

## Лекция 9

1. Системы регулирования трансмиссий переменного тока.
2. Структурная схема силовой цепи.
3. Передачи переменного-переменного тока.
4. Передачи переменного-постоянного тока

1

Трансмиссии постоянного тока являются наиболее простыми, так как двигатели питаются непосредственно от генератора без промежуточных силовых преобразователей и любые характеристики трансмиссии получаются регулированием магнитных потоков генератора и двигателей по цепям возбуждения, мощность которых не превышает 1...2,5% от номинальной мощности тяговых машин.

Основным способом регулирования скорости транспортных средств с асинхронными двигателями является изменение частоты тока, питающего двигатели независимо от частоты тока генератора, приводимого ДВС. Для этого используют тиристорные преобразователи, в которых частоту выходного тока можно изменять независимо от входной.

В качестве примера на рис. 9.1 приведена обобщённая схема привода теплоэлектрического подвижного

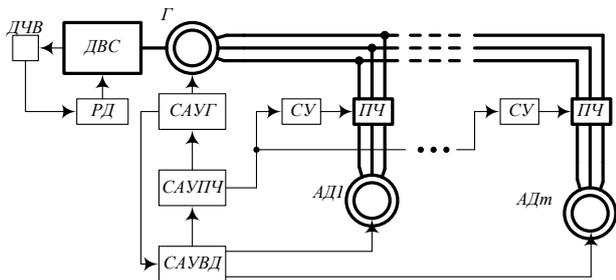


Рис. 9.1

состава с асинхронными двигателями (АД) и преобразователями частоты ПЧ. ДВС приводит во вращение вал тягового генератора Г, в качестве которого может использоваться как машина постоянного, так и переменного тока. В силу низкой надёжности коллекторно-щёточного узла первых их применение неперспективно, поэтому далее рассматриваем только синхронные генераторы.

Трёхфазное напряжение от генератора подводится к ПЧ, который может быть выполнен по схеме со звеном постоянного тока (ПЧПТ) или с непосредственной связью выходной и входной цепей (НПЧ).

В ПЧПТ трёхфазное напряжение генератора преобразуется выпрямителем в постоянное, подаваемое на вход инвертора, где преобразуется в трёхфазное переменного частоты. Нагрузкой инверторов являются тяговые АД.

В НПЧ одни и те же тиристоры поочередно работают в выпрямительном и инверторном режимах. Управление тиристорами осуществляется как по частоте входного тока (генератора), так и по выходной частоте, которая задаётся системой управления.

При АД возможны три варианта исполнения ПЧ:

- один преобразователь на общую нагрузку;
- несколько параллельно работающих преобразователей на общую нагрузку;
- индивидуальная нагрузка преобразователей.

Приведённый на рис. 9.1 вариант привода относится к первой разновидности.

Каждый ПЧ имеет свою систему управления СУ, подающую в определённой последовательности отпирающие импульсы на соответствующие тиристоры преобразователя. Для управления СУ используется САУПЧ, а в случае применения синхронных двигателей необходимо предусмотреть и систему управления возбуждением САУВД. Для управления тяговым генератором используется система управления САУГ, а для управления тепловым двигателем – СУТД, на которую поступает сигнал от датчика частоты вращения (ДЧВ) вала ДВС.

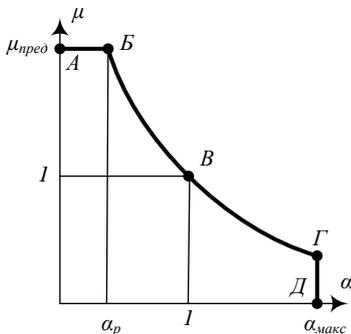


Рис. 9.2

Все системы могут работать самостоятельно, однако целесообразным следует считать связанное управление.

2

Из теории асинхронных двигателей (АД) известно, что при частотном управлении их характеристики определяются тремя переменными: частотой напряжения питания  $f_1$  или относительным параметром  $\alpha = f_1 / f_{1n}$ , напряжением питания  $U_1$  или относительным параметром  $\gamma = U_1 / U_{1n}$ , частотой скольжения  $f_s$  (частотой ротора  $f_2$ ) или параметром абсолютного скольжения  $\beta = f_s / f_{1n} = \alpha s$ , который можно рассматривать как промежуточный параметр нагрузки. Под статическими характеристиками частотного регулирования будем понимать зависимости параметров АД от частоты  $\alpha$  в заданном диапазоне изменения частот и нагрузок, обеспечивающие требуемые тяговые характеристики автономного транспортного средства.

