R_3 , к цепям сигнализации оператору о готовности к пуску (реле $KL3$), процессе синхронизации ($KL4$) или невозможности синхронизации ($KL5$).

Для обеспечения правильности подключения со строгим соблюдением полярности вторичных обмоток $TV1$, $TV2$ и первичных обмоток $TVL1$, $TVL2$ обозначения их начал (звездочка) и концов продублированы буквами **Н** и **К**. Выходные электромагнитные реле $KL6$ и $KL7$ выдают импульсные управляющие воздействия на уменьшение или увеличение частоты вращения генератора, а реле $KL8$ — на включение выключателя генератора.

1.5. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНХРОНИЗАТОР АС-М

Разработанный Всероссийским электротехническим институтом [4] микропроцессорный синхронизатор типа АС-М с вычисляемым

углом опережения *АСВУО* (см. рис. 1.4) является функционально полным — содержит все функциональные части: измерительный орган угла опережения *НОУО*; элементы автоматической подгонки напряжения U_i синхронного генератора *ЭПНГ* к напряжению $U_{ш}$ и частоты скольжения генератора *ЭПЧС* к установленной $\omega_{вр}$. Синхронизатор имеет канал связи (интерфейс) с внешней ПЭВМ и выход для подключения осциллографа.

Функциональная схема. Основная — вычислительная *ВЧ* (рис. 1.8) функциональная часть *АС-М* реализована на однокристалльной ЭВМ (ОЭВМ) типа КМ1816ВЕ51 с тактовым генератором частотой 11 МГц, стабилизированной внешним кварцевым резонатором *КР*, и регистрами адреса *РА* и данных *РД*. Вычислительная часть выполняет цифровое измерительное преобразование амплитуд и частот напряжений генератора u_i и шин электростанции $u_{ш}$ (см. рис. 1.1), угла δ сдвига фаз между ними и вычисляет их разности и угол $\delta_{оп}$ опережения синхронизатора по уравнению (1.12) равнопеременного вращения генератора при его подготовке к включению на параллельную работу.

Управление микроЭВМ производится измерительно-преобразовательной частью *ППЧ*. Она выполняет предварительную обработку вторичных (на выходах *ТВ1*, *ТВ2*) напряжений генератора и шин электростанции и содержит выпрямительные с частотными фильтрами аналоговые измерительные преобразователи *ИПН1*, *ИПН2* амплитуд u_i и $u_{ш}$ в непрерывные сигналы, аналого-дискретные преобразователи *АДП1*, *АДП2*, формирующие сигналы прерываний, аналого-цифровой интегральный АЦП типа К1113ПА1 [4] с коммутатором входных аналоговых сигналов — мультиплексором *МПШ*, регистры *РДС* входных дискретных (логических) сигналов и *РКС* контрольной суммы *ПЗУ*, задающие элементы *ЗЭ* настройки синхронизатора, формирователь тестового сигнала *ФТС* и элемент начальной установки *ЭНУ*.

В исполнительную *ИЧ* часть синхронизатора входят комплект выходных электромагнитных реле *КВР*, логический элемент *ДХ* ЗАПРЕТА несинхронного включения генератора. К ней относятся и элементы отображения информации: цифро-аналоговый преобразователь *ЦАП* типа КР572ПА1 [5], цифросинтезирующий индикатор *ЦИ*, табло светодиодных индикаторов *СИ*, дисплей *Д* и осциллограф *О*.

Измерительно-преобразовательная и исполнительная части связаны с вычислительной частью шинами и регистрами адреса *ША*, *РА* и данных *ШД*, *РД* и содержат обязательные для микропроцессорных устройств элементы их гальванического отделения (развязки) от вы-

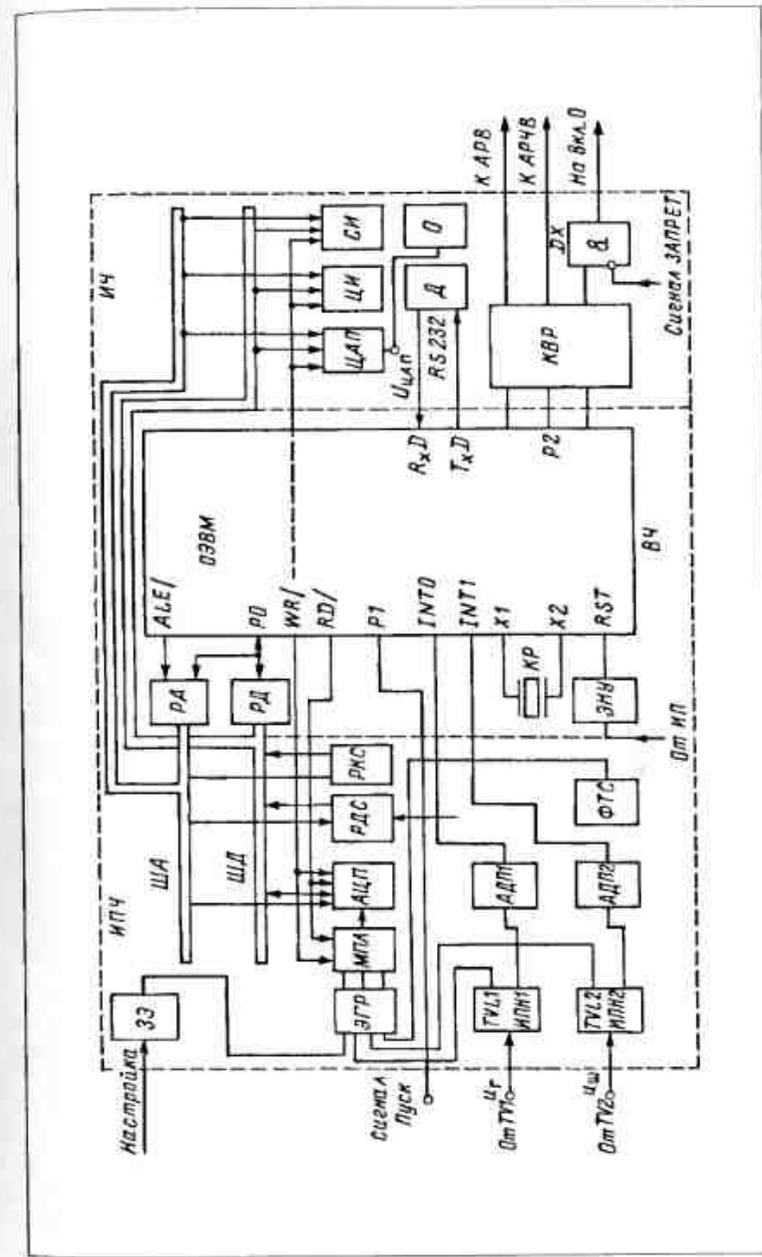


Рис. 1.8. Функциональная схема микропроцессорного автоматического синхронизатора *АС-М* по определению угла сдвига фаз 6

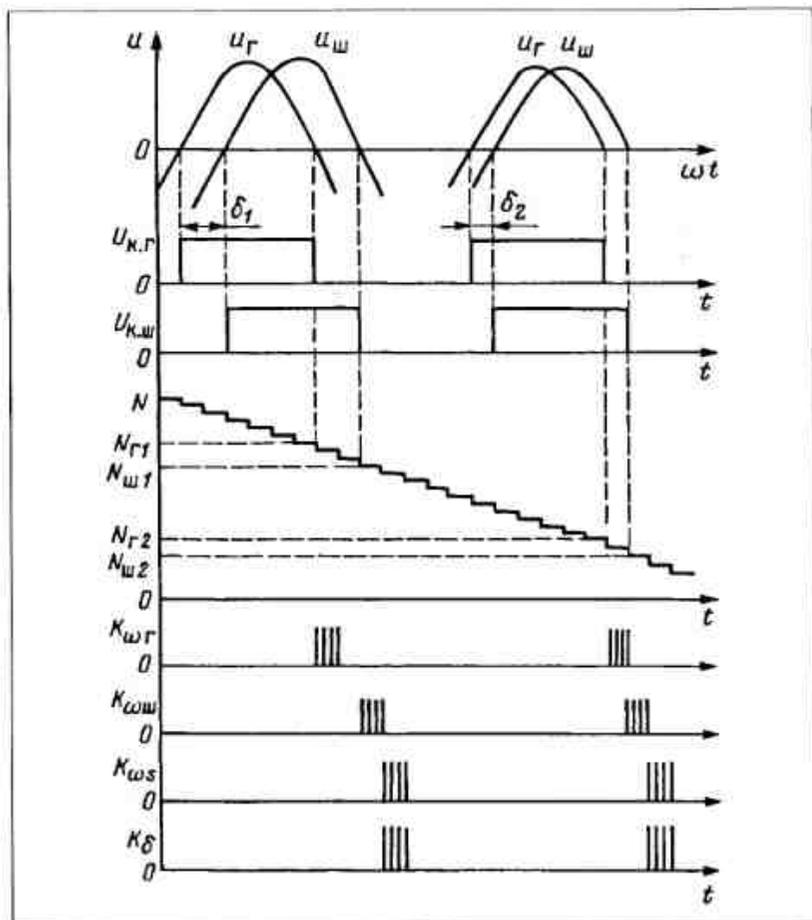


Рис. 1.9. Временные графики, иллюстрирующие действие вычислительной части синхронизатора АС-М

числительной части. Такими элементами в цепях дискретных сигналов служат электромагнитные реле, подключаемые к отдельному источнику питания, гальванически развязанному с общим источником питания ИП автоматического устройства (на рис. 1.8 не показан).

В цепях аналоговых сигналов применяются оптоэлектронные пары (светодиодом и транзистором) оптоэлектронные элементы с двумя интегральными операционными усилителями [5].

Действие синхронизатора. Вычислительная часть синхронизатора функционирует на основе шифрового времяимпульсного преобразования с использованием вычитающего (сканируемого) счетчика импульсов тактовой частоты (таймера микроЭВМ), который периодически после каждого обнуления полностью заполняется. Длительности периодов ЭДС генератора и напряжения электростанции, необходимые для вычисления их частот и частоты скольжения, и время несовпадения их мгновенных значений по знаку, пропорциональное углу δ сдвига фаз, фиксируются считыванием кодов таймера в моменты времени переходов напряжений u_{Γ} и $u_{\text{ш}}$ через нулевые мгновенные значения. Считывание производится воздействием на входы прерывания *INT0* и *INT1* микроЭВМ прямоугольными импульсами $U_{\text{к.г}}$, $U_{\text{к.ш}}$ (рис. 1.9), формируемых аналого-дискретными преобразователями напряжений генератора и шин соответственно. Текущие коды N_{Γ} , $N_{\text{ш}}$ фиксируются в моменты времени исчезновения напряжений $U_{\text{к.г}}$, $U_{\text{к.ш}}$. Их разность $N_{\Gamma} - N_{\text{ш}}$ определяет код K_{δ} угла сдвига фаз δ , а числа, обратно пропорциональные разностям кодов, зафиксированных в текущем и предыдущем периодах, — частоты напряжений генератора $K_{\omega_{\Gamma}}$ и шин электростанции $K_{\omega_{\text{ш}}}$. Очевидно, что разность указанных чисел отображает частоту скольжения генератора в виде двоичного кода $K_{\omega_{\text{с}}}$.

В зависимости от результатов вычислений синхронизатор формирует времяимпульсные управляющие воздействия на задающие установочные элементы автоматических регуляторов возбуждения АРВ генератора и частоты вращения АРЧВ турбины. Если разности амплитуд и частот больше допустимых $|\Delta U_m| > \Delta U_{\text{шдоп}}$ и $|\omega_s| > \omega_{\text{сдоп}}$, то выдаются первые импульсы воздействия ограниченной установленной длительности для соответствующего изменения амплитуды и частоты ЭДС синхронного генератора. По мере уменьшения ΔU_m и ω_s вычислительной частью рассчитываются уменьшающиеся длительности импульсных воздействий.

После установления $\omega_s \approx \omega_{\text{н}}^*$ и $\Delta U_m < \Delta U_{\text{шдоп}}$ управляющие воздействия прекращаются, а синхронизатор переходит к программе вычисления угла опережения по закону (1.12) и при удовлетворении условий точной синхронизации (см. § 1.1), формирует импульсное управляющее воздействие достаточной для включения выключателя Q синхронного генератора длительности.

Синхронизатор обладает свойством однократности действия. Если выключатель не включился или тут же после включения отключился, повторное воздействие не формируется: предусмотрен новый запуск программного обеспечения путем кратковременного отключения АС-М от источника питания.

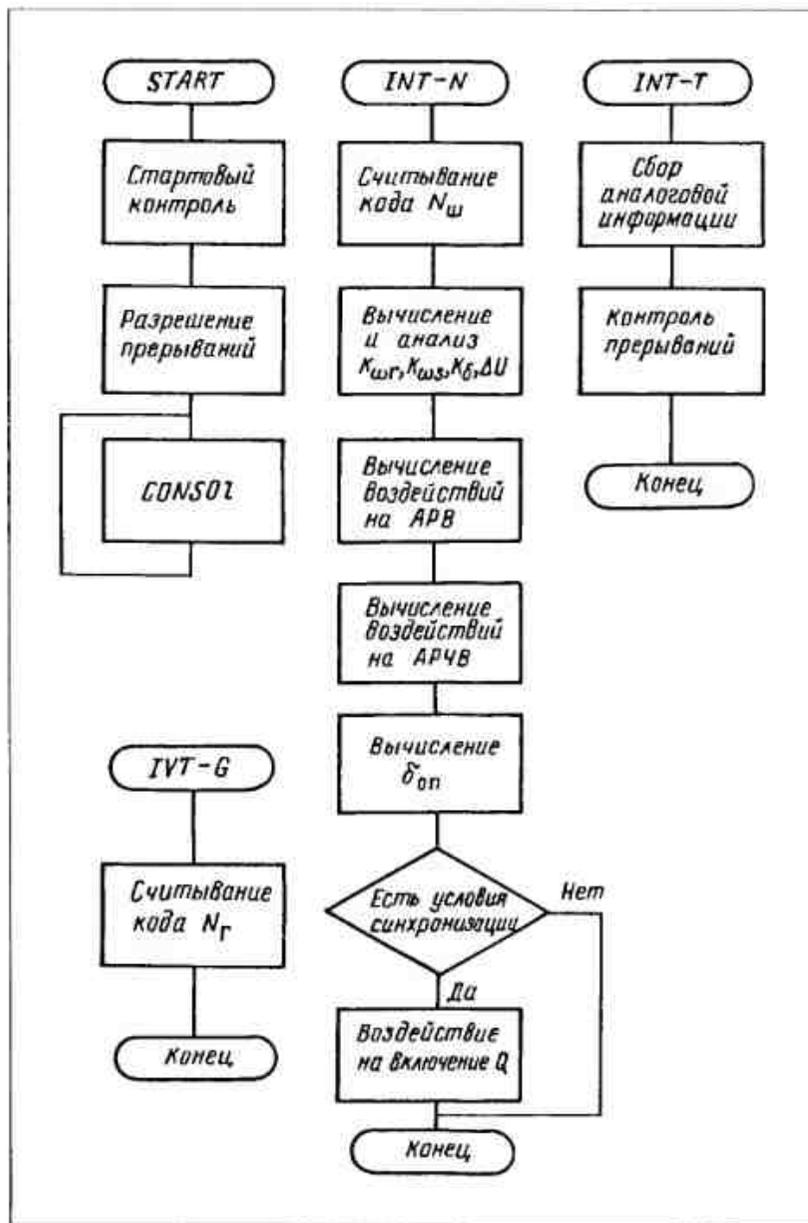


Рис. 1.10. Структурная схема программного обеспечения АС-М

Программное обеспечение. После подключения автоматического синхронизатора к источнику питания ИП элементом ЭНУ регистры приводятся в исходное состояние и запускается программа инициализации и стартового контроля *START* (рис. 1.10): производится настройка элементов микроЭВМ. После завершения стартового контроля и разрешения управления (прерываний) микроЭВМ вступает в действие программа обмена информацией с оператором *CONSOL*. По пусковой команде оператора начинается выполнение функциональных программ измерительного преобразования, управления *APB* и *APЧВ* и формирования воздействия на включение синхронного генератора.

Функциональное программное обеспечение состоит из трех прерывающих программ: *INT-G*, *INT-N* и *INT-T*. Первая из них запускается каждый период скольжения в момент исчезновения импульса напряжения $U_{к.г}$ (см. рис. 1.9) и производит считывание кода $N_{г}$. В момент исчезновения импульса напряжения $U_{к.ш}$ запускается основная программа *INT-N*: считывается код $N_{ш}$, по разностям кодов $N_{г}$ и $N_{ш}$ рассчитываются, как указывалось, разность частот ЭДС генератора и напряжения шин электростанции и угол сдвига фаз между ними; определяется разность амплитуд и рассчитываются длительности импульсов управления *APB* и *APЧВ*; вычисляется угол опережения и после проверки трех условий точной автоматической синхронизации формируется цифровой сигнал управляющего воздействия на включение привода выключателя *Q* (см. рис. 1.1) синхронного генератора.

Операции, производимые по третьей программе *INT-T*, указаны на структурной схеме программного обеспечения (см. рис. 1.10). Программы выполнены на языке Ассемблера.

Как указывалось, микропроцессорное устройство синхронизации производит диагностику и настройку синхронизатора программой *START* и сервисные функции программой *CONSOL*: выводит на экран дисплея параметры настройки и результаты измерительного преобразования, значения угла опережения, а на экран осциллографа, подключаемого через ЦАП (см. рис. 1.8), графики процессов изменений разностей амплитуд и частот, угла сдвига фаз, управляющих воздействий на *APB* и *APЧВ* и выходного управляющего воздействия. Угол сдвига фаз и частота скольжения символически отображаются цифросинтезирующим индикатором. Светодиодное табло фиксирует состояние синхронизатора в процессе его работы по подготовке синхронного генератора к включению на параллельную работу.

Микропроцессорные автоматические регуляторы возбуждения синхронных генераторов

2.1. ВИДЫ РЕГУЛЯТОРОВ

Нормальный режим работы генераторов электростанций в условиях случайно изменяющейся, требуемой потребителями электроэнергии обеспечивается непрерывным автоматическим управлением — регулированием амплитуды и частоты напряжения, активной и реактивной мощностей генератора.

Поддержание напряжения на установленном уровне и загрузка генератора реактивной мощностью достигаются изменениями возбуждения генератора под воздействием АРВ.

Длительное время АО "Электросила" выпускало созданный в ВЭИ первый цифровой АРВ-СД ("сильного действия") [8]. В последнее время разработаны новые, более технически совершенные микропроцессорные АРВ-М [9] и автоматическая система управления режимами работы гидро- и турбогенераторов [10], выполняющая и функции автоматического регулирования возбуждения. В связи с появлением асинхронизированных генераторов создан микропроцессорный двухканальный автоматический регулятор двух токов его возбуждения [18].

2.2. СОВРЕМЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ, АЛГОРИТМ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Возбуждение синхронных генераторов. Современные синхронные генераторы, как правило, имеют тиристорное возбуждение и снаб-

жаются пропорционально-дифференциальными ("сильного действия") автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ-СД). Типовым является тиристорное независимое возбуждение, при котором управляемый тиристорный преобразователь VST (рис. 2.1, а) питается трехфазным переменным током промышленной или повышенной частоты от вспомогательного синхронного генератора GL относительно малой мощности, расположенного на общем валу с возбуждаемым синхронным генератором G . Генератор GL и тиристорный преобразователь VST образуют тиристорный возбудитель GE синхронного генератора.

Вспомогательный генератор имеет тиристорное самовозбуждение — его возбудитель состоит из тиристорного выпрямителя $VSTL$ и трансформатора TL , подключенного к выводам синхронного генератора GL , и автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия $APB-ПД$.

Развозбуждение (гашение поля) синхронного генератора производится переводом тиристорного преобразователя VST в инверторный режим, а вспомогательного генератора — автоматом гашения поля ASV . Возбуждение синхронного генератора при его пуске и

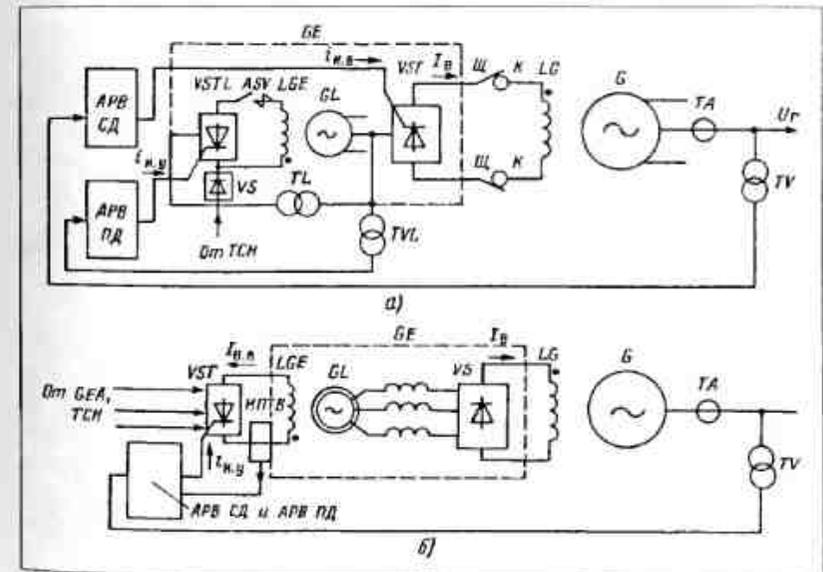


Рис. 2.1. Схемы тиристорного (а) и бесщеточного (б) возбуждения синхронного генератора

синхронизации достигается начальным возбуждением вспомогательного генератора от выпрямителя VS , питаемого от трансформатора собственных нужд электростанции TCH .

Современные синхронные генераторы АО "Электросила" поставляются с одним тиристорным преобразователем VST , обеспечивающим номинальное возбуждение и двукратную, ограниченную термической стойкостью генератора форсировку возбуждения.

Тиристорные преобразователь VST и выпрямитель $VSTL$ управляются путем смещения во времени в пределах полупериода изменения напряжения их питания импульсов токов $i_{н.у}$ включения тиристоров в каждый полупериод — изменения фазы включения тиристоров α_n . При трехфазном двухполупериодном исполнении режиму выпрямления соответствуют изменения фазы включения тиристоров в пределах $\pi/6 < \alpha_n < 2\pi/3$, а инверторному режиму $\alpha_n > 2\pi/3$. Номинальное возбуждение обеспечивается при $\alpha_n \approx \pi/2$. Формирование фазы включения α_n производится преобразователем непрерывно изменяющегося напряжения $U_{\text{рст}}$ постоянного тока на выходе АРВ в импульсы токов $i_{н.у}$ включения тиристоров устройством управления тиристорным возбудителем, или (в АРВ-М) производится непосредственное цифровое фазоимпульсное управление тиристорного преобразователя [9].