Статическая характеристика  $\gamma(\alpha)$ , определяемая как закон частотного управления, в данном представлении является одной из основных характеристик регулирования АД.

Другой важной характеристикой регулирования является зависимость  $\mu(\alpha) = [M/M_n](\alpha)$ . Её вид определяется тяговой характеристикой  $F(v)$  автономного транспортного средства. Характеристика  $\mu(\alpha)$  содержит

три участка (см. рис. 9.2): постоянства пускового момента  $\mu = \mu_{пред}$  (линия АБ), постоянства мощности (кривая Б-В-Г); ограничения частоты  $\alpha = \alpha_{макс}$  (линия Г-Д).

Для формирования характеристики  $\mu(\alpha)$  с учётом поддержания на заданном уровне значений КПД, коэффициента статической перегрузки и коэффициента мощности необходимо одновременное регулирование параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и др., связанных между собой сложными функциональными зависимостями.

На рис. 9.3 приведена упрощенная структурная схема силовой цепи трансмиссии переменного тока.

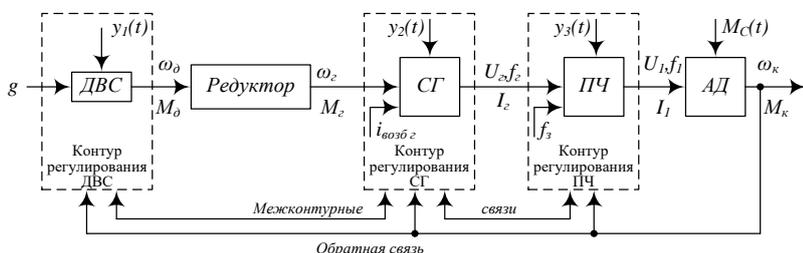


Рис. 9.3

Входными параметрами для синхронного генератора СГ являются угловая частота генератора  $\omega_2$  и ток возбуждения  $i_{возб}$ , регулируемым параметром – напряжение генератора  $U_2$  (или  $\gamma_2$ ).

Входными параметрами преобразователя частоты ПЧ являются напряжение  $\gamma_2$  и частота следования импульсов управления  $f_3$ , регулируемым

параметром – частота  $\alpha$  питающего АД напряжения  $\gamma$ .

Полная механическая мощность на валу АД определяется соотношением

$$P = P_2 + P_{мех} \equiv M\omega.$$

Полезная мощность, реализуемая генератором

$$P_2 \equiv M_2\omega = \eta P_1,$$

а приведённая

$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2н}} = \frac{\eta}{\eta_n} P_{1*}.$$

(9.1)

Момент на валу генератора

$$M_2 = M \frac{P_2}{P_2 + P_{мех}} = M\eta_2,$$

или в относительных единицах

$$\mu_2 = \mu \eta_2 / \eta_{2н},$$

(9.2)

где  $\eta_2$  – КПД, учитывающий только механические потери АД.

Угловая скорость ротора АД в относительных единицах с учётом выражений (9.1) и (9.2) определяется как

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{P_{2*}}{\mu_2} = \frac{\eta P_{1*}}{\eta_n \mu_2} = \frac{\gamma I_{1*} (\cos \varphi)_* \eta \eta_{2н}}{\mu \eta_n \eta_2}.$$

С учётом того, что электромагнитный момент, выраженный в относительных единицах, равен  $\mu = \frac{\gamma^2 \beta}{\alpha^2 \beta_n}$ ,

расчётная формула для определения относительной угловой скорости преобразуется к виду

$$\omega_* = \frac{\alpha^2 \beta_n I_{1*} (\cos \varphi)_* \eta \eta_{2н}}{\gamma \beta \eta_n \eta_2}. \quad (9.3)$$

Из последнего соотношения видно, что входными параметрами при регулировании АД являются  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , а регулируемые – момент  $\mu$  (угловая скорость  $\omega_*$ ). Основное внешнее возмущающее воздействие, действующее на АД, является моментом сопротивления вращению, который определяет возмущающие воздействия на остальные агрегаты силовой цепи трансмиссии.