По мере возрастания единичной мощности синхронных генераторов (до 1000 МВт) и тока возбуждения (до 10 кА) исчерпал свои технические возможности скользящий контакт в цепи возбуждения — кольца Кротора и щетки $Ш$ (рис. 2.1, а). Проблема решена созданием бесщеточного возбуждения (рис. 2.1, б), при котором обмотка ротора LG синхронного генератора G жестко подключается к вращающемуся диодному выпрямителю VS , питаемому от трех(шести)-фазной вращающейся обмотки переменного тока обращенного вспомогательного генератора GL с обмоткой возбуждения LGE , расположенной на его статоре.

Возбуждение вспомогательного генератора тиристорное (преобразователь VST) с независимым питанием от подвозбудителя GEA или трансформатора I собственных нужд TCH электростанции. В отличие от тиристорного бесщеточное возбуждение обладает инерцией цепи возбуждения обращенного генератора. Постоянная времени $T_{\text{н.н}}$ обмотки его ротора снижается до приемлемой с точки зрения эффективности автоматического регулирования "сильного действия" приемами теории автоматического регулирования.

Комплектно с синхронным генератором АО "Электросила" поставляют микропроцессорные автоматические регуляторы возбужде-

ния "сильного действия" типов АРВ, СДМ и АРВ-М при тиристорном и аналого-цифровые (АЦ АРВ) при бесщеточном возбуждении.

Алгоритм автоматического регулирования возбуждения "сильного действия". Под алгоритмом или законом автоматического регулирования понимается функциональная зависимость регулирующего воздействия [аналогового $U_{\text{рст}}$ или цифрового $U_{\text{рст}}(nT)$] от режимных параметров электропередачи, определяемая назначением АРВ-СД. Назначение АРВ-СД заключается не только в поддержании заданных напряжения на шинах электростанции и реактивной мощности в линиях электропередачи, но и в обеспечении максимально возможных уровней статической и динамической устойчивости параллельной работы электростанции с электроэнергетической системой.

Напряжение и реактивная мощность определяются отклонением напряжения ΔU от заданного (установленного) значения, а статическая и динамическая устойчивость — скоростью и ускорением изменений угла электропередачи δ — угла сдвига фаз между ЭДС синхронного генератора E_q и напряжением U_c на шинах приемной подстанции ЭЭС. При высокой точности автоматического регулирования напряжения (малом статизме регулятора) устойчивость функционирования автоматической системы регулирования возбуждения достигается за счет использования сигналов по скоростям изменений напряжения и ЭДС синхронного генератора, определяемой током возбуждения I_w .

Сигналы, отображающие скорость и ускорение, как указывалось, формируются дифференцированием напряжения или его отклонения ΔU , угла δ и тока возбуждения I_w . Они появляются и максимальны в первый момент времени переходного процесса изменений указанных параметров и интенсивно (сильно) воздействуют на практически безынерционный тиристорный возбудитель. Поэтому пропорционально-дифференциальный (ПД) алгоритм регулирования возбуждения и называется обычно законом регулирования сильного действия — АРВ-СД.

Новый микропроцессорный регулятор АРВ-М может функционировать и по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) алгоритму [9].

В соответствии с назначением АРВ-СД естественным было бы формирование регулирующего воздействия непосредственно по углу δ .

В связи с техническими трудностями получения информации об угле δ практически используются сигналы, формируемые по изменению Δf и производной df/dt частоты напряжения, с приемлемой

погрешностью отображающие скорость и ускорение изменения угла электропередачи δ . Поэтому алгоритм функционирования АРВ-СД описывается следующим выражением:

$$U_{\text{рег}}(t) = k_U U_r(t) + k'_U \frac{dU_r(t)}{dt} + k'_f \Delta f(t) + k''_f \frac{df(t)}{dt} + k'_I \frac{dI_n(t)}{dt}. \quad (2.1)$$

Сигналы по производным напряжения и частоты формируются идеальными дифференциаторами, а сигнал Δf по изменению частоты — реальным дифференциатором отклонения Δf частоты от номинальной — идеальным, соединенным последовательно с инерционным элементом первого порядка (апериодическим), например простейшим фильтром нижних частот. Поэтому сигнал Δf существует только при изменениях Δf : в установившемся режиме работы с отличающейся от номинальной частотой $\Delta f = \text{const}$ сигнал Δf отсутствует.

В цифровом регуляторе воздействие $U_{\text{рег}}(nT)$ является дискретным — представляет собой двоичные коды или после цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на выходе регулятора пропорциональное им напряжение $U_{\text{рег}}(nT)$, конечно (дискретно) изменяющееся через интервал времени T дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на входе микропроцессорного регулятора.

Пропорционально-дифференциальный алгоритм функционирования микропроцессорного регулятора описывается следующим так называемым разностным уравнением [2]:

$$U_{\text{рег}}(nT) = k_U \Delta U(nT) + k'_U \{\Delta U(nT) - \Delta U(nT) - \Delta U(nT - T)\} / T + k'_f \{\Delta f(nT) - \Delta f(nT - T)\} / (1 + T / T_d) + \Delta f(nT - T) / (1 + T / T_d) + k''_f \{\Delta f(nT) - \Delta f(nT - T)\} / T + k'_I \{I_n(nT) - I_n(nT - T)\} / T. \quad (2.2)$$

где $\Delta f(nT - T)$ — сигнал по изменению частоты в предшествующий интервал T дискретизации; T_d — постоянная времени инерционного реального дифференциатора.

В регуляторе АРВ-М сигнал формируется также путем численно-интегрирования отклонения напряжения ΔU [9], т.е. суммирования его дискретных мгновенных значений $\Delta U(nT)$ в течение определенного интервала времени.

Общая функциональная схема автоматической системы регулирования возбуждения. Автоматический регулятор возбуждения генератора G (рис. 2.2) состоит из двух основных функциональных частей [2]: измерительно-вычислительной ИВЧ и исполнительной ИЧ. Особенностью АРВ-СД является наличие логической функциона-

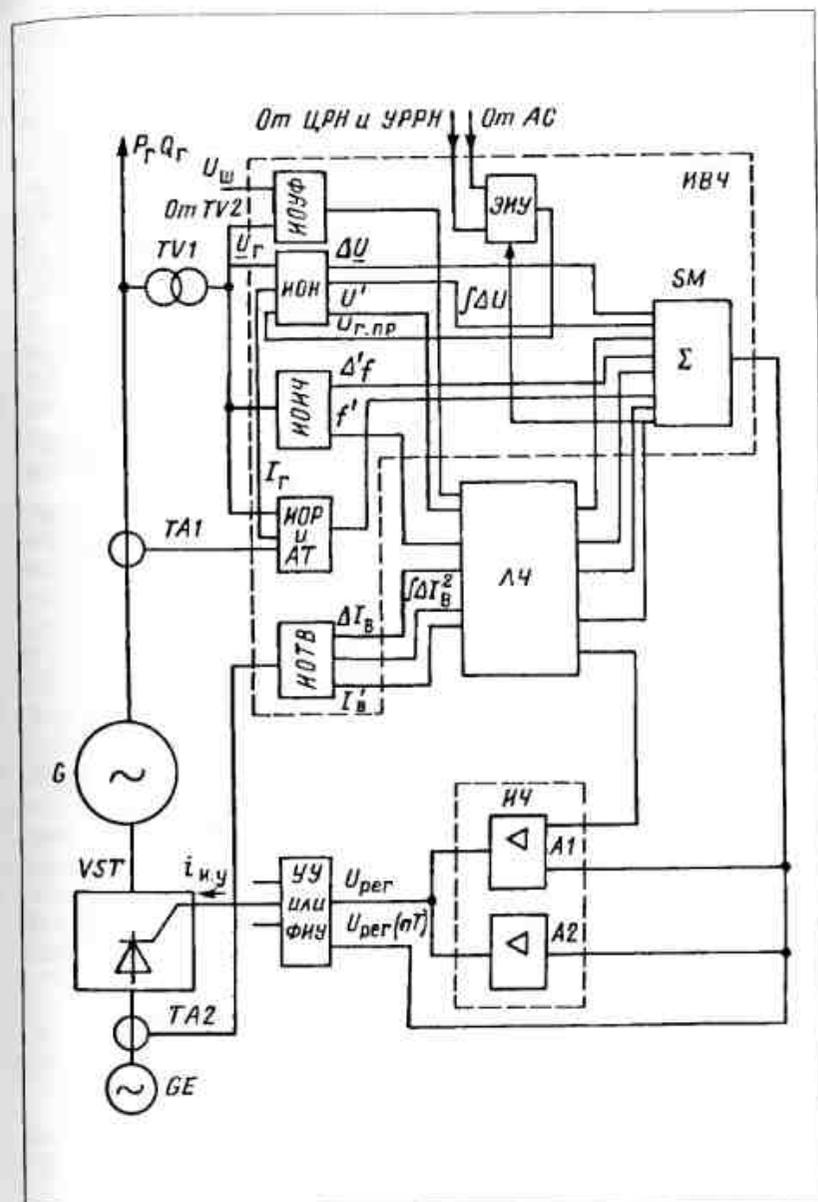


Рис. 2.2 Функциональная схема автоматической системы регулирования возбуждения с АРВ-СД

льной части ЛЧ, координирующей использование сигналов по производным режимных параметров.

В соответствии с алгоритмами функционирования (2.1) и (2.2) ИВЧ содержит три основных измерительных органа (ИО): напряжения ИОН, изменения частоты ИОИЧ и тока возбуждения ИОТВ. Измерительный орган напряжения формирует сигналы по отклонению ΔU и скорости изменения dU/dt действующего значения напряжения синхронного генератора и (в АРВ-М) путем интегрирования его отклонения $\int \Delta U dt$, а ИОИЧ — сигналы по изменению Δf и производной df/dt частоты.

Измерительный орган тока возбуждения кроме сигнала, отображающего, как указывалось, скорость изменения ЭДС синхронного генератора $dE_g/dt - dI_w/dt$, формирует сигналы по отклонению тока возбуждения от номинального ΔI_w и по интегральной функции $\int \Delta I_w^2 dt$, необходимые для поддержания тока возбуждения на неизменном уровне в режиме выбега синхронных генераторов атомных электростанций (по технологическим условиям останова турбоагрегата) и для разгрузки синхронного генератора по генерируемой мощности соответственно. Сигналы поступают на сумматор SM .

На рис. 2.2 показаны дополнительные измерительные органы реактивного и активного токов ИОР и АТ и угла сдвига фаз ИОУФ между ЭДС холостого хода генератора E_r (перед его синхронизацией) и напряжением $U_{ш}$ на шинах электростанции и элемент изменения заданного напряжения (уставки) ЭИУ регулятора.

Исполнительная часть ИЧ регулятора с аналоговым регулирующим воздействием $U_{рег}$ содержит два (при находящихся в эксплуатации двух тиристорных преобразователях — рабочем и формирующемся) усилителя А1, А2 и устройства управления УУ ими. Современный тиристорный возбудитель АО "Электросила" состоит из одного тиристорного преобразователя, управление которым от АРВ-М производится цифровым регулирующим воздействием $U_{рег}(nT)$ как фазоимпульсное ФИХ управление.

2.3. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР БЕСЩЕТОЧНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Регулятор состоит из аналоговой части и микросхемном исполнении цифровой микропроцессорной части. Собственно автоматическое регулирование возбуждения выполняет аналоговый АРВ-СД (рис. 2.3, а). Он может функционировать как по пропорционально-дифференциальному [ПД — см. (2.1)], так и по пропорциональ-

но-интегрально-дифференциальному (ПИД) алгоритмам [17]. В связи с электрической недоступностью цепи бесщеточного возбуждения синхронного генератора сигнал, отображающий скорость изменения тока возбуждения dI_w/dt , указанный в (2.1), отсутствует, а в связи с отмечающейся особенностью бесщеточного возбуждения — его инерционностью — применяется дополнительный автоматический регулятор тока возбуждения $I_{н.в}$ пропорционального действия АРВ-ПД — регулятор в целом получается двухконтурным. Выходное напряжение $U_{рег}$ (рис. 2.3, а) пропорционально-дифференциального регулятора АРВ-СД изменяет предписанное значение тока возбуждения возбудителя $I_{н.в.пр}$ — уставку АРВ-ПД. Последний, реагирующий на отклонение тока $\Delta I_{н.в} = I_{н.в.пр} - I_{н.в}$ и реализуемый по замкнутой схеме за счет жесткой отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи $-k_{о.с} > 1$ снижает постоянную времени $T_{н.в}$ цепи возбуждения обращенного вспомогательного генератора до эквивалентной $T_{н.в.эк} = T_{н.в}/k_{о.с}$.

Аналоговый регулятор содержит необходимые для формирования сигналов ПД- или ПИД-алгоритмов измерительные органы напряжения ИОН, изменения частоты ИОИЧ, реактивного и активного токов ИОР и АТ и измерительного преобразователя тока возбуждения возбудителя ИИТВ (рис. 2.3, а). Они выполнены на интегральных операционных усилителях (ИОУ) и функционируют по новым принципам, обеспечивающим их быстроедействие, необходимым для эффективности регулирующего воздействия, формируемого по производным действующего значения напряжения и его частоты.

Быстроедействие достигается применением управляемых активных (на ИОУ) интеграторов А11, А12 [4]. В измерительном органе напряжение интегрируется в течение одного периода шестой гармоники ($1/6$ части длительности периода T_n промышленной частоты), содержащейся в результате вычитания (активным элементом сравнения — вычитателем АН1) из напряжения $|u_n|$ на выходе трехфазного активного выпрямителя АВС постоянного предписанного напряжения $U_{пр}$ (уставки регулятора): сигнал по отклонению ΔU напряжения на выходе интегратора А11 формируется за время $t_{н} = T_n/6 \approx 3.3$ мс.

Напряжение $U_{пр}$ устанавливается цифро-аналоговым элементом его изменения ЭИУ и представляет собой напряжение цифро-аналогового преобразователя ЦАП двоичного кода, записываемого в счетчик СТ сигналами автоматического синхронизатора АС, по цепям дистанционного управления ДУ или в режиме слежения РС за напряжением синхронного генератора при ручном управлении его

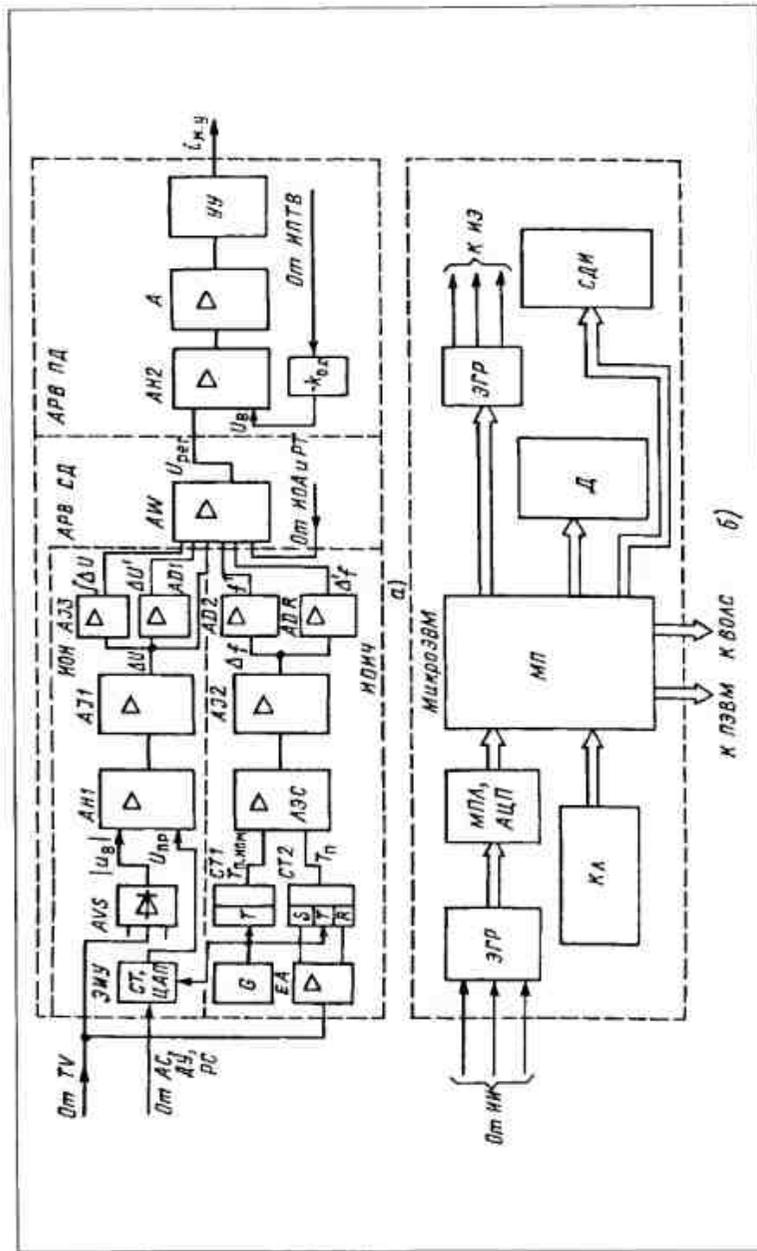


Рис. 2.3. Функциональные схемы аналоговой (а) и микропроцессорной (б) частей аналого-цифрового АРВ СД генератора с бесщеточным возбуждением

возбуждением, что необходимо для "безударного" включения автоматического регулятора в работу.

Измерительный орган изменения частоты интегрирует импульсное постоянное напряжения прямоугольной формы длительностью ΔT , равной разности номинальной длительности полупериода $T_{н,ном}/2$ и изменяющейся (при изменении частоты) истинной длительности полупериода $T_n/2$; сигнал по отклонению Δf частоты на выходе интегратора АИ2 формируется за время $T_n/2 = 10$ мс.

Импульсы напряжений длительностями $T_{н,ном}$ и T_n формируются счетчиком СТ1 и управляемым компаратором ЕА по входам запуска S и останова R счетчиком СТ2 единичных импульсов высокой частоты микроэлектронного генератора G, а импульс разностной длительности ΔT — логическим элементом их сравнения ЛЭС [4].

Сигналы, отображающие производные напряжения $U = dU/dt$ и частоты $f' = df/dt$ и изменение частоты Δf [см. (2.2)], формируются дифференциаторами: активными, близкими к идеальным $(U, f') - AD1, AD2$ и реальным $(\Delta f) - ADR$ с относительно большой постоянной времени [4]. Сигнал $\int \Delta U$ ПИД-алгоритма формируется интегратором АИ3.

Измерительный преобразователь ИИТВ тока возбуждения возбудителя $I_{н,в}$ в пропорциональное напряжение $U_{н,в}$, сравниваемое с напряжением U_{ref} (вычитатель АИ2), представляет собой активный микросхемный преобразователь (датчик) серии LEM [4], установленный в цепи обмотки возбуждения LGE генератора GL (см. рис. 2.1, б).

Напряжение U_{ref} регулятора АРВ-СД с выхода сумматора АВ поступает на вход элемента сравнения (вычитатель АИ2) пропорционального регулятора АРВ-ПД тока $I_{н,в}$ как его уставка и сопоставляется с напряжением $U_{н,в}$ цепи отрицательной обратной связи ($-k_{о.с}$), пропорциональным току: $U_{н,в} = -k_{о.с} I_{н,в}$. На рис. 2.3 показаны усилитель А и устройство управления УУ тиристорным преобразователем VST (см. рис. 2.1, б), формирующее импульсные токи включения тиристоров $i_{н,в}$, момент появления которых изменяется в пределах полупериодов переменного напряжения питания тиристоров и функции напряжения U_{ref} , обуславливая соответствующие изменения тока возбуждения $I_{н,в}$ вспомогательного обращенного генератора GL возбудителя GE и тока возбуждения $I_{н,в}$ синхронного генератора G (см. рис. 2.1, б).

Цифровая часть автоматической системы управления бесщеточным возбуждением синхронного генератора осуществляется одноплатной микроЭВМ на микропроцессоре МП (рис. 2.3, б) типа Z180X, снабженной жидкокристаллическим дисплеем Д и клави-

атурой К₁. Она имеет стандартные разъемы для подключения ПЭВМ и волоконно-оптической линии связи ВОЛС с АСУ ТП электростанции.

Связь микропроцессора с источниками информации ИИ производится через элементы гальванической развязки цепей ЭГР, мультиплексор и аналого-цифровой преобразователь АЦП, а с исполнительными элементами ИЭ и элементами отображения информации (дисплеи и светодиодные индикаторы СИИ), осуществляется развитым интерфейсом ввода-вывода: ввод параметров настройки с клавиатуры и управление отображением информации на экране дисплея производится через интерфейс оператора.

Цифровая часть управления аппаратно-программными средствами осуществляет контроль исправности и диагностику оборудования бесщеточного возбуждения, тестирование и самодиагностику, реализуя следующие функции:

контроль состояния бесщеточного возбуждения и отображение его результатов и текущих значений напряжений и токов в цепях возбуждения;

определение работоспособности (проводимости, управляемости) тиристоров;

контроль исправности канала ручного (местного или дистанционного) управления тиристорным выпрямителем;

диагностика функционирования элементов аналогового автоматического регулятора возбуждения;

контроль исправности автоматической защиты цепей возбуждения; фиксирование состояния выключателей в цепях питания бесщеточного возбуждения;

формирование цифровых сигналов о состоянии возбудителя;

формирование и хранение в памяти текстовых сообщений о неисправностях и срабатываниях автоматической защиты возбудителя и генератора;

переключение каналов ручного и автоматического регулирования.

Оценка состояния и контроль исправности оборудования программно осуществляются на основе анализа аналоговых и дискретных сигналов от измерительных преобразователей режимных параметров, сигнальных контактов выключателей, элементов контроля проводимости и управляемости тиристоров, датчиков тепловых и механических параметров.

Исправность аналогового АРВ определяется по сигналам его измерительных органов; при выходе из строя его функциональных элементов производится автоматическое переключение на ручное управление возбуждением.

2.4. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТИРИСТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Первый микропроцессорный автоматический регулятор тиристорного возбуждения сильного действия АРВ-СДМ был разработан в ВЭИ [8] сначала на базе микросредств управляющей вычислительной техники В7 (МСУВТ В7), затем на микропроцессорном комплекте (МПК) БИС серии К1810. В последнее время создана новая микропроцессорная модификация регулятора АРВ-М на микроконтроллере E167-ЗИМ, выполненном на быстродействующем микропроцессоре SAB C167CR-LM фирмы Siemens [9]. Эти регуляторы формируют ПД-алгоритм (АРВ-СДМ) и ПИД-алгоритм (АРВ-М) автоматического регулирования.

Основной и общей их функциональной частью (рис. 2.4) является вычислительная часть ВЧ. Измерительно-преобразовательная ИПЧ и исполнительная ИЧ части [4], как это принято в цифровых автоматических устройствах на ЭВМ и микропроцессорах, объединены под общим названием УСО — устройство связи с управляемым объектом.

Вычислительная функциональная часть выполнена на двух указанных взаиморезервируемых микроЭВМ ЭВМ1, ЭВМ2 или микропроцессорах МП1, МП2. Она программно реализует измерительные органы ИОИ, ИОНЧ, ИОР и АТ, ИОТВ ИОУФ (см. рис. 2.2).

Измерительно-преобразовательная часть содержит активные [4] вторичные измерительные трансформаторы напряжения ИТН и тока ИТТ (или шунты), пассивные маломощные ($\tau = 1$ мс)

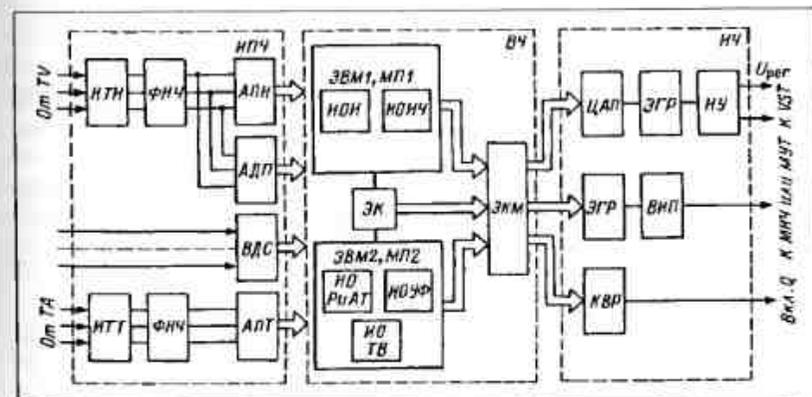


Рис. 2.4. Функциональная схема микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения и синхронизатора синхронного генератора

первого порядка фильтры нижних частот *ФНЧ* и элементы аналогового измерительного преобразования напряжений и токов *АПИ* и *АПТ*, формирующие сигналы в виде:

чисто синусоидальных напряжений, пропорциональных фазным напряжениям и токам синхронного генератора, используемые затем программными измерительными органами вычислительной части:

постоянных напряжений, пропорциональных напряжениям генератора и на шинах электростанции.

Они формируются усилителями, трехфазными выпрямителями с пассивными или активными [4] *ФНЧ*, входящими в состав элементов *АПИ* и *АПТ*.

Аналого-дискретным преобразователем *АДП* формируются импульсные напряжения (длительностью $T_{\text{и}} = 30$ мкс) управления прерываниями и микроЭВМ в целом.

Исполнительная часть АРВ-СДМ состоит из цифро-аналогового преобразователя *ЦАП*, элементов аналогового гальванического отделения (развязки) *ЭГР* вычислительной части от исполнительной, усилителя *ИУ*, формирующего регулирующее воздействие $U_{\text{рег}}$ на устройства *УУ* тиристорных преобразователей *VST* (см. рис. 2.2) возбуждителя *ГЕ*, времяимпульсного преобразователя *ВИП* и выходных герконов вывода дискретных сигналов (комплекта выходных реле *КВР*).

Времяимпульсный преобразователь *ВИП* и выходные герконы вывода дискретных сигналов (комплекта выходных реле *КВР*) выполняют исполнительные функции автоматического синхронизатора: воздействующие на механизм изменения частоты вращения гидрогенераторов *МИЧ* или механизм управления паровой турбиной *МУТ*, представляющие собой задающие элементы (элементы уставки) *АРЧВ* турбин и воздействующие на включение выключателя *Q* синхронного генератора.

Исполнительная часть АРВ-М представляет собой разработанное устройство цифрового фазоимпульсного управления тиристорами возбуждителя синхронного генератора *ФНУ* (см. рис. 2.2) [9].

Регуляторы выполняют ряд функций [8, 9] по ограничению режимных параметров (генерируемой и особенно потребляемой реактивной мощности и др.), технологических функций (управление начальным возбуждением и гашение поля генератора) и автоматической защиты управляемых тиристорных преобразователей возбуждителя.

Регуляторы имеют развитый программно-аппаратный контроль исправности всех его частей.

Основной группой программы комплекса математического обеспечения АРВ-СДМ и АРВ-М являются программы автоматического регулирования возбуждения и синхронизации генератора.

2.5. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР АРВ-СДМ

Микропроцессорный автоматический регулятор АРВ-СДМ длительное время поставлялся АО "Электросила" комплектно с турбогенератором. При его создании были разработаны алгоритмы программных измерительных органов и цифровой реализации алгоритма функционирования АРВ-СД.

Измерительные органы АРВ-СДМ. Функционирование программных измерительных органов АРВ-СДМ обеспечивается импульсами управления аналого-дискретного преобразователя АДП, формирующего короткие импульсы $u_{\text{на}} \div u_{\text{ис}}$ в моменты времени изменения знака мгновенными синусоидальными напряжениями трех фаз u_a, u_b, u_c с отрицательного на положительный — в момент положительных их переходов через нуль (рис. 2.5).

Измерительный орган амплитуды напряжения. Быстродействие измерительного органа напряжения АРВ-СДМ достигается фиксированием положительных амплитудных мгновенных значений напряжений трех фаз $u_{\text{ма}} \div u_{\text{мс}}$ (рис. 2.5, а). Производится вычисление среднего значения амплитуды, которое сравнивается (путем вычитания) с заданным (предписанным) значением — вычисляется ее отклонение. На основе численного дифференцирования определяется производная амплитуды. Указанные операции производятся за время, не превышающее одной третьей части длительности периода $T_{\text{и}}$ промышленной частоты.

Амплитуда фиксируется путем управления соответствующим каналом мультиплексора АЦП, включаемого импульсным напряжением $u_{\text{им}}$ на несколько микросекунд практически в момент прохождения фазным напряжением генератора через положительное амплитудное мгновенное значение.

Включение канала мультиплексора производится вычитающим счетчиком таковых импульсов (частотой 2 МГц), в который в момент T_1 прохождения мгновенным фазным напряжением через нуль записывается число $N_{T_0/4}$, равное числу тактовых импульсов, которое размещается на интервале времени в четверть периода промышленной частоты. Запись числа производится импульсом $u_{\text{из}}$ формируемым АДП в момент изменения знака с отрицательного на положительный (положительного перехода через нуль) мгновенным фазным напряжением.

В момент времени T_3 обнуления счетчика по переднему фронту импульса $u_{\text{им}}$ контроллером прерываний работы микропроцессора (МП) включается в работу программа ввода информации в микро-

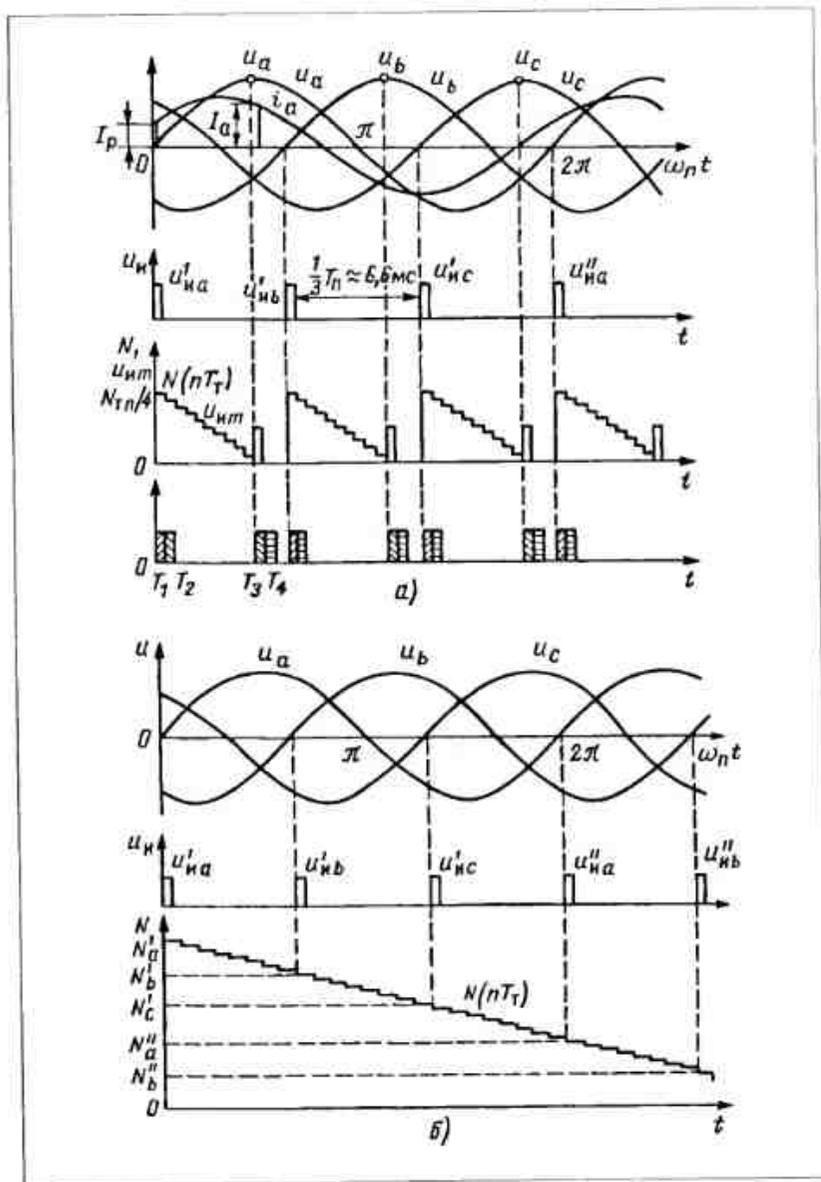


Рис. 2.5. Временные графики, иллюстрирующие виды цифровых сигналов об амплитуде напряжения, активном и реактивном токах генератора (а) и сигнала об отклонении частоты его вращения (б)

ЭВМ и вычисления среднего значения амплитуды напряжения. Вычисления отклонения амплитуды и ее производной осуществляются отдельными программами.

Измерительный орган изменения частоты. Формирование сигналов по изменению и производной частоты производится на основе вычислений длительности периода промышленной частоты. В измерительном органе используется второй вычитающий счетчик тактовых импульсов, в который периодически после каждого считывания до нуля вновь записывается число импульсов $N_a = N_{max} \gg N T_n / 4$ (рис. 2.5, б). Поэтому за время, равное длительности периода промышленной частоты, число импульсов в счетчике уменьшается на небольшую часть N_{max} .

Разность числа импульсов $\Delta N_a = N'_a - N''_a$, фиксируемых импульсными напряжениями u'_{na}, u''_{na} , соответствующими положительным переходам через нуль мгновенным напряжением одной фазы, например u_a , получается пропорциональной истинной длительности периода промышленной частоты. По трем таким замерам $\Delta N_a, \Delta N_b = N'_b - N''_b$ и $\Delta N_c = N'_c - N''_c$, производимым с использованием напряжений u'_{nb}, u'_{cb} и соответственно u'_{nc}, u'_{nc} (на графике рис. 2.5, б импульсы u'_{nc} не показаны), вычисляются средняя истинная длительность $T_{н.и}$ периода и частота $f_{н.и} = 1/T_{н.и}$ напряжения синхронно генератора.

На рис. 2.5, а показаны включения (импульсами в моменты времени T_2) программ ввода информации и вычисления частоты. Вычисляемые через указывавшийся интервал времени $T_n = (1/3)T_n$ истинные значения частоты используются для формирования цифровых сигналов по изменению частоты и ее производной, выполняемых по отдельным программам.

Измерительный орган реактивного и активного тока. Необходимое быстродействие измерительного органа достигается запоминанием мгновенного тока генератора. Для этого по задним фронтам импульсов напряжения u_n и u_{nm} (рис. 2.5, а) включаются (в моменты T_2 и T_4) соответствующие каналы мультиплексора АЦП, фиксирующего в двоичном коде мгновенные значения тока одной из фаз, например $i_a = I_m \sin(\omega_n t - \varphi)$, равные в момент $t = 0$ реактивной $I_p = I_m \sin \varphi$, а в момент $t = T_n/4$ активной $I_a = I_m \cos \varphi$ составляющим тока синхронного генератора. Они используются для измерительного органа потребляемой генератором реактивной мощности, определяющего минимально допустимый (по условию статической устойчивости электропередачи) ток возбуждения синхронного генератора. Сигнал о минимально допустимом возбуждении формируется как функция I_p и I_a расчетами по отдельной программе.

Измерительный орган угла сдвига фаз. В измерительном органе угла сдвига фаз между напряжением на шинах электростанции частотой f_c и напряжением холостого хода синхронного генератора частотой $f_T \neq f_c$, непрерывно изменяющегося при подготовке генератора к включению на параллельную работу с электроэнергетической системой (синхронизации) в функции частоты скольжения $f_s = |f_c - f_T|$, используется времяимпульсное преобразование фазы. Формируемый импульсом одной из фаз, например $u_{n,1} = u_{ca}$ (рис. 2.5, а) и аналогичным импульсом $u_{n,m}$ (на графиках рис. 2.5, а не показаны), фиксирующим переход через нуль мгновенным напряжением на шинах электростанции, времяимпульсный сигнал является линейной функцией угла сдвига [4].

Измерительное преобразование угла сдвига фаз в цифровой сигнал производится аналогично рассмотренному фиксированию длительности периода путем считывания из третьего вычитающего счетчика с периодически записываемым числом тактовых импульсов $N_{max} \gg N_T/4$ чисел в моменты времени появления указанных импульсов напряжений $u_{n,1}$ и $u_{n,m}$. По отдельной программе в измерительном органе вычисляется угол сдвига фаз в начальный момент воздействия на привод выключателя синхронного генератора, необходимый для совпадения по фазе напряжений на шинах электростанции и генератора в момент включения (соединения силовых контактов выключателя) — угол опережения.

2.6. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ТИРИСТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ТИПА АРВ-М

Особенности возбуждения синхронного генератора. В последнее время в АО "Электросила" совместно с ВЭИ создано новое поколение технических средств тиристорного возбуждения синхронных генераторов [9].

Осуществляется самовозбуждение генератора двумя одинаковыми тиристорными преобразователями (из них второй резервный), управляемыми двумя (второй резервный) микропроцессорными автоматическими регуляторами возбуждения типа АРВ-М.

В цепях тиристорных преобразователей предусмотрены разъединители, а в цепи обмотки ротора генератора — автомат гашения поля для развозбуждения генератора и контакторы подключения устройства начального возбуждения и замыкания обмотки возбуждения на резистор при самосинхронизации генератора; параллельно с его контактом включены диодисторные разрядники.

Источниками информации регуляторов являются, как обычно, первичные измерительные трансформаторы напряжения и тока синхронного генератора. Информация о функционировании регуляторов отводится на сенсорный дисплей и передается в АСУ ТП электростанции. Сенсорный дисплей обеспечивает настройку регулятора и его оперативное изменение. Рабочий и резервный АРВ-М обмениваются информацией по интерфейсу.

Регуляторы воздействуют на возбудитель через разработанную цифровую исполнительную часть фазоимпульсного управления тиристорами.

Автоматический регулятор АРВ-М обеспечивает более эффективное регулирование возбуждения, реализуя как пропорционально-дифференциальный (ПД), так и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм автоматического регулирования.

Функции автоматического регулятора. Кроме собственно автоматического регулирования возбуждения АРВ-М выполняет следующие функции:

- поддержание напряжения на шинах электростанции с малым статизмом (при ПД-алгоритме) или астатически (при ПИД-алгоритме);
- поддержание заданной генерируемой реактивной мощности генератора;

- обеспечение максимально возможной пропускной способности электропередачи, статической и динамической устойчивости электроэнергетической системы;

- релейную форсировку возбуждения.

АРВ-М формирует целый ряд управляющих воздействий по ограничению режимных параметров и выполнению технологических функций.

Автоматический регулятор осуществляет ограничение:

- перегрузки генератора током статора и ротора с зависимым от степени перегрузки временем;

- потребляемой генератором реактивной мощности при снижении возбуждения, зависящей от его активной мощности по условию статической устойчивости;

- допустимого по условию насыщения магнитопровода трансформатора блока генератор — трансформатор соотношения амплитуды и частоты напряжения.

Основными технологическими функциями АРВ-М являются [9]:

- осуществление начального возбуждения;

- выравнивание действующих значений напряжений генератора и шин электростанции при его включении способом точной автоматической синхронизации;

обеспечение режима зарядки линии электропередачи;
 автоматическая разгрузка генератора по реактивной мощности;
 перевод тиристорного преобразователя в инверторный режим для развозбуждения генератора при нормальном останове;
 воздействие на АГП в аварийном режиме с последующим переводом тиристорного преобразователя в инверторный режим;
 автоматические переключения без толчка тока возбуждения на резервный АРВ.

Функциональная схема и аппаратная структура регулятора. Функциональная схема АРВ-М принципиально такая же, как и для АРВ-СДМ (см. рис. 2.4); ее исполнительная часть дополняется цифровым устройством фазоимпульсного управления *ФИУ* тиристорами и формирователями непрерывных и дискретных управляющих воздействий по выполнению функций по ограничению режимных параметров и технологических функций.

Однако конструктивно АРВ-М представляет собой совершенно новое современное автоматическое устройство, существенно отличающееся от АРВ-СДМ:

малыми габаритными размерами аппаратной части;

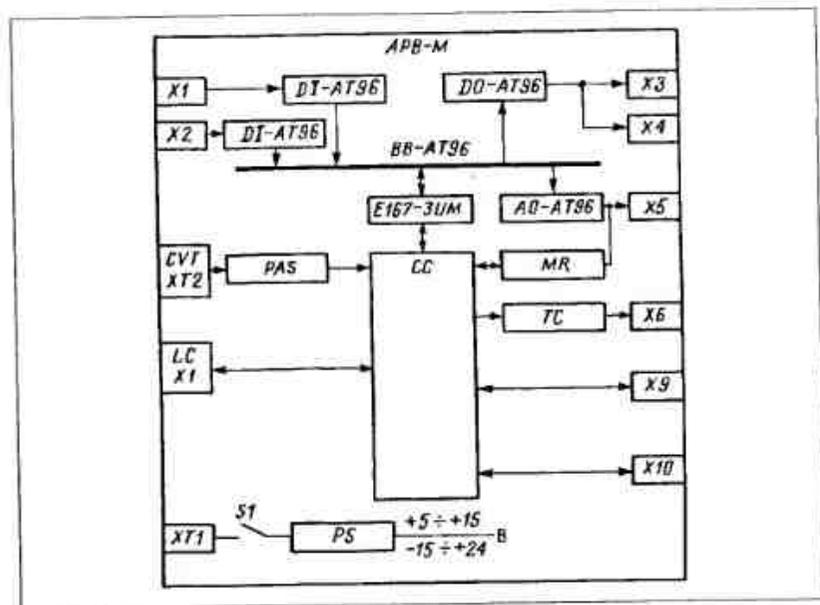


Рис. 2.6. Структура аппаратных средств микропроцессорного регулятора

значительно меньшим количеством и номенклатурой комплектующих изделий;

модульным построением;

существенным упрощением пайки, настройки и обслуживания.

Автоматический регулятор выполнен в виде кассеты модулей фирмы RITTAL "Евромеханика" размером 100 × 160 мм [9]. Они показаны на схеме структуры аппаратных средств АРВ-М с принятыми разработчиками позиционными обозначениями (рис. 2.6).

Модуль микроконтроллера E167-3UM является главным. В его состав входят:

микропроцессор SAB C167CR-LM с ПЗУ объемом 1 Мбайт и ОЗУ объемом 256 кбайт;

два 12-разрядных 8-канальных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с временем 2 мс формирования двоичного кода одного дискретного мгновенного значения входных напряжений $-5 \div 0 \div +5$ В;

один 12-разрядный 8-канальный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с выходными напряжениями $-5 \div 0 \div +5$ В;

гальванически развязанные (оптоизолированные) порты: RS 232C связи с ПЭВМ, RS 485 связи с сенсорным дисплеем и с АСУ ТП электростанции, интерфейс CAN обмена информацией с другим регулятором, интерфейс SPI с пультом местного управления регулятором;

8-разрядные параллельные входной и выходной порты и порт связи с объединительной платой (местной шиной) А96.

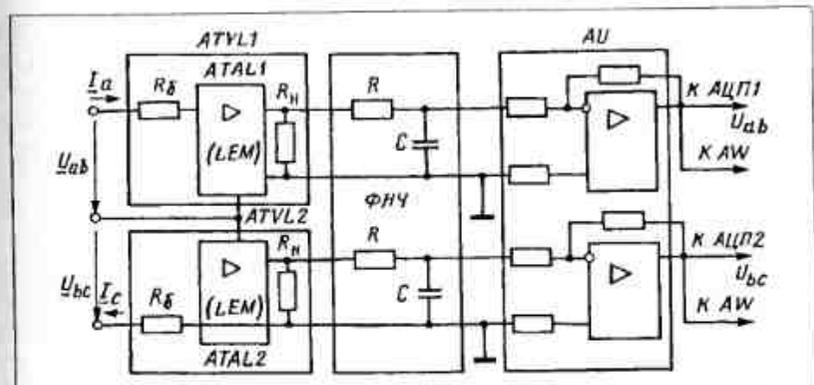


Рис. 2.7. Схема общей аналоговой части измерительных органов напряжения и изменения частоты

Программное управление обеспечивает выполнение модулем задач функционального микропроцессора и логического контроллера. Он производит аналогово-цифровое преобразование входных информационных процессов, выделяет из них входные сигналы программными частотными фильтрами, производит их программное измерительное преобразование и формирование сигналов измерительных органов, выполняет все программные функции по реализации алгоритмов автоматического регулирования, производит тестирование и самодиагностику и выдает сигналы выходной информации; формирует управляющие воздействия.