3

При движении машины по пути с переменным сопротивлением в общем случае изменяются одновременно частота тока, напряжение, подводимое к асинхронным двигателям, магнитный поток и сила тока в их обмотках. Водитель, управляя педалью, задает мощность теплового двигателя. При заданном положении педали величины, характеризующие режимы работы двигателей, должны изменяться автоматически. В приводе с двигателем АД и преобразователем ПЧПТ имеются два регулируемых параметра: сила тока возбуждения генератора частота тока на выходе инвертора. Соответственно этому помимо регулятора теплового двигателя в приводе предусматривается и система автоматического управления генератором (САУГ) и система управления преобразователем (САУПЧ). Эти системы выполняют следующие функции: 1) поддержание постоянной мощности теплового двигателя; 2) ограничение силы тока и напряжения генератора и преобразователя; 3) если тепловой двигатель работает с переменной скоростью, программное управление моментом сопротивления генератора в зависимости от частоты вращения по линии наибольшей экономичности; 4) управление режимом асинхронных двигателей по определенной программе, обеспечивающей работу их с наибольшим к. п. д.

Распределение этих функций между САУГ и САУПЧ может быть различным. Первые три функции могут

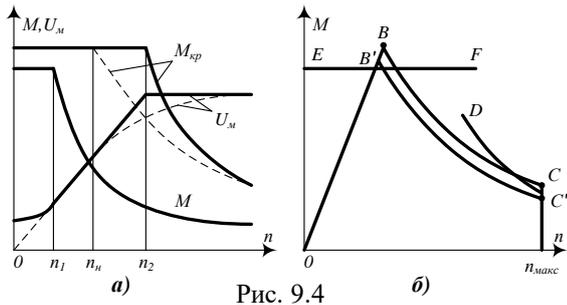


Рис. 9.4

выполняться так же, как и в приводе постоянного и переменного тока системой управления генератора САУГ. В этом случае САУПЧ управляет режимом работы асинхронных двигателей. Возможно также выполнение первых трех функций в САУПЧ, тогда САУГ обеспечивает управление напряжением в зависимости от частоты по одной из программ (см. рис. 9.4). Управление режимом двигателя АД в АУПЧ может быть также различным. На рис. 9.5 приведена функциональная схема системы САУПЧ с программным управлением абсолютным скольжением. Характер зависимости абсолютного скольжения от частоты тока (рис. 9.5б) определяется характером изменения мощности и напряжения (например, для по указанной на рис. 9.4а зависимости (сплошные линии) момента  $M$  и напряжения  $U_M$  от частоты вращения абсолютное скольжение сохраняется постоянным при неизменном моменте, когда напряжение увеличивается пропорционально частоте. При таком же изменении напряжения, но при постоянной мощности момент и абсолютное скольжение уменьшаются. При сохранении постоянных величин мощности и напряжения абсолютное скольжение вновь увеличивается с ростом частоты тока.

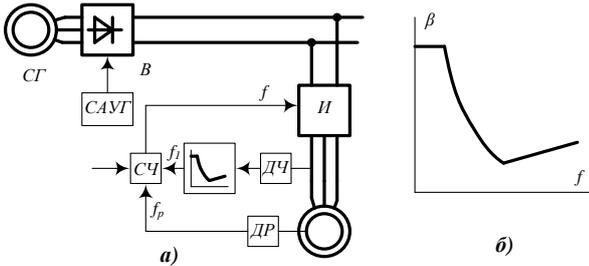


Рис. 9.5

В схеме САУГ с ПЧПТ, показанной на рис. 9.5, частотным датчиком ДР измеряется частота вращения ротора, пропорциональная скорости движения. Сигнал частоты вращения ротора подается к сумматору частоты СЧ. На него же от функционального преобразователя скольжения ФПС подается сигнал, формируемый по определенной для каждого типа двигателя зависимости  $\beta(f)$ . Выходной сигнал сумматора, пропорциональный сумме частоты вращения ротора и абсолютного скольжения, т. е. требуемой частоты тока инвертора И, подается на вход системы управления преобразователем частоты. Ввиду малой величины абсолютного скольжения по сравнению с частотой тока измерение частоты вращения ротора должно быть очень точным. Измерение по напряжению тахогенератора такой точности не обеспечивает. Поэтому применяют импульсные датчики и частоту измеряют цифровыми устройствами по количеству импульсов. Преимуществом такой схемы является то, что частота каждого двигателя задается в зависимости от частоты вращения его ротора, и разность нагрузок отдельных двигателей не зависит от радиуса качения колеса, разности скоростей при повороте машины и т. д., а определяется только точностью измерения частоты вращения ротора и точностью задания скольжения. Недостатком является относительная сложность схемы, а так же необходимость иметь датчик на каждом двигателе. При такой схеме задающий генератор в системе САУПЧ не обязателен, так как требуемая для нее частота может быть получена от сумматора. При изменении мощности теплового двигателя для оптимального режима асинхронного двигателя может потребоваться изменение скольжения. В этом случае программа ФПС может изменяться посредством управляющего сигнала УС.