Модуль-ячейка преобразования входных (от первичных измерительных трансформаторов) напряжений и токов (разъем XT2) CVT, содержит:

малогабаритные вторичные измерительные активные трансформаторы напряжения *ATVL* и тока *ATAL* (рис. 2.7) зарубежного производства фирмы LEM, типов LV25-P и LA25-NP, функционирующие с использованием гальваномагнитного генератора ЭДС Холла (ЭДС пропорциональна индукции намагничивания магнитопровода трансформатора) в цепи отрицательной обратной связи интегра-

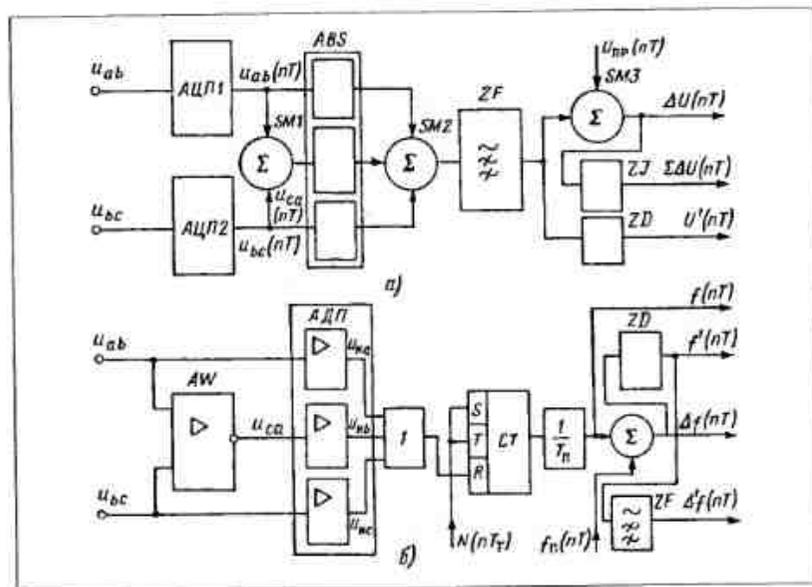


Рис. 2.8. Схема программной части измерительного органа напряжения (а) и схема измерительного органа изменения частоты (б)

льного операционного усилителя [4]; трансформатор напряжения представляет собой трансформатор тока, подключенный к междуфазному напряжению через балластный резистор R_0 значительного сопротивления, преобразующий источник ЭДС, каким является первичный измерительный трансформатор напряжения, например U_{ab} в источник тока I_a ;

резисторы нагрузки R_n активных измерительных трансформаторов тока *ATAL1* и *ATAL2*, номинальные напряжения на которых изменяются в пределах $-2,5 \pm 0 \pm 2,5$ В;

малоинерционные (с постоянной времени $\tau = 0,5$ мс), пассивные RC-фильтры нижних частот, первого и второго порядков, задерживающие гармонические составляющие повышенных частот и импульсные помехи, возникающие при коммутационных операциях в силовых цепях.

Ячейка обработки входных аналоговых информационных процессов PAS содержит:

активные (на интегральных операционных усилителях) повторители напряжений *AU* на выходах указанных RC-фильтров;

аналого-дискретные преобразователи *АДП* (см. рис. 2.8), формирующие импульсные сигналы $U_{na} - U_{nc}$ через нулевые (от отрицательных к положительным) мгновенных значений (см. рис. 2.5);

однофазный выпрямитель напряжения шин электростанции и активный частотный фильтр нижних частот.

Ячейки CVT и PAS образуют аппаратную часть измерительных органов напряжения и изменения частоты регулятора (см. рис. 2.7).

Модули ввода (разъемы *X1, X2*) *D1-AT96* и *вывода* (разъемы *X3, X4*) *DO-AT96* дискретных и цифровых соответственно 16-выходных и 32-выходных сигналов представляют собой входные оптроны, фототранзисторы которых и выходные транзисторы управляют малогабаритными электромагнитными реле с магнитоуправляемыми герметизированными контактами (герконами); состоянием выходных транзисторов управляет микроконтроллер по системной шине *AT96*.

Ячейка аналогового вывода AO-AT96 (разъем *X5*) служит для вывода аналоговых сигналов и содержит 8-канальный 12-разрядный ЦАП. входные цифровые сигналы в который поступают от микроконтроллера по шине *AT96*, а выходные аналоговые сигналы представляют собой напряжения, изменяющиеся в пределах от -10 до $+10$ В.

Модуль контроля регулятора MR следит за длительностью (5 мс) выполнения цикла программы функционирования регулятора и

формирует сигналы информации о его состоянии как результат логической обработки информации, поступающей от микроконтроллера.

Ячейка перекрестных связей СС обеспечивает электрические соединения микроконтроллера и аппаратной части регулятора: содержит разъемы плоских кабелей (шин) и микропереключатель задания конфигурации программного обеспечения микроконтроллера.

Объединительная плата ВВ-АТ96 содержит розетки разъемов, в которые устанавливаются штепсельные части разъемов рассмотренных модулей (ячеек) регулятора и источника питания *PS*, подключаемого выключателем *SI* (разъем *X11*) к напряжению генератора или аккумуляторной батарее электростанции.

Модуль фазоимпульсного управления тиристорным преобразователем возбудителя генератора *ТС* (разъем *X6*) формирует шесть оптоизолированных импульсных токов включения тиристоров трехфазного мостового управляемого выпрямителя (с возможностью перевода в инверторный режим). Он функционирует на основе последовательного сдвигового регистра, на шести выходах которого и формируются указанные импульсные токи включения тиристоров. Регистр управляется микроконтроллером регулятора по арккосинусной зависимости угла включения тиристоров от цифрового регулирующего воздействия, поскольку среднее значение выпрямленного тока является косинусоидальной функцией угла включения.

Пульт местного управления LS содержит: семисегментный синтезирующий индикатор вывода диагностической информации;

светодиоды отображения состояния автоматического регулятора; переключатели управления состоянием автоматического регулятора;

разъем *RS232* подключения ПЭВМ;

гнезда *ЦАП1 – ЦАП4* для подключения осциллографа;

кнопку перезапуска программы.

Управление индикатором, светодиодами и переключателями производится микроконтроллером AT90S8515 фирмы Atmel, а обмен информацией с микроконтроллером регулятора производится по последовательному интерфейсу SPI.

Интерфейсы CAN (разъем *X9*) и *RS485* (разъем *X10*) служат для обмена информацией между контроллерами рабочего и резервного АРВ-М и для передачи информации и управления регулятором от сенсорного дисплея, установленного на ште возбуждения инженерного пульта или АСУ ТП.

Сенсорный дисплей — это терминал OP7100 фирмы Z-WORD, у которого дисплей совмещен с программируемой клавиатурой. Пре-

дусмотрены следующие экраны: основной, экран меню, экраны настроек и переменных величин (сигналов), экраны памяти микроконтроллера и цифро-аналоговых преобразователей.

Программные измерительные органы. В измерительных органах напряжения, изменения частоты, реактивного и активного тока и тока возбуждения синхронного генератора применены вторичные измерительные трансформаторы напряжения и тока зарубежного производства фирмы LEM, функционирующие с использованием гальваномагнитного генератора ЭДС Холла (холлотрона) в цепи отрицательной обратной связи интегрального операционного усилителя [4].

Измерительные органы напряжения и изменения частоты содержат общую аналоговую аппаратную часть, состоящую из (см. рис. 2.7):

двух активных измерительных трансформаторов напряжения *ATV11, ATV12* — трансформаторов тока *ATAL1, ATAL2*, подключенных к двум междуфазным напряжениям U_{ab} и U_{bc} генератора через балластные резисторы R_G значительного сопротивления, преобразующие источники ЭДС, какими являются первичные измерительные трансформаторы напряжений U_{ab}, U_{bc} (на схеме не показаны), в источники токов I_a, I_c ;

пассивных малонормированных (постоянная времени $\tau = 0,5$ мс) RC-фильтров нижних частот ФНЧ, задерживающих гармоники повышенной частоты напряжений генератора и импульсные помехи; согласующих активных повторителей напряжений *AU*.

Программный измерительный преобразователь напряжения (ИПН) содержит (рис. 2.8, а) интегральные аналого-цифровые преобразователи *АЦП1, АЦП2* с интервалом дискретизации $T = T_n/24$, формирует (операция суммирования *SMT*) дискретные мгновенные значения третьего междуфазного напряжения $U_{ca}(nT)$, выполняет функцию цифрового выпрямителя трехфазной системы напряжений генератора (операция выделения постоянной составляющей суммы абсолютных дискретных мгновенных значений трех напряжений нерекурсивным фильтром *ZF*) [4].

Поскольку в последовательности указанных абсолютных дискретных мгновенных напряжений содержатся лишь четные, начиная с 6-й гармоники длительность импульсной характеристики фильтра принята равной $T_n/2 = 10$ мс [4]. Фильтр представляет собой программный интегратор-сумматор указанных абсолютных дискретных мгновенных значений в течение времени $T_n/2$: дискретные мгновенные значения четных гармоник исключаются. Особенность фильтра — импульсная характеристика в виде последовательности однополярных δ -функций, следующих через каждый интервал ди-

скретизации T , обеспечивает выдачу информации о начале процесса изменения действующего значения напряжения генератора уже через один интервал $T = 0,83$ мс. Дискретное изменение действующего значения напряжения генератора отображается дискретной переходной характеристикой, напоминающей дискретизованную экспоненту, длительностью $T_{II}/2$.

Измерительный орган напряжения, программно формирующий цифровые сигналы информации об отклонении действующего значения напряжения от предписанного $\Delta U(nT)$, о скорости его изменения $U(nT)$ и интегральной функции $\Sigma \Delta U(nT)$, содержит элемент сравнения — сумматор $SM3$ в режиме вычитания двоичных чисел на выходе ИПН, отображает предписанное напряжение (уставку регулятора) $U_{пр}(nT)$ и выполняет программную функцию численного дифференцирования ZD и интегрирования ZI .

Измерительный орган тока возбуждения функционирует аналогично. В нем используются активные измерительные трансформаторы токов I_a и I_c в цепи переменного тока тиристорного преобразователя, нагруженные резисторами R_{II} для преобразования токов в напряжения.

При автоматической диагностике измерительных органов проверяются наличие напряжений, чередование их фаз, несимметрия трехфазной системы напряжений.

Измерительный орган изменения частоты по своему действию аналогичен ранее применявшемуся в АРВ-СДМ. Его аппаратная часть содержит (рис. 2.8, б):

аналоговый активный сумматор AW , формирующий третье напряжение u_{ca} ;

три аналого-дискретных преобразователя $АДП1 - АДП3$, формирующих импульсные сигналы $u_{ia} - u_{ic}$ в моменты перехода напряжений $u_{ab} - u_{ca}$ через нулевые (от отрицательных к положительным) мгновенные значения (см. рис. 2.5, б).

В программной части используется счетчик $СТ$ микропроцессора тактовых импульсов $N(nT_c)$ частотой 1,25 МГц, управляемый указанными импульсными сигналами. По фиксируемым числам импульсов $N'_a - N'_c$ и $N''_a - N''_c$ (см. рис. 2.5, б) программной частью 3 раза за период определяется его длительность T_n , вычисляется (операция деления $1/T_n$) обратное число, отображающее частоту $f_n(nT)$ напряжения генератора, вычисляется (сумматор SM в режиме вычитания) отклонение Δf частоты от номинальной $f_n(nT)$, производится численное дифференцирование сигнала $\Delta f(nT)$ — формирование сигнала по производной частоты $f'(nT)$ и полученная последовательность чисел, пропускаемая через программное аperiodическое зве-

но — рекурсивный ФНЧ $ZF1$ -го порядка, — формируется сигнал по изменению $\Delta f'(nT)$ частоты.

Измерительный орган реактивного и активного токов содержит и программные измерительные преобразователи реактивной и активной мощностей. В нем используются активный измерительный трансформатор тока фазы B и его АЦП.

Программно выполняется функция перемножения дискретных мгновенных значений напряжения и тока. В симметричном режиме результаты перемножения

$$\left. \begin{aligned} u_b(nT)i_b(nT) &= U_m \sin \omega_n nT I_m \sin(\omega_n nT - \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega_n nT - \varphi); \\ \frac{u_{ca}(nT)i_c(nT)}{\sqrt{3}} &= U_m \sin \left(\omega_n nT - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \\ &= IU \sin \varphi - UI \sin(2\omega_n nT - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

содержат постоянные составляющие, отображающие активную и реактивную мощности соответственно.

Они выделяются программными нерекурсивными частотными фильтрами, аналогичными применяемым в измерительном органе напряжения — с конечной длительностью импульсной характеристики (фиксированным временем собственного переходного процесса), равной $T_{II}/2$, исключаяющими из результатов перемножений дискретизованные гармонические составляющие удвоенной частоты.

Формирование сигналов информации о соотношении потребляемого реактивного и активного токов производится с использованием программных операций перемножения дискретных мгновенных значений тока фазы B на функции $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$ соответственно. Для их генерирования вычисляется угол φ сдвига между напряжением и током одноименных фаз.

Как указывалось, измерительный орган ограничивает потребляемую синхронным генератором реактивную мощность (ограничивает снижение возбуждения генератора), допускаемую по условию сохранения статической устойчивости ЭЭС и зависящую от вырабатываемой активной мощности. Соотношение мощностей вычисляется соответствующей программой, использующей цифровое моделирование характеристик генератора.

Алгоритм функционирования АРВ-М. Как указывалось, АРВ-М функционирует по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) алгоритму.

Интегральная составляющая ПИД-алгоритма обеспечивается вводом в цепь отклонения напряжения ΔU интегратора ZI (см. рис. 2.8, а), включенного параллельно с цепью сигнала по отклонению напряжения $\Delta U(nT)$ и охваченного жесткой отрицательной обратной связью [17], включаемой при выводе интегральной составляющей алгоритма (на рис. 2.8, а не показано). Передаточная функция интегратора в p -операторном виде $H_{\text{и}}(p) = 1/(pT_{\text{и}})$. Однако более целесообразно включение интегратора непосредственно в цепь сигнала $\Delta U(nT)$, т.е. последовательно [17]. При этом для сохранения пропорциональной составляющей интегратор необходимо охватить функциональной гибкой отрицательной обратной связью, осуществляемой реальным дифференциатором с постоянной времени $T_{\text{д.р}} = T_{\text{о.с}}$ и p -передаточной функцией

$$H_{\text{о.с}}(p) = \frac{pT_{\text{о.с}}}{pT_{\text{о.с}} + 1} \quad (2.4)$$

Эквивалентная замкнутому указанной обратной связью интегратору цепь представляет собой параллельное соединение аperiodического звена (П-канал) и интегратора с увеличенной постоянной времени $T_{\text{и.жк}}$ последовательно соединенного с аperiodическим звеном (И-канал):

$$H_{\text{ж}}(p) = \frac{H_{\text{и}}(p)}{1 + H_{\text{и}}(p)H_{\text{о.с}}(p)} = \frac{1/pT_{\text{и}}}{1 + (1/pT_{\text{и}})p/(pT_{\text{о.с}} + 1)} = \frac{K_{\text{и}}}{pT_{\text{а}} + 1} + \frac{1}{pT_{\text{и.жк}} pT_{\text{а}} + 1} \quad (2.5)$$

где $T_{\text{и.жк}} = T_{\text{и}} + T_{\text{о.с}}$; $T_{\text{а}} = T_{\text{и}}T_{\text{о.с}}/(T_{\text{и}} + T_{\text{о.с}})$;
 $K_{\text{и}} = T_{\text{о.с}}/(T_{\text{о.с}} + T_{\text{и.жк}}) = 1/(1 + T_{\text{и.жк}}/T_{\text{о.с}})$ \quad (2.6)

Согласно (2.6) коэффициент передачи аperiodического звена $K_{\text{и}} < 1$ — происходит уменьшение коэффициента усиления сигнала по отклонению напряжения ПИД-регулятора $K_{\text{Ужк}} = K_{\text{I}}K_{\text{и}}$ и возрастание статизма при переходных процессах, что означает повышение устойчивости автоматической системы регулирования.

Динамические свойства структурных звеньев цифрового автоматического регулятора описываются z -передаточными функциями $H(z)$ [2].

2.7. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ "КОСУР"

Разработанный НИИ Электромаш (г. Санкт-Петербург) в составе комплекта оборудования систем управления и регулирования [10] микропроцессорный автоматический регулятор "КОСУР" выполнен на базе 32-разрядного микроконтроллера фирмы MOTOROLA MC68376, выполняющего содержащимися в нем аппаратными элементами и программно все функциональные операции, необходимые для осуществления автоматического регулирования возбуждения по, в общем случае, ПИД-алгоритму.

Одной из важных его особенностей является измерительное преобразование действующего $U_{\text{д}}(nT)$ (а не среднего, как в АРВ-М) значения напряжения в цифровой сигнал, что обеспечивает более высокую точность при наличии в напряжении синхронного генератора гармонических составляющих.

Действующее значение преобразуется путем возведения в квадрат дискретных мгновенных значений напряжения трех фаз, их суммирования и извлечения корня:

$$U_{\text{д}}(nT) = \sqrt{u_a^2(nT) + u_b^2(nT) + u_c^2(nT)}$$

Сигнал формируется в каждый интервал дискретизации $T = T_{\text{и}}/24$ и используется для программного формирования сигналов по отклонению действующего значения от устанавливаемого в соответствии с графиком напряжения на шинах электростанции значения (уставки регулятора) $\Delta U(nT)$.

Сигнал $\Delta U(nT)$, как обычно, определяет пропорциональную (П) составляющую алгоритма — автоматического регулирования, а его численное дифференцирование, т.е. формирование сигнала по производной действующего значения напряжения $U(nT)$, определяет дифференциальную (Д) его составляющую.

Интегральная (И) составляющая формируется инерционно с программными переключениями и обеспечивает устойчивое функционирование автоматической системы регулирования при сниженных коэффициентах усиления сигнала $\Delta U(nT)$.

Динамичный алгоритм ее формирования является главной особенностью АРВ "КОСУР".

Измерительное преобразование частоты выполняется программно, по существу, способом формирования цифрового сигнала, отображающего длительность периода T_n промышленной частоты и его преобразования в сигнал об истинной частоте напряжения синхронного генератора. Сравнение сигналов с моделирующим номинальную частоту, т.е. формирование сигнала информации об отклонении частоты $\Delta f(nT)$, производится программной операцией их численного вычитания, а формирование сигналов по производной частоты $f'(nT)$ и ее изменении $\Delta f'(nT)$ [см. (2.1)] производится численным дифференцированием $\Delta f(nT)$ и операцией, моделирующей пропускание сигнала $f'(nT)$ через инерционное (апериодическое) звено первого порядка [3].

Сигналы $\Delta f(nT)$ и $f'(nT)$, отображающие, как указывалось, первую и вторую производные угла δ электропередачи, обеспечивают устойчивость функционирования автоматической регулируемой электропередачи.

2.8. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Асинхронизированный генератор, вращающийся с рабочим скольжением (турбогенератор с $\omega_{\text{сд}} = s_0 - 0,002$), обладает важными с точки зрения автоматического управления режимами работы свойствами:

- простым процессом включения на параллельную работу, не связанным с опережением включения привода выключателя — главной функцией автоматических синхронизаторов;

- отсутствием ограничений потребляемой реактивной мощности условием сохранения статической устойчивости;

- повышенным запасом динамической устойчивости как при генерировании, так и при потреблении реактивной мощности;

- низкой инерционностью реализации регулирующих воздействий, формируемых по отклонениям напряжения или реактивной мощности.

Отсутствие взаимозависимости между активной и реактивной мощностью обеспечивается разделением процесса управления электромагнитным вращающим моментом и напряжением, достигнутым применением в асинхронизированном генераторе двух взаимно перпендикулярно расположенных на роторе обмоток возбуждения. Одна из них $LG1$ (рис. 2.9) с током возбуждения $I_{\text{вд}}$ служит для изменения электромагнитного момента генератора. Вторая $LG2$

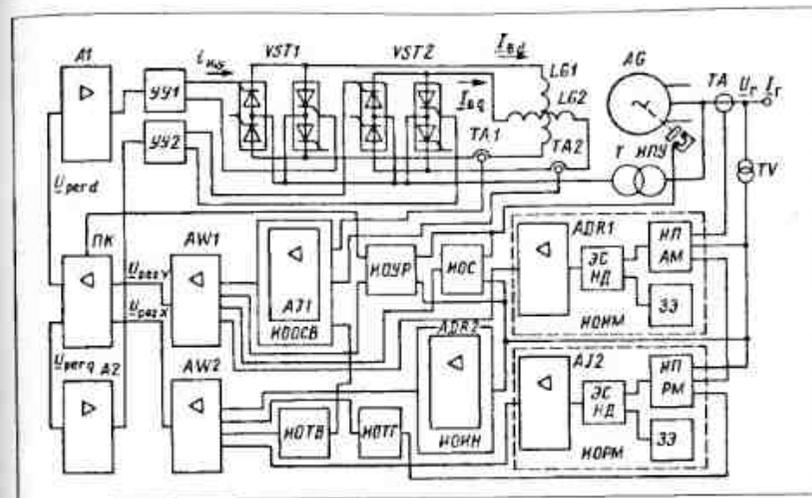


Рис. 2.9. Схема возбуждения и функциональная схема регулятора возбуждения асинхронизированного генератора

с током возбуждения $I_{\text{вд}}$ используется для управления реактивной мощностью.

Переменные, изменяющиеся с частотой скольжения токи $I_{\text{нд}}$, $I_{\text{вд}}$ являются ортогональными составляющими вектора $I_{\text{в}}$ тока возбуждения асинхронизированного генератора. Их источниками служат два реверсивных, состоящих из двух встречноключенных трехфазных тиристорных управляемых выпрямителей $VST1$, $VST2$, подключенных через трансформатор $Тк$ к выводам генератора (схема самовозбуждения).

Тиристорные выпрямители через устройства $УУ1$, $УУ2$ управления — формирования импульсных токов включения $i_{\text{нз}}$ тиристоров — управляются переменными (с частотой скольжения) напряжениями U_{perd} и U_{perq} исполнительных усилителей $А1$, $А2$ автоматического регулятора возбуждения асинхронизированного генератора (АРВ АСГ).

Он состоит из двух каналов автоматического регулирования с выходными напряжениями U_{perA} , U_{perB} , взаимодействующих лишь в связи с необходимостью их преобразования в напряжения U_{perd} , U_{perq} обусловленного углом δ сдвига фаз между магнитной осью Y первой из указанных обмоток возбуждения и магнитной осью ротора генератора, определяемой фазой тока $I_{\text{в}}$ возбуждения. Преобразование состоит в сдвиге по фазе на угол δ напряжений U_{perA} и U_{perB}

Однако в связи с изменяющимися частотой скольжения ω_s генератора и углом δ при электромеханических переходных процессах указанное преобразование производится путем перемножения комплексных величин в алгебраическом виде

$$U_{\text{per}d} + U_{\text{per}q} = (U_{\text{per}x} + jU_{\text{per}y})(\cos\delta + j\sin\delta).$$

Для этого используются четыре операции перемножения, составляющие специфичный функциональный элемент АРВ АСГ — преобразователь координат *ПК*.