Более простой является схема (рис. 9.6), в которой частота тока задается в зависимости от напряжения,

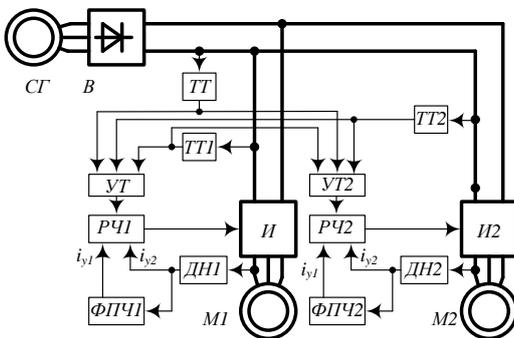


Рис. 9.6

подводимого двигателю. Характер зависимости  $U_M(f)$  определяется функциональным преобразователем ФПЧ, на вход которого подается от датчика ДП напряжение переменного тока. Выходной сигнал преобразователя ФПЧ поступает в регулятор частоты РЧ и от последнего – к задающему генератору в систему управления преобразователем частоты.

Для поддержания постоянного момента и магнитного потока двигателя при малых скоростях (см. рис. 9.4) в качестве функционального преобразователя может быть использован дроссель, активное сопротивление которого мало по сравнению с индуктивным. В этом случае сила тока на выходе дросселя

$$i_1 = \frac{U}{\sqrt{(2\pi f L)^2 + R^2}} \approx \frac{U}{2\pi f L},$$

где  $U$  — напряжение на выходе инвертора;  $R$  — суммарное активное электрическое сопротивление цепи дросселя;  $L$  — величина индуктивности дросселя.

При постоянной индуктивности дросселя величина выходного тока, который используется в качестве управляющего сигнала, приблизительно пропорциональна магнитному потоку. В регуляторе РЧ (см. рис. 9.6) этот сигнал сравнивается с задающим сигналом, и по отклонению регулирующего сигнала от задающего формируется выходной сигнал (поступающий на задающий генератор САУПЧ) такого направления, при котором изменение

частоты тока приводит к устранению отклонения. Таким образом, изменением частоты тока поддерживается постоянным управляющий сигнал, т. е. заданное отношение напряжения к частоте или приблизительно постоянный магнитный поток. Влияние активного сопротивления заключается в том, что при частоте  $f=0$  для поддержания заданной величины тока  $i_l$  требуется некоторое напряжение  $U_0$ , что полезно для компенсации активного падения напряжения в двигателях при малых частотах и более точного поддержания магнитного потока.

Для поддержания постоянного напряжения в области высоких частот функциональный преобразователь должен подавать управляющий сигнал, пропорциональный напряжению. На вход РЧ подаются управляющие сигналы  $i_{y1}$  и  $i_{y2}$ , пропорциональные магнитному потоку и напряжению соответственно. При одновременном действии обоих сигналов реализуется промежуточная программа управления  $U_m(f)$ , близкая к  $i_m = U_m / \sqrt{f}$ . Меняя управляющие сигналы, можно изменять программу  $U_m(f)$ .

Если ко всем инверторам подводится одинаковое напряжение, что имеет место при неуправляемых выпрямителях, то задающий сигнал является общим для всех инверторов, и они работают с одинаковой выходной частотой тока. Это может привести к не равномерному распределению нагрузки. Выравнивание нагрузки возможно при индивидуальных управляемых выпрямителях, напряжение каждого из которых должно изменяться в зависимости от нагрузки или частоты вращения роторов. Однако это сильно усложняет систему управления. Более просто можно выровнять нагрузки, добавив узел выравнивания в системе САУПЧ. для этого предусматриваются датчики тока ТТ1, ТТ2 каждого асинхронного двигателя и датчик общего тока ТТ, сигналы которых поступают в узел сравнения токов УТ.

Разность между средней (или максимальной) силой тока и силой тока данного двигателя поступает в САУ этого двигателя и изменяет выходной сигнал, т. е. частоту тока соответствующего двигателя, так, что устраняется отклонение нагрузки. Если требуется изменение программы (при изменении мощности теплового двигателя), задающий сигнал изменяется в зависимости от положения органа управления (педали) или от датчика скорости дизеля ДЧВ (см. рис. 9.1).