Специфичным функциональным элементом измерительной части регулятора является и измерительный преобразователь (датчик) внутреннего угла δ ротора *ИПУ*. Он представляет собой индукционный генератор импульсного напряжения, момент времени появления которого в пределах периода изменения напряжения генератора определяется углом δ .

Регулирующие воздействия $U_{\text{per}x}$ и $U_{\text{per}y}$ являются следующими операторными функциями режимных параметров: изменения ΔP активной мощности при электромеханических переходных процессах, отклонения ΔQ реактивной мощности от предписанной $\Delta Q = Q_T - Q_{\text{пр}}$, изменения напряжения ΔU_T , отклонения частоты скольжения $\Delta\omega_s = \omega_s - \omega_{s0}$ и угла $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ от установившихся значений, разности токов возбуждения и превышения токами статора $\Delta I_T = I_T - I_{Tн}$ и ротора $\Delta I_B = I_B - I_{Bн}$ их номинальных значений:

$$U_{\text{per}y}(\bar{p}) = k_p \Delta P(\bar{p}) - k_s \Delta\omega_s(\bar{p}) + k_\delta \Delta\delta(\bar{p}) + (k_I / pT)(I_{\text{уд}}(\bar{p}) - I_{\text{уд}}(\bar{p})); \quad (2.7)$$

$$U_{\text{per}x}(\bar{p}) = k_U \Delta U_T(\bar{p}) + (k / pT) \Delta Q(\bar{p}) + k_{I1} \Delta I_T(\bar{p}) + k_{I2} \Delta I_B(\bar{p}). \quad (2.8)$$

Сигналы по изменениям активной мощности ΔP и напряжения ΔU формируются реальными дифференциаторами отклонений мощности ΔP и напряжения ΔU_T аналогично формированию сигнала по изменению частоты Δf в АРВ-СД [см. (2.1)].

Разработаны аналоговый микросхемный и цифровой микропроцессорный [17, 18] автоматические регуляторы возбуждения асинхронизированного генератора. Они содержат сложную измерительную часть, состоящую из измерительных органов (ИО) изменений активной мощности *ИОИМ* (рис. 2.9), скольжения *ИОС* и угла положения ротора *ИОР*, разности ортогональных составляющих *ИОСВ* тока возбуждения, реактивной мощности *ИОРМ*, измене-

ния напряжения *ИОИВ*, тока нагрузки генератора *ИОТТ* и тока его возбуждения *ИОТВ*. Каждый из них включает аппаратные или программные функциональные элементы: задающий *ЗЭ* (элемент уставки), измерительный преобразователь (ИП) и элемент сравнения непрерывного действия *ЭСИД*. В состав ИО входят соответствующие измерительные преобразователи активной *ИПАМ* и реактивной *ИПРМ* мощностей, амплитуды напряжения и частоты скольжения, угла положения ротора *ИПУ*, токов статора и ротора и ортогональных составляющих тока возбуждения. Измерительные органы изменений напряжения и активной мощности и ИО реактивной мощности и разности ортогональных составляющих тока возбуждения содержат реальные дифференциаторы *АДР1*, *АДР2* и активные интеграторы *АИ1*, *АИ2* соответственно.

Суммирование сигналов согласно (2.7) и (2.8) производится активными сумматорами *АВ1*, *АВ2*. После преобразователя координат *ПК* и исполнительных усилителей *А1*, *А2* регулирующие воздействия $U_{\text{per}d}$ и $U_{\text{per}q}$ поступают в устройства управления *УУ1*, *УУ2* тиристорными возбудителями асинхронизированного генератора. Аналоговый АРВ АСГ выполняется на интегральных микросхемах.

Микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения асинхронизированного генератора, называемый системой автоматического управления возбуждением асинхронизированных генераторов (СУВМ-АС), выполнен на высокопроизводительном комплексе БИС серии К1810. Он производит измерительное преобразование в цифровом виде параметров турбогенератора, обрабатывает дискретную информацию о его состоянии, вычисляет регулирующие воздействия в соответствии с алгоритмами (2.7), (2.8), формирует импульсы токов управления $i_{п.у}$ тиристорами возбудителя и выводит цифровую информацию о состоянии автоматической системы регулирования. Как и в ранее описанных микропроцессорных устройствах, для обеспечения надежности функционирования применяются два взаиморезервируемых комплекта вычислительных средств.

На рис. 2.10 приведена функциональная схема СУВМ-АС [18]. Основной ее частью является вычислительная *ВЧ*, состоящая из микропроцессоров *МП1*, *МП2* типа К1810ВМ86, микросхемы памяти данных и интерфейсов *ППИ*, элемента (модуля) ввода *ВДС* и вывода (управления выходными реле *УВР* и выходных реле *ВР*) дискретных сигналов, модуля аналогового ввода-вывода *АВВ*, содержащего АЦП и ЦАП, таймерного элемента измерения временных интервалов *ИВИ* и модуля фазоимпульсного управления *ФИУ*. Модуль *ИВИ* обеспечивает реализацию программного измерительного преобразования частот напряжения и вращения АСГ, угла положе-

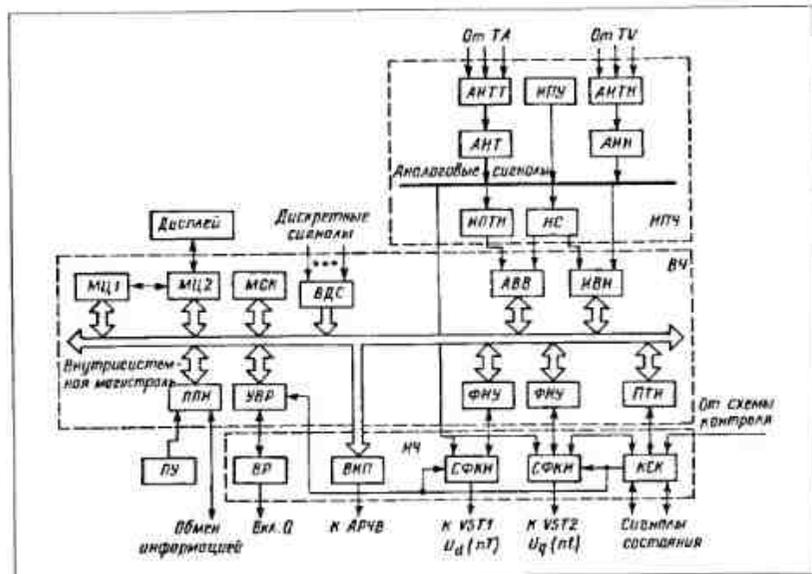


Рис. 2.10. Схема микропроцессорной системы управления возбуждением синхронизированного генератора

нения его ротора и формирования цифровых сигналов на основе времени импульсных преобразований.

Устройство связи с объектом (измерительно-преобразовательная ИПУ и исполнительная ИЧ части) обеспечивает гальваническое отделение (развязку) цепей микропроцессорной ВЧ от внешних цепей и содержит аналоговые элементы преобразования по уровню трехфазных и однофазных токов АИТ и напряжений АИН (с активными вторичными измерительными трансформаторами АИТТ, АИТН [4]), измерительный преобразователь токов и напряжений ИПТН, формирующие аналоговые сигналы информации о средних значениях напряжения генератора, токов статора АСГ, активной и реактивной их составляющих. Сигналы в виде изменяющихся по абсолютному значению и по знаку постоянных токов формируются выпрямительными с частотными выходными фильтрами измерительными преобразователями [4].

Модуль ИС нормализации сигналов приводит к унифицированному виду и уровню сигналы измерительного преобразования угла ИПУ (см. рис. 2.9) положения ротора и сигналы измерительных преобразователей токов возбуждения АСГ.

Выходные модули синхронизации, формирования и контроля импульсов СФКН являются частью устройства фазоимпульсного управления ФИУ реверсивными тиристорными возбудителями VST1 и VST2.

На схеме показан и модуль системного контроля МСК и сигнализации неисправностей КСК рабочего микропроцессорного комплекта и сигналов выводов результатов вычислительных операций из резервного комплекта, а также пульт управления ПУ.

Выполнение функциональных операций, соответствующих алгоритмам (2.7) и (2.8) регулирования, достигается программным обеспечением, включающим следующие группы программ: инициализации и стартового контроля, организации вычислительного процесса функциональной реализации алгоритмов управления и регулирования, защитной функции и сервисного контроля.

Как указывалось, формирование цифровых сигналов о режимных параметрах производится на основе времени импульсных преобразований с использованием счетчика (модуль ИВН) для фиксирования длительностей временных интервалов. В частности, частота, разность частот и углы сдвига фаз определяются способами, применяемыми в программных измерительных органах АРВ-СДМ (см. рис. 2.5).

Программными средствами формируются и фазоимпульсные регулирующие воздействия на тиристоры возбудителей: сигналы управления фазой импульсного тока включения тиристоров представляют собой двоичный код.

Кроме осуществления непростых алгоритмов автоматического регулирования возбуждения асинхронизированного генератора, микропроцессорная система СУВМ-АС обеспечивает автоматическое управление пуском, подготовкой, воздействием на АРЧВ через ВИП и включением на параллельную работу (синхронизацией и нагружением турбогенератора). Защитными функциями СУВМ-АС являются ограничения перегрузок турбогенератора по токам ротора и статора по условию допустимого нагрева, максимального тока возбуждения и минимального возбуждения в синхронном режиме работы только с одной обмоткой ротора.

Сервисные функции, являющиеся специфичными, свойственными только микропроцессорным автоматическим системам, как и аналогичные для АС-М, ЭЧРС-М и АРВ-СДМ, обеспечивают удобство их технического обслуживания и высокий уровень производственной культуры в технике автоматического управления процессом производства и передачи электроэнергии.

Микропроцессорные автоматические регуляторы частоты вращения и активной мощности генераторов

3.1. ВИДЫ РЕГУЛЯТОРОВ

Практически постоянная частота $f_{ном} = 50 \pm 0.1$ Гц и выработка генератором необходимой электроэнергии (активной мощности) обеспечиваются автоматическими регуляторами частоты вращения (АРЧВ) турбины и автоматической системой регулирования частоты и активной мощности электростанции (АСРЧМ) [1, 2].

На тепловых турбинах установлены гидродинамические АРЧВ, а на гидравлических турбинах — электрогидравлические АРЧВ с электрической измерительной частью, воздействующей на исполнительную гидравлическую часть через электрогидравлический преобразователь (ЭГП). Они имеют установочные (задающие) элементы с микроэлектродвигательным приводом, на который воздействует электрическая АСРЧМ.

Разработан [11] микропроцессорный электрогидравлический автоматический регулятор частоты вращения и активной мощности гидро- и турбогенераторов. Создана [12 – 14] микропроцессорная автоматическая система управления активной мощностью турбогенераторов.

3.2. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Электрогидравлический регулятор (ЭГР) состоит из электрической и гидравлической частей, являющихся его исполнительной функциональной частью. Она представляет собой мощный гидравлический двигатель (ГД) или усилитель (ГД, охваченный жесткой отрицательной обратной связью [17]), развивающий достаточное

для изменения положений направляющего аппарата гидротурбины или регулирующих клапанов паровой турбины усилие. Связь между электрической и гидравлической частями ЭГР осуществляет электрогидравлический преобразователь. Одна из его конструкций, разработанных АО "Ленинградский металлический завод", показана на рис. 3.1. Он состоит из магнитоэлектрического электромеханического преобразователя ЭМП и гидравлического усилителя ГУ с дроссельным золотником [3]. Электромеханический преобразователь состоит из двух полуцилиндров 1 с обмотками w , подвижного штока (якоря) 2 и центрирующих пружин 3. Полуцилиндры с обмотками

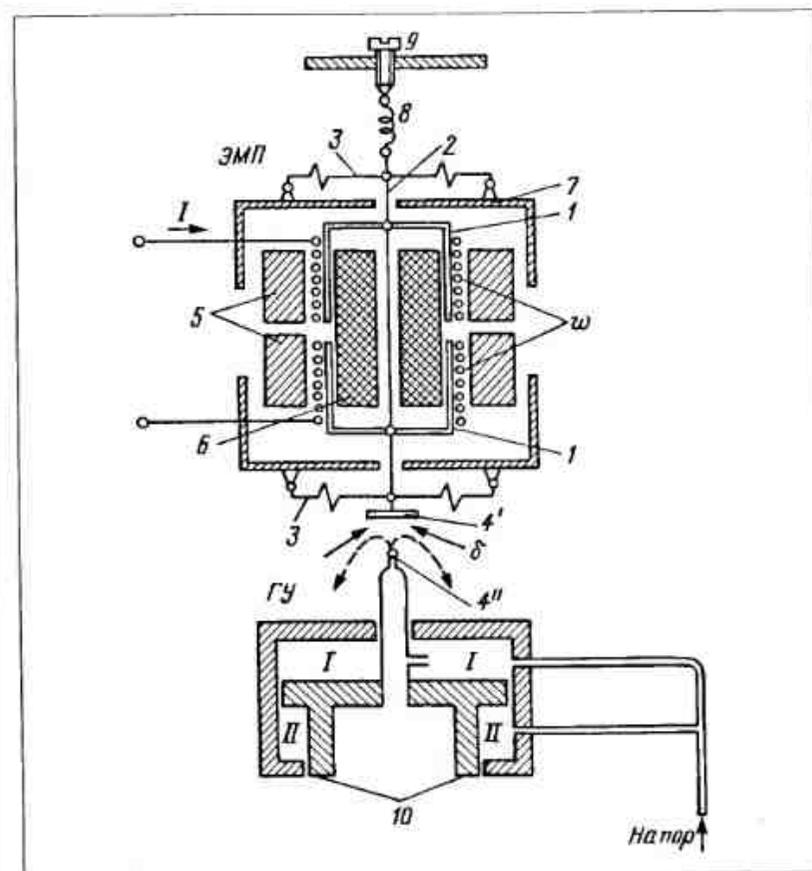


Рис. 3.1. Конструкция электрогидравлического преобразователя

расположены между кольцевыми постоянными магнитами 5 и цилиндрическим сердечником 6, внутри которого может перемещаться шток 2. Верхний конец подвижного штока через пружину 8 связан с установочным винтом 9, а на нижнем его конце закреплено отбойное кольцо 4 дроссельного золотника. Электромеханический преобразователь размещается в корпусе 7.

Гидравлический усилитель выполнен в виде так называемого следающего золотника с дифференциальным, т.е. имеющим разные площади поверхностей S_1 , S_2 , поршнем 10. Именно за счет различия площадей поверхностей и достигается увеличение усилия штока электромеханического преобразователя на поршень, которое определяется разностью давлений в полостях I и II цилиндра и отношением указанных площадей. Давление в полости II постоянно, а давление в полости I зависит от дросселирующего отверстия, т.е. зазора δ , между отбойным кольцом 4 и соплом 4' золотника.

При отсутствии электрического управляющего воздействия, т.е. при $I=0$, шток 2 электромеханического преобразователя и поршень 10 находятся в исходных положениях. Через зазор δ масло проходит с определенной скоростью. При появлении тока I в зависимости от его знака шток 2 перемещается вверх или вниз и увеличивает или уменьшает зазор δ . При этом давление в полости I соответственно уменьшается или увеличивается. Поршень 10 перемещается вслед за штоком 2 и соответствующим образом изменяет выпуск масла в гидравлический двигатель. Для функционирования гидравлического усилителя необходима жесткая отрицательная обратная связь, которая осуществляется тем, что дросселирующий зазор δ , увеличиваемый (или уменьшаемый) перемещением штока (входным перемещением), уменьшается (или увеличивается) по мере движения поршня (выходное перемещение): дроссельный золотник с гидроусилителем представляет собой гидравлическое следающее устройство с замкнутой цепью воздействий.

Электрогидравлический преобразователь обладает практически линейной характеристикой и является достаточно быстродействующим, его постоянная времени равна $\tau_m = 10 \div 15$ мс.

3.3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭГР-МП

Автоматический регулятор выпускается ООО "Пром-Автоматика" (г. Санкт-Петербург) как для гидро-, так и для турбогенераторов. Регулятор гидрогенераторов функционирует по пропорционально-

интегрально-дифференциальному (ПИД) алгоритму и обеспечивает астатическую (горизонтальную) характеристику регулирования — зависимость частоты вращения от активной мощности $\omega = f(P)$ в нормальном режиме нагруженного генератора. Активная нагрузка гидроэлектростанции (как частоторегулирующей) распределяется между параллельно работающими гидрогенераторами отдельной программой.

В режиме пуска и холостого хода гидроагрегата производится переключение на пропорциональный (П) алгоритм, поскольку при холостом ходе динамические свойства гидравлической турбины описываются p -передаточной функцией интегрирующего звена, а при наличии в автоматической системе регулирования двух интегрирующих звеньев (первое, формирующее интегральную составляющую ПИД-алгоритма) она оказывается структурно неустойчивой [3], т.е. возбуждается (переходит в автоколебательное состояние) при любых значениях ее параметров.

Автоматический регулятор турбогенераторов функционирует по П- или по пропорционально-дифференциальному (ПД) алгоритму и является статическим регулятором: характеристика регулирования — наклонная, поскольку тепловая электростанция в нормальном режиме (при малых, допускаемых ГОСТ отклонениях частоты) участия в ее регулировании не принимает [3].

Регулятор вступает в действие по регулированию частоты при значительных, превышающих зону нечувствительности, ее отклонениях от номинальной.

При статических характеристиках обеспечивается четкое распределение активной нагрузки электростанции между параллельно работающими турбогенераторами [3].

Автоматический регулятор ЭГР-МП, внешний вид панели которого показан на рис. 3.2, представляет собой микропроцессорную электрическую часть электрогидравлической автоматической системы регулирования частоты и активной мощности, воздействующей на электрогидравлический преобразователь (см. рис. 3.1).

Он выполнен на двух зарубежных микропроцессорах, собранных из стандартных модулей фирм Octagon и Fastwel [11]. Они взаиморезервируемы: функционируют по принципу ведущий-ведомый. Ведущий микропроцессор определяется автоматически троированным (работающим в режиме два из трех) арбитрам. Такая структура обеспечивает необходимую надежность функционирования автоматического регулятора. Для обеспечения безударности переключения ведущий микропроцессор постоянно передает ведомому информацию о состоянии регулятора и его уставках [11].

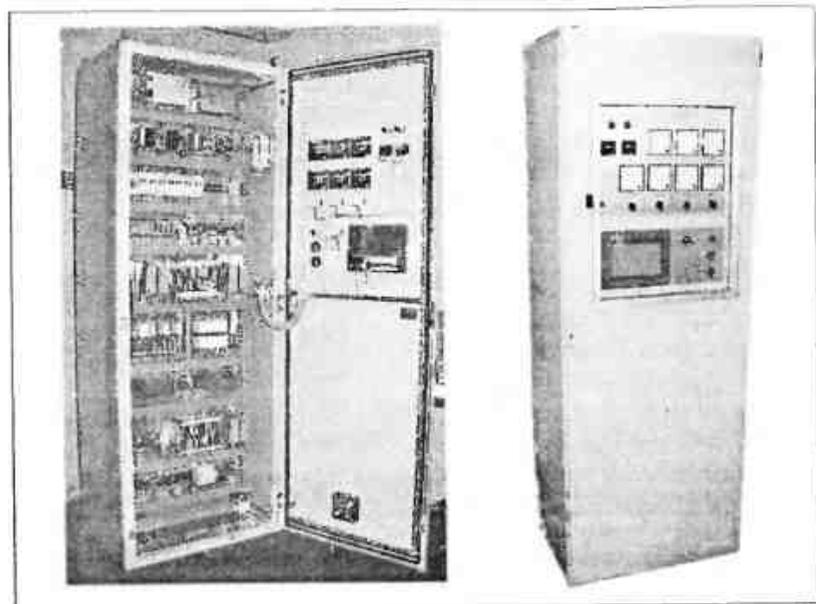


Рис. 3.2. Внешний вид панели электрооборудования ЭГР-МП

Автоматический регулятор имеет и аппаратную часть, содержащую измерительные преобразователи частоты и активной мощности. Измерительное преобразование частоты производится путем формирования импульсного сигнала индукционным измерительным преобразователем (см. ИПУ на рис. 2.9), возбуждаемым так называемой “звездочкой”, расположенной на валу гидро- или турбогенератора, вместо пластины, перекрывающей воздушный зазор постоянного магнита с обмоткой 2 раза за один оборот вала — в начале и в конце периода T_n промышленной частоты. Звездочка перекрывает его $(1 + n)$ раз и формирует интервалы времени, равные части периода промышленной частоты: на турбогенераторе с двухполюсным ротором, вращающийся его с частотой 50 с^{-1} , — интервалы времени $t_{n,r} = T_n/n$. На тихоходном гидрогенераторе — более длительные интервалы времени $t_{n,r} \gg t_{n,r}$.

Интервалы времени заполняются единичными счетными импульсами высокой (относительно промышленной) частоты: формируется числоимпульсный сигнал, отображающий длительность периода T_n , обратно пропорциональную частоте вращения энергоагрегата. Программируемая логическая матрица формирует сигнал в

двоичной системе счисления о частоте напряжения гидро- или турбогенератора, который и поступает в микропроцессор.

Микропроцессор формирует в общем случае ПИД-алгоритм регулирования частоты:

сравнивает указанный сигнал с уставкой регулятора — номинальной частотой или установленной в соответствии с нагрузкой генератора активной мощностью (статические характеристики регулирования турбогенераторов переменяются параллельно самим себе вверх или вниз при повышении или снижении заданной активной мощности турбогенератора [3]), т.е. определяет отклонение $\Delta\omega(nT)$ частоты вращения от установленной, необходимое для реализации пропорциональной составляющей алгоритма регулирования:

численно дифференцирует отклонение частоты — формирует дифференциальную составляющую алгоритма;

численно интегрирует отклонение частоты для обеспечения интегральной составляющей, необходимой для астатического регулирования частоты вращения гидрогенераторов.

Сумма указанных сигналов поступает в цифро-аналоговый преобразователь, выходной сигнал которого представляет собой постоянный ток, пропорциональный двоичному коду суммы сигналов. После его усиления мощным выходным усилителем ток как регулирующее воздействие поступает в электрогидравлический преобразователь (см. рис. 3.1).

Измерительное преобразование активной мощности синхронного генератора производится серийным аналоговым измерительным преобразователем. Его непрерывный сигнал в виде изменяющегося по абсолютному значению и знаку постоянного тока аналого-цифровым преобразователем превращается в двоичный цифровой код, поступающий в микропроцессор.

Он программно сравнивается с сигналом о задаваемой синхронному генератору мощности — формируется разность необходимой и истинной его нагрузок, т.е. отклонение мощности $\Delta P(nT)$. Сигнал о $\Delta P(nT)$ численно интегрируется и после преобразования ЦАП в пропорциональный постоянный ток и усиления воздействует на электрогидравлический преобразователь-сумматор регулирующих воздействий по частоте и по активной мощности.

Так производится быстродействующее, но статическое регулирование мощности. Поэтому цифровой сигнал после численного интегрирования $\Delta P(nT)$ воздействует на задающий (установочный) элемент по частоте, увеличивая или уменьшая заданную частоту $\omega_y > \omega_{\text{ном}}$ статического регулятора турбогенератора — обеспечивает

астатическое регулирование активной мощности. Регулирование активной мощности производится по ПИ-алгоритму.

Кроме автоматического регулирования частоты и активной мощности в нормальном режиме работы нагруженного асинхронного генератора ЭГР-МП выполняет и другие функции, в особенности:

обеспечивает пуск и останов гидроагрегата и автоматическую нагрузку или разгрузку тепловой турбины по контролю теплонатяженного состояния ее металла;

устанавливает задаваемую автоматическим синхронизатором (см. гл. 1) разность частот $\omega_{\text{с}}$ при подготовке генератора к его синхронизации;

осуществляет противоразгонную защиту гидро- и тепловой турбины при сбросе нагрузки синхронным генератором.

Автоматический регулятор ЭГР-МП функционирует на Красноярской ГЭС и испытан на энергоблоке 800 МВт Рязанской ГРЭС.

3.4. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Автоматическое управление режимами работы генераторов электрических станций осуществляется автоматической системой регулирования частоты и мощности (АСРЧМ), содержащей гидродинамическую и электрическую части.

Существенное совершенствование АСРЧМ достигнуто с созданием микропроцессорной электрической части системы регулирования (ЭЧСР-М). Сначала была разработана ЭЧСР-М1 на микроЭВМ, а затем унифицированная ЭЧСР-М2 на микропроцессорных средствах для автоматизации энергетических комплексов (МС АЭК) повышенной надежности [13, 14].

Автоматическое регулирование мощности в нормальном и частоты в утяжеленном режимах осуществляется по медленно действующему контуру управления МКУ (рис. 3.3) в соответствии с пропорционально-интегральным алгоритмом: регулирующее воздействие определяется интегральной функцией отклонения ΔP мощности от предписанной $P_{\text{г.пр}}$.

Микропроцессорная электрическая часть АСРЧМ выполняет и функции быстрого действия по контуру (БКУ) мощностью турбогенераторов по сигналам противоаварийной автоматики (ПА) предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР), а именно:

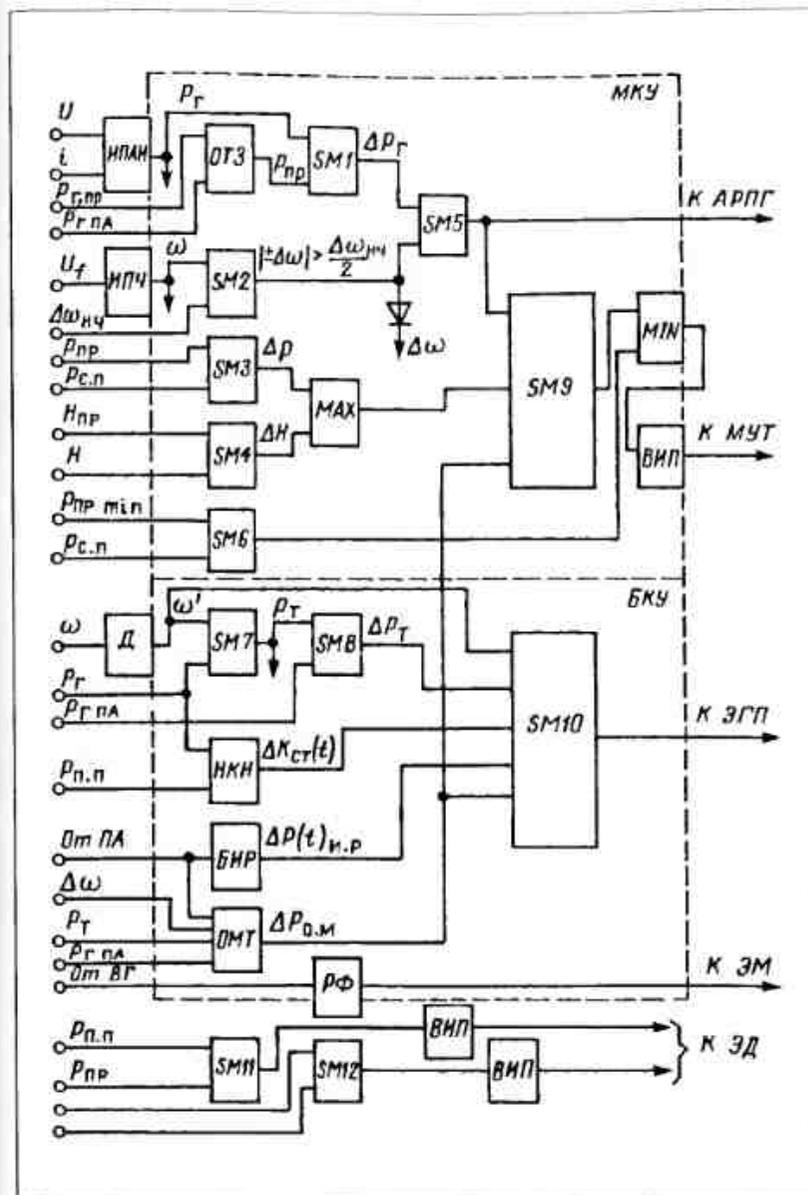


Рис. 3.3. Функциональная схема микропроцессорной электрической части автоматической системы регулирования мощности турбогенераторов (ЭЧСР-М)

быстродействующего кратковременного снижения мощности — импульсной разгрузки турбины *БИР* для сохранения динамической устойчивости в аварийном режиме;

длительного снижения — ограничения мощности турбины *ОМТ* для сохранения статической устойчивости в послеаварийном режиме и для ресинхронизации турбогенераторов.

Быстродействие импульсной разгрузки достигается воздействием ЭЧСР-М непосредственно на исполнительную гидравлическую часть АРЧВ через электрогидравлический преобразователь ЭПН (см. рис. 3.1). Через ЭПН исполняется и функция обеспечения приемистости турбины — способности быстро изменять свою производительность. При этом реализуется пропорционально-дифференциальный алгоритм автоматического регулирования: регулирующее воздействие определяется отклонением мощности и ее производной (скоростью изменения).

Устойчивость автоматического регулирования по МКУ достигается за счет времени импульсного воздействия ЭЧСР-М на электродвигатель *МУТ*; программно выполняется функция позиционного автоматического регулятора мощности (АРМ). Только такой АРМ устойчиво реализует пропорционально-интегральный алгоритм автоматического регулирования при интегрирующем исполнительном элементе с постоянной скоростью движения, каким является электродвигатель *МУТ*. Вычисляемая в реальном времени переходного процесса регулирования, уменьшающаяся по мере приближения истинной мощности турбогенератора P_1 к предписанной $P_{1,пр}$ длительность импульсных воздействий на включение электродвигателя обеспечивает спокойное, без перерегулирования, наступление установившегося режима работы.

В микропроцессорной ЭЧСР используется информация и об отклонениях неэлектрических параметров энергоагрегата, а именно, или давления свежего пара $p_{с,п}$ при работе турбины с постоянным (номинальным) давлением, или открытия H ее регулирующих клапанов при работе на скользящем давлении от предписанных $p_{пр}$ и $H_{пр}$ соответственно.

В цифровом виде сигналы формируются реализацией вычитания (сравнения) цифровыми сумматорами *SM1* — *SM4* (см. рис. 3.3): максимальный из двух сигналов: по отклонениям давления Δp пара или положения клапанов турбины ΔH определяется их сравнением, обозначенным на схеме выделителем максимума *MAX*.

Скорость (темп) изменения предписанной энергоблоку мощности $P_{пр}$, сигналы о которой поступают от общестанционной АСРЧМ ($P_{г,пр}$) или от противоаварийной автоматики ($P_{гПА}$), устанавлива-

ется программным модулем ограничения темпа здания *ОТЗ* в зависимости от термических напряжений в металле турбины. Сигналы информации о мощности P_1 и частоте вращения генератора ω и ее отклонении с зоной нечувствительности $\Delta\omega_{нч}$ формируются измерительными преобразователями активной мощности *ИПМ*, частоты *ИПЧ* и цифровым сумматором *SM2*.

При неполадках в работе технологического оборудования энергоблока или повышении технологических ограничений гибкая функциональная структура ЭЧСР-М перестраивается. Например, при снижении давления свежего пара включается защитный контур регулирования давления по сигналу $p_{прmin}$ через выделитель *MIN* минимального сигнала, а при отключении автоматического регулятора парогенератора *АРПГ* устройство переходит в режим регулирования давления свежего пара.

Время импульсное воздействие ЭЧСР-М временем импульсным преобразователем *ВИП* по медленно действующему контуру управления *МКУ* на электродвигатель *МУТ* условно показано на функциональной схеме (см. рис. 3.3). Сумма сигналов по ΔP_1 и $\Delta\omega$ через сумматор *SM5* воздействует и на автоматический регулятор парогенератора *АРПГ*.

Быстродействующий контур автоматического управления *БКУ* реализуется, как указывалось, через ЭПН. Программным модулем, составной частью которого является дифференциатор *D* сигнала по изменению частоты ω , и сумматором *SM7* формируется сигнал о мощности турбины

$$P_1 = P_T + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

Программными модулями быстродействующей противоаварийной импульсной разгрузки *БИР* длительного ограничения мощности турбины *ОМТ* и изменения (в начальное время переходного процесса) статизма АРЧВ (так называемой начальной коррекции неравномерности *НКН*), необходимой для повышения приемистости турбины, формируются цифровые сигналы управления от противоаварийной автоматики:

- о необходимом изменении $\Delta P_1(t)_{н.р}$ мощности турбины — импульсной ее разгрузки при аварийной ситуации;
- о длительности снижения мощности $\Delta P_{о,м}$ турбоагрегата в послеаварийном режиме;
- о начальной коррекции неравномерности (статизма) $\Delta K_{ст}(t)$; сигнал формируется по информации о мощности генератора P_1 и давле-

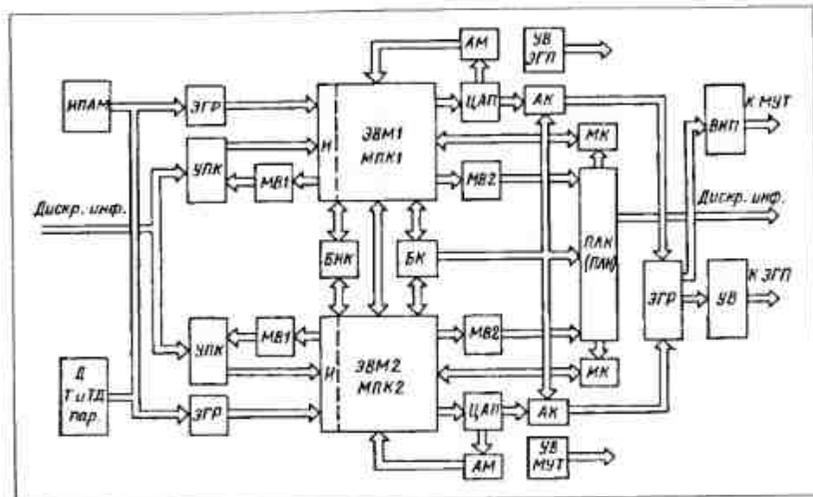


Рис. 3.4. Схема структуры ЭЧСР-М

нии пара $p_{н.п}$ в промперегревателе парогенератора: именно объем перегретого пара, поступающего в цилиндр среднего давления турбины, обуславливает ее инерционность (низкую приемистость).

Программный модуль *ОМТ* реализуется по схеме регулирования механической мощности турбины P_T , а программа модуля *БПР* выполняет сложные вычисления дозированного противаварийного импульсного воздействия на регулирующие клапаны турбины.

На функциональной схеме (см. рис. 3.3) показан защитный сигнал релейной форсировки *РФ* закрытия стопорных клапанов турбины (электромагнитом *ЭМ*) при отключении выключателя *ВГ* генератора. Предусмотренные в ЭЧСР-М2 цепи (сумматоры *SM11*, *SM12*) управляют (через *ВВП*) электродвигателями регулятора давления пара $p_{н.п}$ в промперегревателе и регулятора положения поворотной диафрагмы теплофикационной турбины. Цепи диагностики и контроля прогрева ротора турбины на схеме не отражены.

Более производительный микропроцессор ЭЧСР-М2 обеспечивает выполнение дополнительных функций и повышение информативности диагностики состояния турбины и каналов автоматического управления. Информация анализируется и передается в ПЭВМ.

В соответствии с требованиями безотказности функционирования в ЭЧСР-М предусмотрены по два ЭВМ1, ЭВМ2 или МПК1, МПК2 (рис. 3.4) взаиморезервируемых комплекта микроЭВМ или микропроцессорного комплекта: один рабочий (ведущий), а второй

резервный (веломай). Они связаны между собой устройством (блоком) контроля *БК*, обрабатывающим сигналы информации об исправности вычислительных средств.

Устройство связи с объектом содержит, прежде всего, элементы гальванического отделения источников сигналов и выходных воздействий от микроЭВМ или микропроцессоров. В цепях дискретных сигналов используются миниатюрные электромагнитные реле с герметизированными контактами — герконы, образующие устройства приема контактов *УПК*. Мультиплексоры ввода дискретной информации *МВ1* обеспечивают рациональное использование входного параллельного интерфейса *И* микроЭВМ или МПК.

Непрерывные аналоговые сигналы, в частности, от измерительного преобразователя активной мощности *ИПАМ* передаются через изолирующие оптронные интегральные усилители — элементы гальванической развязки *ЭГР*. Они преобразуют унифицированные токовые (± 5 мА) сигналы ИПАМ, ИПЧ и индукционных измерительных преобразователей датчиков давлений в электрические сигналы во входные (± 5 В) напряжения АЦП.

Вывод основной дискретной информации производится выходным параллельным интерфейсом и мультиплексорами *МВ2* по схеме ИЛИ через преобразователи дискретных потенциальных сигналов микроЭВМ или МПК в состояние герконов *ПЛК*. Аналоговые сигналы с выходов *ЦАП* через аналоговый коммутатор *АК* поступают через оптронные элементы гальванической развязки *ЭГР* на *ВВП* и усилитель *УВ*, формирующие времяимпульсное и непрерывное управляющие воздействия на *МУТ* и *ЭГП* соответственно.

Аналоговые мультиплексоры *АМ*, связывающие выход *ЦАП* с микроЭВМ или МПК, мультиплексоры *МК* и блок *БК* являются элементами диагностики и контроля исправности устройства ЭЧСР-М. Программное обеспечение ЭЧСР-М представляет собой организованные в определенную структуру программы различного функционального назначения иерархического построения — программы верхнего уровня определяют и координируют функционирование программ нижнего уровня. Используется библиотека стандартных программ.

Указанная структура программ обеспечивает циклическое функционирование ЭЧСР-М с обновлением управляющего воздействия на выходе к *ЭГП* через каждые 10 мс (половину периода промышленной частоты), а на выходе к *МУТ* — через 100 мс.

Микропроцессорная ЭЧСР выполняет и функции автоматического управления частотой вращения в процессе пуска турбоагрега-

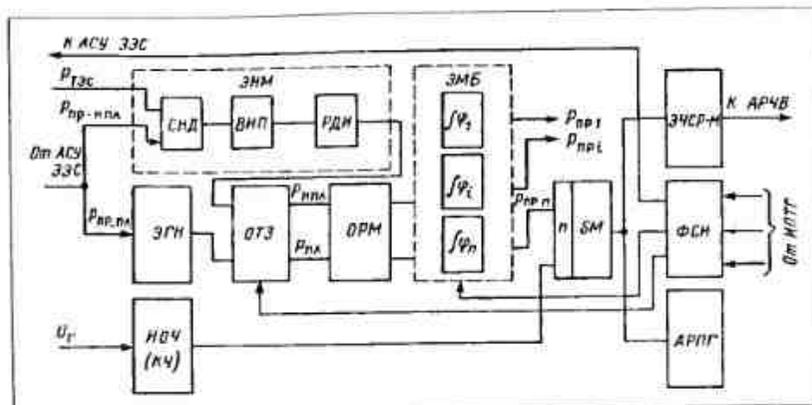


Рис. 3.5. Функциональная схема микропроцессорной АСРЧ-М

та и начального нагружения турбины, производимого с учетом тепловой ее инерционности.

Автоматическая система регулирования частоты и мощности обеспечивает стабильность частоты и распределение активной мощности между параллельно работающими турбогенераторами по технико-экономическому показателю энергоагрегата — характеристике относительного прироста расхода условного топлива. Автоматическая система содержит общестанционный астатический регулятор частоты с интегрирующим измерительным преобразователем изменений частоты, формирующим сигнал интегрального (среднего за время $\Delta t = t_k - t_n$ начала и окончания изменения частоты) отклонения частоты:

$$U_{\text{ин}} = k_{\text{н}} \int_{t_n}^{t_k} \Delta f dt. \quad (3.2)$$

Интегральная функция целесообразна, поскольку качественно аналогична изменениям нагрузки и может использоваться для формирования сигнала о предписанной мощности $P_{\text{пр}}$ электростанции [2], если он не передается от АСУ ЭЭС.

Общая функциональная схема разработанной микропроцессорной автоматической системы управления мощностью [12] содержит (рис. 3.5) программные задающие элементы плановой нагрузки ЭГН и неплановой мощности ЭНМ, ограничения темпа заданий на изменения мощностей ОТЗ и безударного подключения и отключения

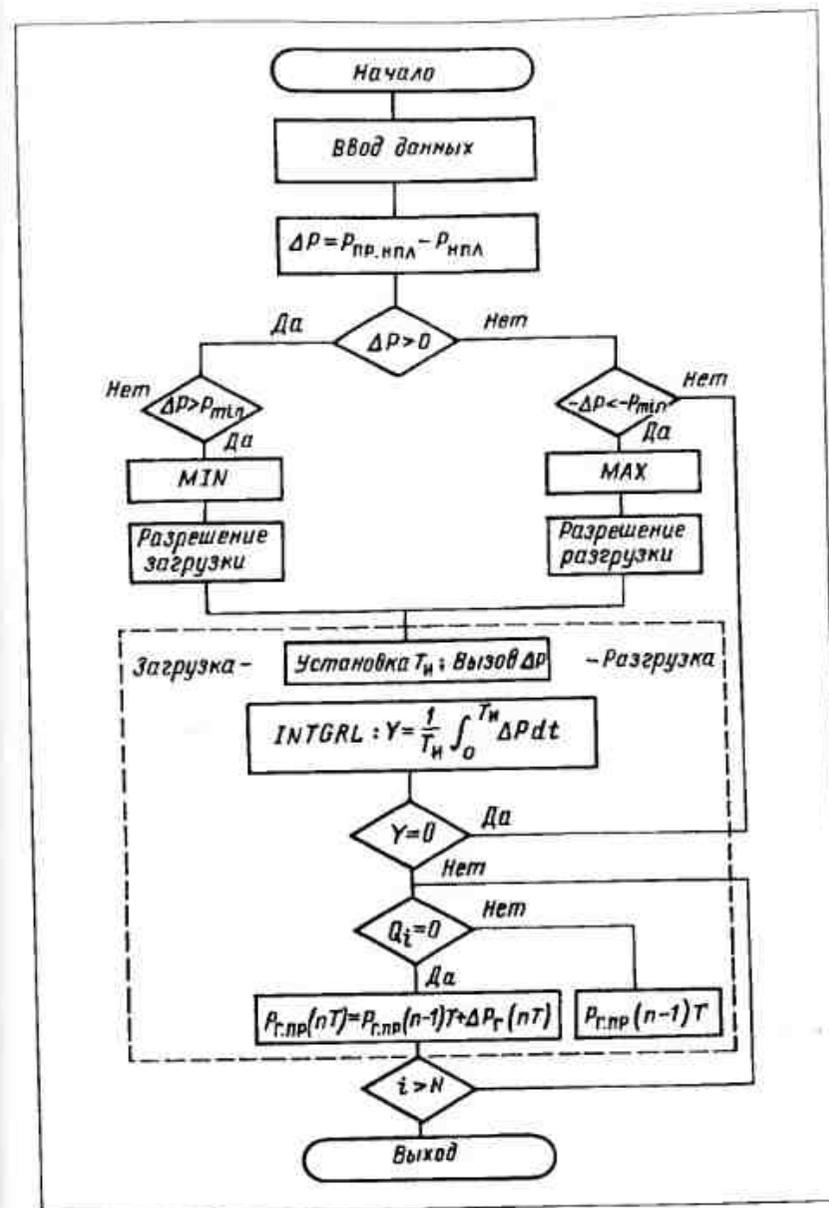


Рис. 3.6. Упрощенная структурная схема программ распределения мощности между турбогенераторами

системы (безударных операций) ЭБО и выполняет программную функцию оптимального по технико-экономическим показателям распределения мощности ОРМ и задания мощности $P_{пр}$ энергоблокам ЗМБ. Выходной сумматор SM сигналов воздействует на микропроцессорную ЭЧСР-М и аналоговый регулятор парогенератора АРПГ.

Программа оптимального распределения мощности обеспечивает вычисление функций φ_i изменений мощностей энергоблоков по их технико-экономическим показателям и технологическим ограничениям и определяет приоритет загрузки отдельных энергоблоков или их групп с учетом технологически допустимых регулировочных диапазонов.

Программное ограничение темпа задания (в каналах мощностей $P_{пр.пл}$ и $P_{пр.нпл}$) также осуществляется цифровыми моделями астатических регуляторов с интеграторами, постоянные времени которых и устанавливают допустимые по технологическим условиям скорости изменений заданий мощностей или скорость изменений нагрузок энергоблоков при подключениях и отключениях. Программно реализуется и измерительный орган частоты ИОЧ с зоной нечувствительности (корректор частоты КЧ). Например, показанная на рис. 3.6 упрощенная программа распределения предписанной ТЭС неплановой мощности $P_{пр.нпл}$ между турбогенераторами, т.е. определение $P_{пр}$ состоит из ряда подпрограмм-программных модулей. Модуль сравнения предписанной $P_{пр.нпл}$ и истинной $P_{нпл}$ мощностей электростанции выявляет необходимое ее приращение $\Delta P = P_{пр.нпл} - P_{нпл}$. Производится проверка условия $|\Delta P| > 0$ и условий перехода к нагрузке генераторов $\Delta P > \Delta P_{мин}$ или их разгрузке — $\Delta P < -\Delta P_{мин}$, где ΔP — порог чувствительности вычислительной части к изменениям мощности. Модуль загрузки MIN при выполнении первого из двух указанных условий перехода определяет энергоблок, с которого по его технико-экономическим показателям и технологическим условиям должна начинаться загрузка турбогенератора дополнительной мощностью, и проверяет наличие регулировочного диапазона на увеличение его нагрузки. Модуль разгрузки MAX при выполнении второго условия перехода выбирает энергоблок, начиная с которого должно производиться снижение мощности турбогенераторов, и проверяет отсутствие технологических ограничений уменьшения его нагрузки.

По подпрограммам MIN и MAX циклически анализируется состояние всех энергоблоков ТЭС. Определяется один из возможных результатов анализа: найден один энергоблок с минимальным (максимальным) индексом приоритета на загрузку или разгрузку

соответственно; найдено несколько турбогенераторов с одинаковыми приоритетами; получен признак отсутствия регулировочных диапазонов у всех энергоблоков. Первые два результата используются программными модулями разрешения и изменения мощности — разрешения загрузки (разгрузки) выбранного энергоблока (энергоблоков).

Программный модуль ЗАГРУЗКА — РАЗГРУЗКА производит расчеты управляющих воздействий на одновременное или поочередное увеличение (уменьшение) мощности выбранных турбоагрегатов. Производится подготовка данных для расчетов, в особенности ΔP и постоянной времени $T_{инт}$ интегрирования. Подпрограмма INTGR_л выполняет интегральную операцию $Y = (1/T_{инт}) \int_0^{T_{инт}} \Delta P dt$, моделирую-

щую следующее астатическое изменение предписанной мощности. Если результат интегрирования отличен от нуля $Y \neq 0$, производится проверка условий $Q_i = 0$ возможности изменения нагрузки i -го турбогенератора. Значением условия $Q_i = 1$ запрещается участие турбогенератора в покрытии приращения мощности; сохраняется прежняя его нагрузка $P_{г.пр}(n-1)T$. При допустимости ее изменений предписанная мощность генератора $P_{г.пр}(nT)$ увеличивается на ΔP_g , определяемую коэффициентом или функцией φ_i долевого участия i -го турбогенератора в покрытии изменения нагрузки или ограничиваемую максимально или минимально допустимой мощностью энергоблока в соответствии с возможным динамическим диапазоном ее изменения. Если порядковый номер i турбогенератора не превышает их количества N , то по переходу, определяемому отрицанием условия $i > N$, производится следующий цикл определения изменения нагрузки $i+1$ -го турбогенератора.

Функции ОРЧМ по управлению плановой мощностью сводятся в основном к следующим:

формирование промежуточных (между заданными АСУ ЭЭС почасовыми) точек прогнозируемой части графика нагрузки электростанции;

расчеты предписанной плановой мощности энергоблоков на основе анализа их технико-экономических показателей и с учетом регулировочных диапазонов, допустимой скорости изменения нагрузки турбогенераторов, допускаемой перегрузки трансформаторов связи между шинами различных напряжений и технологических ограничений изменения мощности турбин; обеспечение в результате оптимального экономически и рационального техниче-

пределения предписанной ТЭС графиком нагрузки плановой мощности;

формирование сигналов информации о выполняемом графике нагрузки.

Плановая предписанная нагрузка $P_{пр.пл}$ рассчитывается в общеэнергосистемном оперативном информационно-управляющем комплексе АСУ ЭЭС и передается по каналам связи системы сбора и передачи информации. Задачи, связанные с управлением неплановой предписанной мощностью $P_{пр.нпл}$ и противоаварийным управлением, решаются в реальном времени управляющим вычислительным комплексом общеэнергосистемного уровня. Расчеты заданной плановой мощности энергоблокам по их технико-экономическим показателям производятся микропроцессорами в соответствии с графиком нагрузки, а неплановой — циклически каждые 0,2 с.

Функции задания мощностей ЭГН, ЭНМ и ЭМБ выполняются по замкнутым схемам слеящего автоматического регулирования, по интегральному алгоритму и принципиально реализуются как программные позиционные астатические регуляторы. Например, реализация функции ЭНМ предполагает сравнение сигналов о предписанной $P_{пр.пл}$ и истинной $P_{ТЭС}$ мощностях электростанции непрерывного действия СВД, времяимпульсного преобразования ВИП и расчета длительностей импульсных воздействий РДИ.

Показанная на схеме (рис. 3.6) информационная часть — программная функция сбора информации ФСИ формирует цифровые сигналы от измерительных преобразователей режимных параметров турбогенератора ИПТУ.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

Микропроцессорные автоматические регуляторы напряжения и реактивной мощности синхронных и статических компенсаторов и трансформаторов

4.1. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Синхронные компенсаторы (СК) функционируют как управляемые реверсивные источники, т.е. и как генераторы, и как потребители реактивной мощности.

Режим генерирования (выдачи) или потребления реактивной мощности определяется возбуждением СК. В соответствии с U-образной его характеристикой (рис. 4.1, а) при номинальном возбуждении $I_{вном}$ синхронный компенсатор выдаст реактивную мощность

$$Q_{СКном} = E_{фном}(E_{фном} - U_{ш})/X_d \quad (4.1)$$

а при отсутствии возбуждения $I_{в} = 0$ — потребляет реактивную мощность

$$|-Q_{СК0}| = U_m^2/X_d \approx 0,5Q_{СКном} \quad (4.2)$$

Наибольшая возможная нагрузка СК потребляемой реактивной мощностью достигается или при граничном отрицательном токе возбуждения $-I_{в.гр}$ или при отсутствии возбуждения $I_{в} = 0$ и внутреннем угле компенсатора $\delta = \pi/2$ (рис. 4.1, в), т.е. при расположении ротора по поперечной оси, при которых

$$|-Q_{СКгр}| = U_m^2/X_q \approx Q_{СКном} \quad (4.3)$$

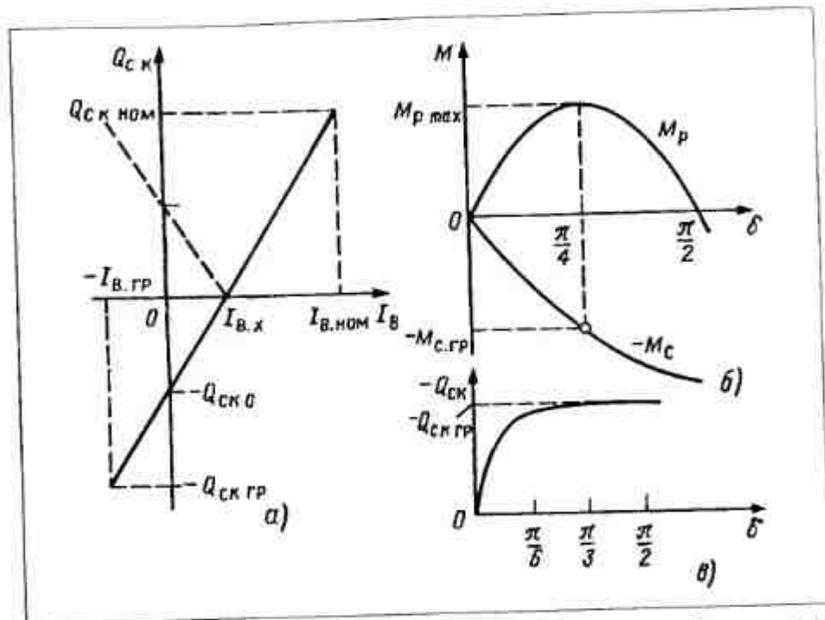


Рис. 4.1. Графики зависимостей реактивной мощности от тока возбуждения (а), вращающихся моментов (б) и потребляемой реактивной мощности (в) от внутреннего угла синхронного компенсатора (СК)

Граничный режим потребления реактивной мощности определяется условием устойчивости работы СК — сохранением синхронизма. Синхронизирующий вращающийся момент создается синхронным электромагнитным M_c и реактивным (обусловленным явнополюсностью) M_p моментами:

$$M_c = \frac{E_q U_m}{X_d} \sin \delta; \quad (4.4)$$

$$M_p = \frac{U_m^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta. \quad (4.5)$$

При отрицательном возбуждении синхронный момент M_c (рис. 4.1, б) противодействует реактивному M_p и ухудшает устойчивость работы СК.

Наибольшая потребляемая реактивная мощность — $Q_{СК,гр}$ теоретически достигается в граничном режиме — при равенстве абсолют-

ного значения отрицательного синхронного момента — $M_{c,гр}$ наибольшему значению реактивного момента $M_{p,max}$ при внутреннем угле $\delta = \pi/4$; в граничном режиме СК выпадает из синхронизма.

Современные СК с бесщеточным реверсивным тиристорным возбуждением имеют две обмотки LG1 и LG2 ротора (рис. 4.2, а), питаемые от двух выпрямителей напряжений VS1 и VS2 обращенных (с трехфазной обмоткой переменного тока на роторе) вспомогательных синхронных генераторов GE1, GE2 с управляемым разнополюсным регулирующим воздействием регулятора $\pm U_{пер}(nT)$ тиристорными выпрямителями VST1, VST2 их возбуждением от трансформатора Т, подключенного к выводам СК (схема его реверсивного самовозбуждения). Такие СК удерживаются в режиме искусственной устойчивости при отрицательном возбуждении и угле $\delta \approx 0$ за счет формирования составляющей регулирующего воздействия по скорости изменения угла (его производной по времени). В целом регулирующее воздействие $\pm U_{пер}$ пропорционально отклонениям напряжения ΔU от номинального и угла $\Delta \delta$ от нулевого значений и их производным:

$$\pm U_{пер} = k_U \Delta U + k_\delta \Delta \delta + k'_U dU / dt + k'_\delta d\delta / dt. \quad (4.6)$$

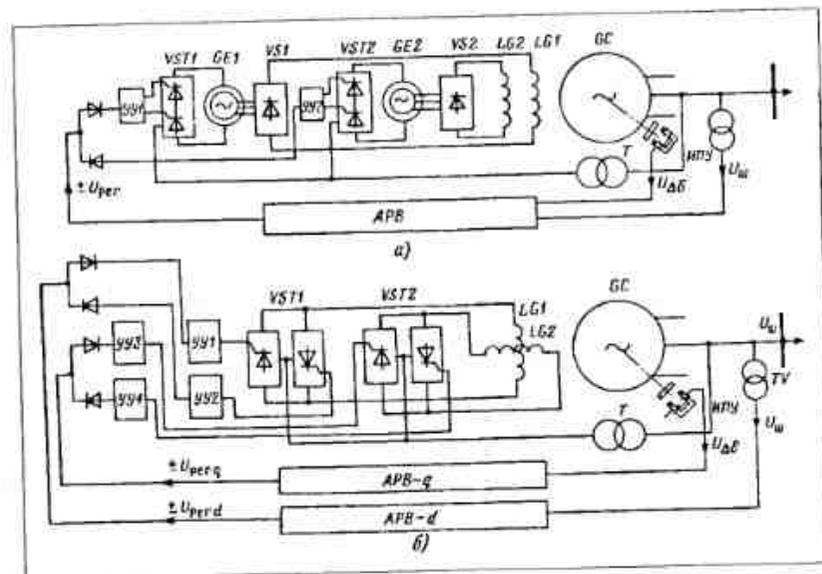


Рис. 4.2. Схема бесщеточного возбуждения (а) и возбуждения СК со второй поперечной обмоткой ротора (б)

Обмотки возбуждения СК при этом выполняют роль только удерживающих ротор в указанных положениях. Роль удерживания ротора в положении по продольной оси, т.е. при угле $\delta = 0$, и отрицательном возбуждении может выполнять вторая удерживающая обмотка возбуждения, расположенная по поперечной оси ротора.

Такие СК с двумя обмотками возбуждения — основной продольной *LG1* (рис. 4.2, б) и удерживающей поперечной *LG2* — могут загружаться любой, ограниченной лишь термической стойкостью обмоток статора, потребляемой реактивной мощностью при угле положения ротора $\delta \approx 0$.

Режим значительного потребления реактивной мощности возможен только при автоматическом знакопеременном регулировании тока возбуждения I_{mq} в поперечной обмотке *LG2*. Потребляемая реактивная мощность определяется током возбуждения I_{nd} в основной (продольной) *LG1* обмотке ротора.

Таким образом, автоматическое регулирование возбуждения СК со второй поперечной обмоткой ротора осуществляется двумя отдельными регуляторами, которые в отличие от двух каналов АРВ АСГ, не взаимодействуют между собой. Источниками токов возбуждения I_{nd} , I_{mq} синхронного компенсатора служат два реверсивных тиристорных возбуждателя, управляемых двумя указанными автоматическими регуляторами *АРВ-d* и *АРВ-q*.

Первый из указанных регуляторов *АРВ-d* имеет лишь одно назначение — поддержание напряжения $U_{ш}$ на шинах электростанции или подстанции путем изменения генерируемой или потребляемой реактивной мощности СК. Он представляет собой пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор, формирующий регулирующее воздействие по отклонению напряжения ΔU и его производной:

$$U_{\text{рег}d} = k_U \Delta U + k'_U dU / dt. \quad (4.7)$$

Задачей второго регулятора *АРВ-q* является удержание СК в режиме искусственной устойчивости при положении ротора по продольной оси, т.е. при $\delta = 0$. Поэтому регулирующее воздействие $U_{\text{рег}q}$ формируется ПД-регулятором, функционирующим по отклонениям угла $\Delta \delta$ от $\delta = 0$ и по его первой и второй производным:

$$U_{\text{рег}q} = k_\delta \Delta \delta + k'_\delta d\delta / dt + k''_\delta d^2\delta / dt^2. \quad (4.8)$$

4.2. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ

Возможность непрерывного управления мощностью реакторов и дискретного изменения мощности конденсаторных установок мощными тиристорными управляемыми устройствами и тиристорными выключателями соответственно обусловила разработку статических реверсивных управляемых компенсаторов реактивной мощности (СТК), предназначенных для подключения к шинам электрических станций и промежуточных узловых подстанций магистральных электропередач [15]. В связи с выявившимися особенностями коммутации секционированных конденсаторных установок оказалось целесообразным выполнять СТК состоящими из непрерывно управляемой реакторной части и постоянно включенной или только включаемой и отключаемой в целом конденсаторной установки. Поскольку непрерывно управляемые реакторные СТК в режимах малой загрузки потребляемой реактивной мощностью (при больших углах включения тиристоров $\pi/2 < \alpha < 2\pi/3$) генерируют гармонические составляющие напряжения и тока, пришлось их секционировать и осуществлять дискретно-непрерывное управление их мощностью, т.е. производить включение и отключение отдельных реакторов с непрерывно изменяемой мощностью каждого из них тиристорными преобразователями, работающими с малыми $\pi/6 < \alpha < \pi/2$ углами включения тиристоров. Поэтому определились два типа СТК: оба состоят из отдельных секций (модулей), но один с постоянно подключенной конденсаторной установкой, а второй с периодически коммутируемой.

Первый тип СТК является частично, а второй полностью реверсивным. Например, СТК одной из электропередач напряжением 1150 кВ состоит из 14 реакторных непрерывно управляемых модулей, потребляющих реактивную мощность до - 1100 Мвар, и конденсаторной установки мощностью + 300 Мвар [15]. Реверсивный СТК мощностью + 55 Мвар содержит непрерывно управляемую тиристорным преобразователем *STV* (рис. 4.3, а) реакторную часть *LR* и дискретно управляемую несекционированную, т.е. включаемую или отключаемую, конденсаторную установку *CB* напряжением 10 или 20 кВ.

Микропроцессорный автоматический регулятор реактивной мощности СТК входит в состав автоматической системы комплексного управления ими и защиты (САУЗ) [16]. Регулирующее воздействие автоматического регулятора $U_{\text{рег}}$ является функцией не только от-

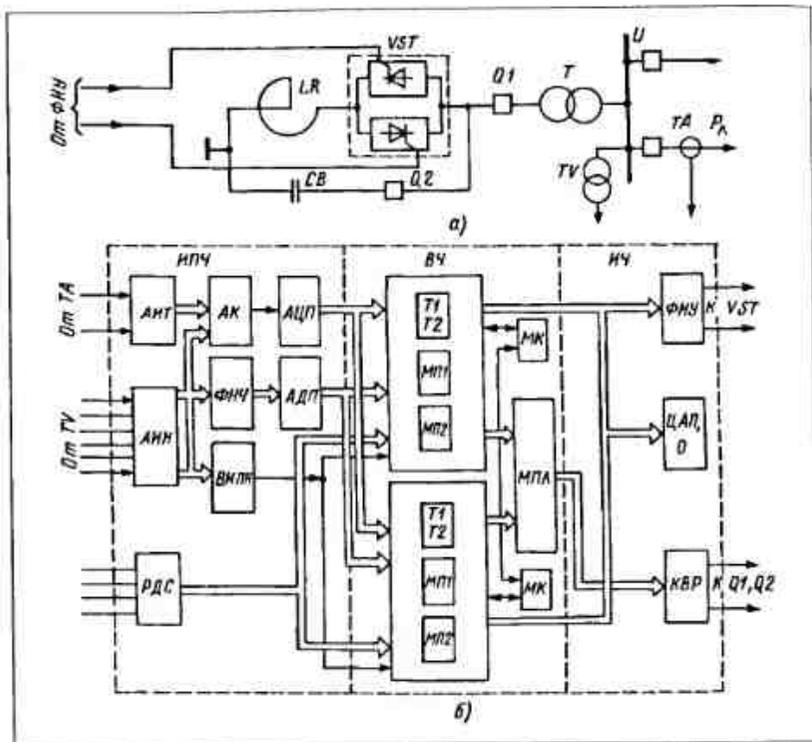


Рис. 4.3. Схема статического управляемого компенсатора (СТК) реактивной мощности (а) и структурная схема микропроцессорной системы комплексного управления и защиты СТК (б)

клонения напряжения ΔU , первой и второй его производных, но и изменений $\Delta' P_d$ (рис. 4.3, б) потоков мощности в магистральных линиях электропередачи, способствующих затуханию синхронных качаний генераторов электростанций:

$$U_{\text{рег}} = k_U \Delta U + k'_U dU / dt + k''_U d^2U / dt^2 + k_p \Delta' P_d, \quad (4.9)$$

где $\Delta' P_d$ — сигнал, формируемый реальным дифференциатором аналогично сигналу Δf по изменению частоты в АРВ-СД синхронного генератора [см. § 2.1].

Микропроцессорная автоматическая система комплексного управления и защиты (САУЗ) статическими компенсаторами выполнена

на базе микросредств управляющей вычислительной техники (МСУВТ) В7 [16]. Она производит автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности СТК и противоаварийное управление: защиту тиристорных преобразователей, ограничение перенапряжений, дискретное повышение предписанного напряжения (уставки) по сигналу противоаварийной автоматики.

Как обычно, для обеспечения надежности функционирования предусматриваются две взаиморезервируемые управляющие микроЭВМ, образующие вычислительную функциональную часть (рис. 4.3, б). Каждая из них содержит по два микропроцессора МП1, МП2.

Измерительно-преобразовательная ИПУ и исполнительная ИЧ функциональные части, образующие устройство связи с объектом (УСО), выполняют аналоговое измерительное преобразование входных сигналов — напряжений и токов промышленной частоты, формируют фазоимпульсное управляющее гальваническое разделение (развязку) их цепей и входов вычислительной части. При этом используются герконы — реле дискретных сигналов РДС и оптоэлектронные усилители в цепях аналоговых сигналов (на схеме не показаны).

Элементы аналогового измерительного преобразования токов АИТ и напряжений АИН содержат активные измерительные трансформаторы и трансформаторы [8] с унифицированными сигналами в виде переменных напряжений с ограниченной на уровне 5 В амплитудой. Они поступают через коммутатор аналоговых сигналов АК (аналоговый мультиплексор) в АЦП.

Поскольку напряжения на шинах подстанции и на линии при работе СТК, генерирующего гармоники, несинусоидальны, то перед аналого-дискретными преобразователями АЦП, формирующими импульсы управления микропроцессорами, установлены активные частотные фильтры нижних частот ФНЧ.

Для АЛП формируют короткие импульсы в моменты переходов через нулевые мгновенные значения трех фазных напряжений и одного из них, необходимые для цифровых измерительных преобразований вычислительной части.

В связи с указанной несинусоидальностью напряжений производится цифровое измерительное преобразование действующего значения напряжения в сигнал, что является оригинальной особенностью вычислительной части САУЗ. Программа такого преобразования предполагает вычисление сумм квадратов дискретных мгновенных значений фазных напряжений через интервалы време-

ни, равные одной четверти периода их изменений и извлечение квадратного корня. Цифровой сигнал информации о действующем напряжении формируется по среднему за период T_{II} промышленной частоты их значению. Прерывание вычислений производится соответствующими таймерами $T1, T2$ микроЭВМ.

В цепях напряжений предусмотрены и аналоговые выпрямительные измерительные преобразователи средних значений напряжений $ВППН$.

Оригинальной разработкой является и цифровой способ формирования управляющих воздействий — вычисление двоичного кода угла включения тиристоров СТК и его фазоимпульсное преобразование. Запуск программы фазоимпульсного преобразования происходит по прерываниям 12 раз в течение периода промышленной частоты по импульсным сигналам, формируемым третьим $АП$ при каждом переходе через нулевые мгновенные значения шестифазной системы переменных напряжений, получаемой от измерительных трансформаторов TV с разными группами соединений первичной и вторичной обмоток. На выходе второго микропроцессора $МП2$ по шести линиям передаются сигналы информации об углах включения тиристоров трехфазных прямого и обратного вентилей тиристорного преобразователя. Сигналы усиливаются и распределяются по тиристорам в формирователях импульсных токов управления $ФИУ$ — токов i_{thy} (см. рис. 2.5) базы тиристоров исполнительной части САУЗ. В формирователи поступают и сигналы установки диодного режима работы тиристоров.

Микропроцессор $МП2$ выполняет и функции защиты СТК от токов перегрузки и повреждений тиристорного преобразователя. В исполнительную часть входит и комплект герконов дискретных выходных сигналов $КВР$, поступающих от их мультиплексора $МПЛ$. Микропроцессорная САУЗ, естественно, обладает сервисными свойствами — модуль контроля $МК$ (рис. 4.3, б), подключаемый через $ЦАП$ осциллограф O демонстрирует операции автоматического управления. Широкий набор сервисных функций, реализуемых программно, обеспечивает удобство контроля и обслуживания САУЗ.

4.3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформаторы собственных нужд, трансформаторы (автотрансформаторы) связи шин трех напряжений электрических станций, как и трансформаторы понижающих подстанций распределительных сетей, имеют устройства регулирования напряжения пол-

нагрузкой (УРПН) путем переключений ответвлений от обмотки высшего напряжения со стороны нейтрали. Они управляются автоматическим регулятором коэффициента трансформации (АРКТ).

Разработаны и поставляются микропроцессорные АРКТ типов SPAU 341С (фирмы "АББ Реле-Чебоксары") и РНМ-1 (НТФ "Радиус-Автоматика") [20, 21].

Автоматический регулятор SPAU 341С (рис. 4.4) имеет модульное построение. Основным является модуль автоматического регулирования SPCU 1DSO. Он производит все вычислительные операции и формирует цифровые сигналы, преобразуемые выходным модулем в управляющие воздействия на УРПН. В соответствии с отклонением ΔU от установленного (предписанного) напряжения, определяемого с учетом рассчитываемого в реальном времени напряжения компенсации, при выходе изменяющегося напряжения за пределы зоны нечувствительности $\Delta U > \Delta U_{нч}$ модуль регулирования запускает программу вычисления первой выдержки времени, зависящей от $\Delta U/\Delta U_{нч} = B$ в соответствии с соотношением

$$t_{per1} = T_{max}/2^{B-1} \quad (4.10)$$

при фиксированном $T_{max} \approx 25$ с.

Если отключение напряжения уменьшается до $\Delta U < 0,75\Delta U_{нч}$, отсчет времени прекращается и регулятор на УРПН не действует.

После окончания первой выдержки времени, тем меньшей, чем согласно (4.10) больше отклонение напряжения, производится переключение одного ответвления обмотки трансформатора. В случае, если одного переключения недостаточно для вхождения напряжения в зону нечувствительности, запускается отсчет второй выдержки времени $t_{per2} < t_{per1}$ и, при необходимости, производится переключение второго ответвления.

Автоматический регулятор как интеллектуальное микропроцессорное устройство обладает функциональными особенностями и отличается информационным общением с оператором непосредственно или через ПЭВМ и с более высоким иерархическим уровнем автоматического управления.

Как указывалось, он вычисляет напряжение на своем входе — напряжение регулятора U_p по предписанному напряжению $U_{нр}$ (уставке), пропорциональному напряжению, которое должно поддерживаться на шинах ПС, вычисляемому падению напряжения ΔU в линиях, питающих потребителей электроэнергии, и по выдаваемому снижению $\Delta U_{нр}$ уставки в режиме минимальной нагрузки трансформатора. При этом учитывается и реактивный ток $I_{рл}$, циркули-

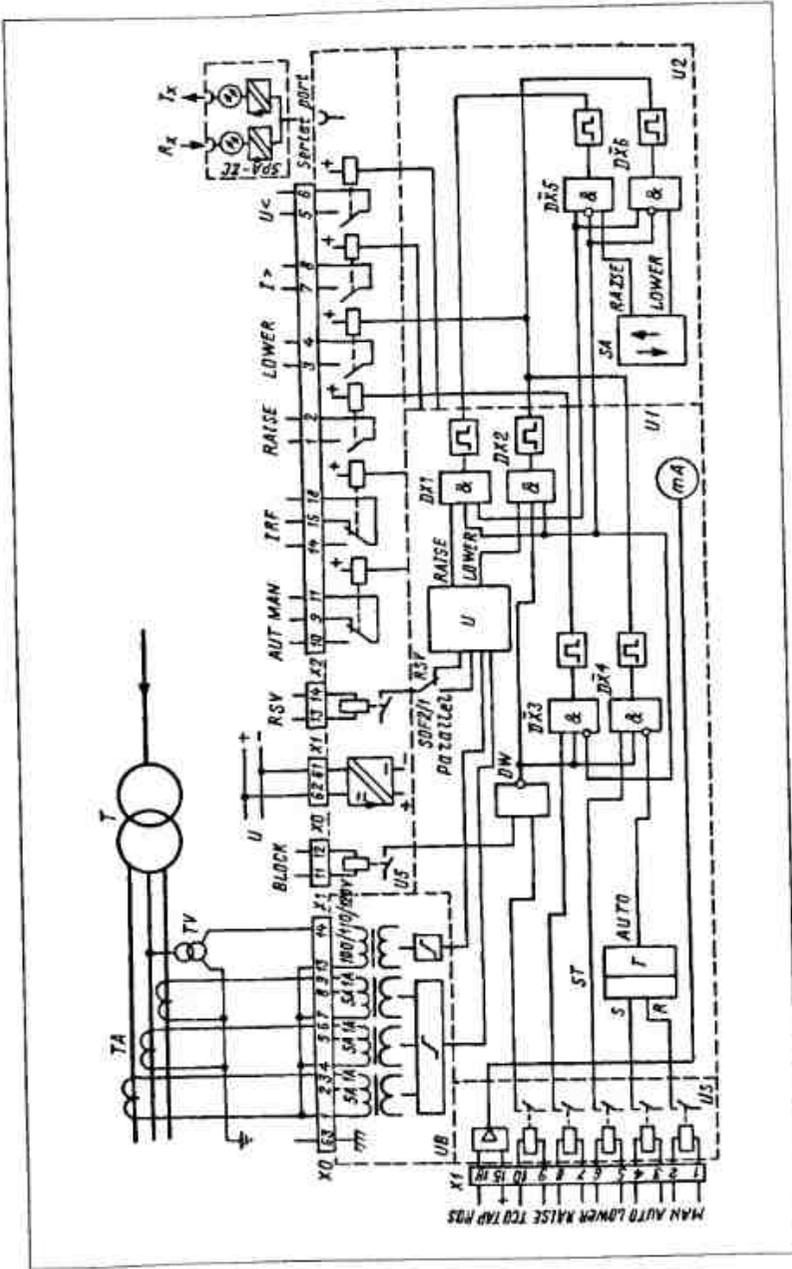


Рис. 4.4. Схема микропроцессорного регулятора типа SPAU 341C

рующей между параллельно работающими трансформаторами, в том числе различной мощности. В относительных единицах

$$U_{*p} = U_{*up} + \Delta U_{*z} \pm I_{*p.u} - \Delta U_{*up} \quad (4.11)$$

Активная ΔU_R и реактивная ΔU_X составляющие падения напряжения ΔU в линиях вычисляются по известным их сопротивлениям и токам. Возможно определение ΔU_z и с использованием телеинформации о напряжениях на зажимах приемников электроэнергии.

Для вычисления относительного тока циркуляции $I_{p.u}/I_{ном}$ автоматический регулятор каждого из параллельно работающих трансформаторов передает (по волоконно-оптической связи) информацию о векторе тока другим регуляторам (предусмотрена возможность индивидуального автоматического управления УРПН трех трансформаторов). Каждый вычисляет общий ток нагрузки трансформаторов и сравнивает его по амплитуде и фазе с током данного трансформатора. В результате составляющая $I_{p.u}$ в (4.11) корректирует управляющие воздействия каждого из регуляторов, обеспечивающие минимизацию балластного тока циркуляции, и пропорциональную номинальной мощности трансформатора его загрузку.

Предписанное напряжение U_{up} и степень его снижения ΔU_{up} изменяются оператором дистанционно.

Предусматривается запрет (блокировка) действия регулятора на УРПН по максимальному и минимальному напряжению трансформатора, выполняемый микропроцессором.

Расположенные на передней панели модуля автоматического регулирования дисплей и светодиодное табло отображают обширную информацию о настройке и режиме работы автоматического регулятора.

Высвечиваются значения напряжения и тока нагрузки трансформатора, предписанное напряжение $U_{up} = U_s$ и его снижение $\Delta U_{up} = \Delta U_{sv}$, составляющие ΔU_R и ΔU_X падения напряжения ΔU_z , зона нечувствительности $\Delta U_{up1} = \Delta U_s$, вычисляемые выдержки времени $t_{per1} = T_1$ и $t_{per2} = T_2$; светодиодами фиксируются срабатывание измерительной части на повышение (RAISE) или снижение (LOWER) напряжения, действие блокировки по току (I_s) или напряжению (U_c), действие (OUT) УРПН с индикацией по миллиамперметру его положения; автоматическое управление параллельно работающими трансформаторами (PARALLEL); функционирование (IRF) автоматической самодиагностики; отключение модуля автоматического (AUTO) регулирования при переходе на ручное управление УРПН оператором (MAN). На передней панели расположены и кнопки

управления программированием, дистанем, переключениями на параллельную работу или на ручное управление УРПН.

Указанные в скобках обозначения приведены на функциональной схеме автоматического регулятора SPAU 341С (см. рис. 4.4). На ней показаны описанный модуль *U1* автоматического регулирования с микропроцессором *U* и логическими элементами и модуль *U2* ручного управления; конструктивно выделенные блок *U6* (в фирменном обозначении) вторичных измерительных трансформаторов тока и напряжения с *U* элементами гальванической развязки и блок питания с входными зажимами *XO*; блоки входных герконов *U5* с зажимами *X1* их обмоток и выходных герконов со сборкой зажимов *X2* от их контактов; показан вход под миллиамперметр резистивного датчика; положение УРПН (*TAP POS*) и оптоэлектрический преобразователь (*SPA-ZS*) с разъемом волоконно-оптической линии передачи информации.

Герконы *TCO* фиксируют процесс переключения УРПН, в течение которого действие регулятора запрещается, а *BLOCK* выводит его из работы по внешнему запрещающему сигналу: при замыкании контакта одного из них на выходе элемента *DW* (ИЛИ) появляется логический ноль, поступающий на один из трех входов элементов *DX* (И) и запрещающий формирование их единичных выходных сигналов, определяющих управляющие воздействия *RAISE* (поднять) и *LOWER* (снизить) напряжение. Их формирование происходит под воздействием единичных логических сигналов микропроцессора *U* при возбуждающемся герконе *AUTO* (автоматическое управление): логическая единица, зафиксированная элементом ее запоминания (триггером *ST*), поступает на соответствующие входы элементов *DX1*, *DX2*. Эта же единица на инверсных входах *DX3*–*DX6* запрещает формирование воздействий *RAISE* или *LOWER* модулем *U2* ручного управления или внешними сигналами, т.е. дистанционно (ключ *SA* и входные герконы).

При возбуждении геркона *MAN* на выходе *ST* — логический ноль, запрещающий прохождение единичных логических сигналов через *DX1*, *DX2* и разрешающий формирование управляющих воздействий элементами *DX3*, *DX4* при ручном дистанционном (входные герконы) или местном (ключ *SA*) управлении.

Микропроцессорный автоматический регулятор типа РНМ-1 состоит из пяти модулей [21]: вторичных измерительных трансформаторов напряжения, двух секций шин низшего (регулируемого) напряжения подстанции, модуля (блока) источника питания, модуля ввода-вывода, модулей микропроцессора, клавиатуры и индикации. Он имеет несколько вариантов исполнения, различающихся напря-

жением питания (220 и 110 В), номинальным входным переменным током ($I_{ном} = 5$ А или $I_{ном} = 1$ А) и типом последовательного интерфейса связи (RS 232С или так называемая “токовая петля”).

Автоматический регулятор выполняет главную задачу — поддержание напряжения на секциях шин подстанции с учетом напряжения компенсации падения напряжения в линиях, а также обеспечивает:

формирование импульсного или непрерывного потенциального управляющего воздействия на электропривод УРПН;

контроль исправности электропривода;

запрет действия и выдачу информации о неисправности УРПН;

запрет автоматического регулирования внешними дискретными сигналами;

запрет действия при появлении перегрузки по току трансформатора или сплошном снижении напряжения;

оперативное изменение предписанного напряжения (уставки регулятора);

переключение на ручное управление напряжением подстанции.

Программным измерительным органом регулятора производится сравнение истинных значений напряжения и тока нагрузки трансформатора предписанными и максимально допустимыми значениями соответственно. Проверяется и напряжение $3U_0$ нулевой последовательности при незаземленной нейтрали напряжения.

Проверяется условие

$$U_{рег} - \Delta U/2 < U < U_{рег} + \Delta U_{нч}/2, \quad (4.12)$$

где $U_{рег}$ — напряжение на входе регулятора, определяемое, как указывалось, с учетом напряжения компенсации

$$U_{рег} = U_{тр} + U_k = U_{тр} + U_{к,р}(I_T - I_C)/I_{ном}, \quad (4.13)$$

где $U_{тр}$ — предписанное напряжение на шинах подстанции; $U_{к,р}$ — расчетное напряжение компенсации, вычисляемое в реальном времени; I_T , I_C — ток нагрузки трансформатора и регулируемой секции.

При выполнении условия (4.12) на индикаторе высвечиваются истинное напряжение и номер рабочего ответвления обмотки высшего напряжения со стороны нейтрали.

Измерительный орган выдает сигнал на формирование управляющих воздействий на УРПН при нарушении условия (4.12).

При импульсном управляющем воздействии регулятор контролирует реакцию электропривода УРПН на регулирующее воздейст-

вие: если через определенное время сигнал о запуске привода в регулятор не поступает, то автоматическое регулирование запрещается, на индикаторе высвечивается сигнал об отказе приводного механизма "Отказ ПМ" или "ПМ застрял".

Если уставки (4.12) после переключения одного ответвления через время T_1 не выполняются, то запускается подсчет времени T_2 формирования управляющего воздействия на переключение следующего ответвления.

При обнаружении перенапряжения на шинах секции на дисплее выводится соответствующее сообщение и начинается набор выдержки времени T_3 запуска программы на снижение напряжения: переключения продолжают до тех пор, пока напряжение на шинах не вернется в зону нечувствительности [см. условие (4.12)].

Если действующее значение напряжения сильно снижается — становится меньше U_{min} , то через время $T_4 = 10$ с автоматическое регулирование прекращается.

Если ток нагрузки трансформатора I_1 или напряжение $3U_0$ максимально допустимо, значит автоматическое регулирование запрещается.

Автоматическое регулирование прекращается и при превышении температурой масла допустимого значения.

Автоматический регулятор РНМ-1 может находиться в пяти режимах его работы:

ВВОД УСТАВОК; РАБОТА — автоматическое регулирование; **КОНТРОЛЬ; РЕГУЛИРОВАНИЕ** и **АРХИВ СОБЫТИЙ**.

После включения в один из указанных (кроме второго) режимов регулятор через определенное время возвращается в рабочее состояние, т.е. автоматическое регулирование возобновляется.

Особенностью автоматического регулятора РНМ-1 является очень развитое диалоговое общение с ним оператора.

Модуль клавиатуры и индикации позволяет установить и просмотреть значения всех характерных величин, увидеть состояние переключаемых ответвлений обмоток, состояние электропривода УРПН, проверить воздействие регулятора на УРПН и в режиме АРХИВ СОБЫТИЙ просмотреть содержание регистратора событий.

Список литературы

1. История электротехники / Под ред. И. А. Глебова. — М.: Изд-во МЭИ, 1999.
2. Дьяков А. Ф., Овчаренко Н. И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. — М.: Изд-во МЭИ, 2000.
3. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем: Учебник для вузов. — М.: НЦ ЭНАС, 2000.
4. Овчаренко Н. И. Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики. — М.: НТФ Энергопрогресс, 2001. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик". Вып. 9 (33)].
5. Бушмарина Е. А., Фадеев А. В., Шерemet А. А. Микропроцессорный автоматический синхронизатор // Электротехника. 1996. № 9. С. 30 — 34.
6. Аганичев Е. С., Лукоянов В. Ю., Панфилов Н. И. Автоматический микропроцессорный синхронизатор "Спринт" // Электрические станции. 1999. № 8. С. 48 — 51.
7. Романок Ф. А., Бобко Н. Н., Товоненко А. А. Цифровой автоматический синхронизатор // Энергетика (Изв. вузов и энергетических объединений СНГ). 1997. № 5 — 6. С. 40 — 45.
8. Микропроцессорный унифицированный автоматический регулятор возбуждения сильного действия АРВ-СДМ / Б. И. Аккерман, Е. А. Бушмарина, В. В. Долгов и др. // Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах: Тр. ВЭИ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 3 — 12.
9. Логинов А. Г., Фадеев А. В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения (АО "Электросила") // Электротехника. 2001. № 9. С. 66 — 70.
10. Кичаев В. В., Юрганов А. А. Современное состояние проблемы регулирования возбуждения синхронных машин. // Международная научно-техническая конференция "Современные системы возбуждения для нового строительства и реконструкции электрических станций. Опыт наладки и эксплуатации систем воз-

- буждения нового поколения": Сб. докл. Санкт-Петербург, 2004. С. 11 – 22.
11. Ларионова В. В. Системы регулирования в энергетике — подходы и решения // Автоматизация в промышленности. 2004. № 4. С. 15 – 19.
 12. Система управления мощностью турбоагрегата на базе микро-ЭВМ / Ю. Л. Горячева, Н. В. Колобродов, В. С. Мельников и др. // Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах: Тр. ВЭИ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 13 – 20.
 13. Унифицированное микропроцессорное устройство управления мощностью крупных турбогенераторов / В. С. Мельников, Ю. В. Чугуников, Э. М. Прокопьев и др. // Электротехника. 1996. № 9. С. 15 – 17.
 14. Опыт внедрения вычислительных средств нового поколения в устройствах управления мощностью турбоагрегата типа ЭЧСР-М / В. С. Мельников, А. Г. Мордкович, А. З. Серебряков и др. // Электротехника. 2001. № 9. С. 56 – 58.
 15. Кочкин В. Н., Обязуев А. И., Фокин В. К. Статические тиристорные компенсаторы для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1993. № 11. С. 20 – 24.
 16. Микропроцессорная система автоматического управления и защиты статического тиристорного компенсатора для линий электропередачи / Г. М. Бурунова, Е. А. Бушмарина, М. А. Лотков и др. // Автоматическое управление электроэнергетическими системами: Тр. ВЭИ. — М.: Информэлектро, 1988. С. 28 – 34.
 17. Богаченко Д. Д. Об алгоритме функционирования автоматического регулятора напряжения и реактивной мощности синхронных генераторов с бесщеточным возбуждением // Вестник МЭИ. 2003. № 6. С. 128 – 130.
 18. Автоматический регулятор возбуждения для асинхронизированных турбогенераторов / И. А. Лабунец, А. П. Лохматов, В. А. Марков и др. // Электрические станции. 1985. № 7. С. 46 – 51.
 19. Микропроцессорная система управления возбуждением асинхронизированного турбогенератора типа СУВМ-АС. // Автоматическое управление электроэнергетическими системами: Тр. ВЭИ. — М.: ВЭИ, 1992. С. 62 – 73.
 20. Овчаренко Н. И. Микропроцессорные комплексы релейной защиты и автоматики распределительных электрических сетей. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 1999. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик". Вып. 7 (10)].
 21. Регулятор напряжения трансформатора микропроцессорный РНМ-1: Техническое описание, руководство по эксплуатации, паспорт. — М.: НТФ "Радиус-Автоматика".

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Микропроцессорные автоматические синхронизаторы генераторов	
1.1. Условия включения синхронного генератора на параллельную работу	5
1.2. Принципы действия автоматических синхронизаторов	8
1.3. Микропроцессорные автоматические синхронизаторы	16
1.4. Микропроцессорный автоматический синхронизатор "Спринт"	17
1.5. Микропроцессорный автоматический синхронизатор АС-М	21
ГЛАВА ВТОРАЯ. Микропроцессорные автоматические регуляторы возбуждения синхронных генераторов	
2.1. Виды регуляторов	28
2.2. Современное возбуждение, алгоритм и функциональная схема автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности синхронного генератора	28
2.3. Аналого-цифровой автоматический регулятор бесщеточного возбуждения	34
2.4. Микропроцессорные автоматические регуляторы тиристорного возбуждения	39
2.5. Микропроцессорный автоматический регулятор АРВ-СДМ	41
2.6. Микропроцессорный автоматический регулятор тиристорного возбуждения синхронных генераторов типа АРВ-М	44
2.7. Микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения "КОСУР"	55
2.8. Микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения асинхронизированных генераторов	56
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Микропроцессорные автоматические регуляторы частоты вращения и активной мощности генераторов	
3.1. Виды регуляторов	62
3.2. Электродвигательный преобразователь	62
3.3. Микропроцессорный электродвигательный регулятор частоты и активной мощности ЭГР-МП	64
3.4. Микропроцессорная автоматическая система регулирования частоты и мощности турбогенераторов	68
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Микропроцессорные автоматические регуляторы напряжения и реактивной мощности синхронных и статических компенсаторов и трансформаторов	
4.1. Автоматические регуляторы синхронных компенсаторов	79
4.2. Микропроцессорный автоматический регулятор реактивной мощности статических компенсаторов	83
4.3. Микропроцессорные автоматические регуляторы трансформаторов	86
Список литературы	93

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

ОВЧАРЕНКО НИКОЛАЙ ИЛЬИЧ

**Микропроцессорная автоматика синхронных генераторов
и конденсаторов**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23

Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Сдано в набор 22.09.2004 г. Подписано в печать 29.10.2004 г.

Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 6,0. Заказ БЭТ/10(70)-2004

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал "Энергетика за рубежом"

— приложение к журналу "Энергетик"

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу "Энергетик" — **"Энергетика за рубежом"**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал "Энергетика за рубежом" знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **"ПРЕССА РОССИИ"**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы журнала "Энергетика за рубежом"

— приложения к журналу "Энергетик"

87261 — для предприятий и организаций;

87260 — для индивидуальных подписчиков.

Об авторе



Николай Ильич Овчаренко —
доктор технических наук,
профессор кафедры
“Релейная защита
и автоматизация энергосистем”
Московского энергетического
института (технического
университета).

Н. И. Овчаренко — автор ряда научно-технических монографий, учебных пособий и учебников по теории и технике автоматике и релейной защите электрических станций, сетей и систем. Наиболее крупные из них: монография “Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем” (1989 г.) и учебники для вузов “Элементы автоматических устройств энергосистем” (1995 г.), “Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем” (2000 г.).

Микропроцессорная автоматика — технические
информационные средства автоматического
(вместо нынешнего автоматизированного)
управления процессом производства, передачи
и распределения электроэнергии