При использовании обоих вариантов САУПЧ для автоматического управления генератором можно применять те же системы управления, что и для привода постоянного тока, в частности схему с импульсным множительным устройством или схему с селективным узлом.

**Электрическое торможение.** При схеме тягового привода ПЧПТ, изображенной на рис. 9.7, передать энергию в режиме торможения от асинхронных двигателей к синхронному генератору и тепловому двигателю

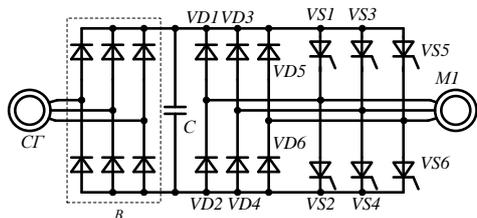


Рис. 9.7

можно при реверсивных выпрямителях. Однако при этом существенно увеличивается число вентилях, и так как мощность, поглощаемая в тепловом двигателе обычного исполнения невелика, такое решение представляется нецелесообразным. Поэтому применяется реостатное торможение. Тормозные сопротивления могут быть включены в звено постоянного тока (рис. 9.8а) или в цепь каждого двигателя (рис. 9.8б). В первом случае можно применять общее сопротивление для всех двигателей и соответственно один контактор ДЛ для его включения. Во втором – сопротивления и контакторы необходимы для каждой фазы

двигателя. Недостатком второго варианта является также возможность неравномерной нагрузки фаз вследствие производственных отклонений сопротивлений. Недостатком первого варианта является повышенная нагрузка вентилей обратного моста.

Режим работы преобразователя при втором варианте торможения мало изменяется по сравнению с тяговым режимом. для первого варианта он изменяется существенно. Активный ток, вырабатываемый асинхронным двигателем АД, протекает к тормозному сопротивлению  $R$  через диоды обратного моста. Реактивный ток протекает через тиристоры.

Схемы замещения, соответствующие возможным режимам работы преобразователя при торможении, представлены на рис. 9.9. В одном интервале (рис. 9.9а) фазы В и С двигателя питают активным током тормозное сопротивление  $R$ . В фазе А протекает реактивный ток, величина которого определяется суммой токов: тока протекающего от синхронного генератора через выпрямитель или от емкости фильтра  $C$  и части тока фазы В. При

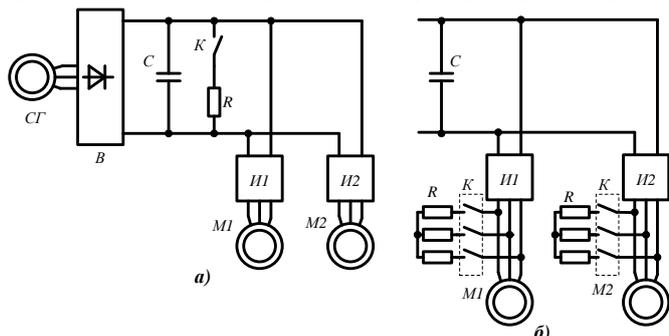


Рис. 9.8

достаточно большом коэффициенте мощности фаза А может питаться только за счет обмена энергией между фазами без потребления ее от синхронного генератора. Если при очень низких коэффициентах мощности сила тока взаимного обмена фаз и от емкости (если она рассчитана только для сглаживания пульсаций) недостаточна для создания большого магнитного потока, то потребляется ток от синхронного генератора. Для начального возбуждения асинхронного двигателя в тормозном режиме, в особенности после выбега, когда двигатели были отключены, возбуждение от синхронного генератора необходимо. В другом интервале (рис. 9.9б) все

тиристоры заперты, все фазы замкнуты на тормозные сопротивления и по ним циркулирует активный ток, поскольку в тормозном сопротивлении может рассеиваться только активная мощность. В тормозном режиме основную часть времени в проводящем состоянии находятся диоды обратного моста, а тиристоры отпираются на меньшую часть времени периода. Поэтому средняя нагрузка диодов за период возрастает в несколько раз по сравнению с нагрузкой в тяговом режиме, и они должны при проектировании преобразователя выбираться по тормозному режиму.

Система управления преобразователем частоты в тормозном режиме работает так же, как в тяговом режиме. Однако, поскольку длительность открытого состояния тиристоров может быть малой и его отпирание происходит в конце импульса управления, длительность управляющего импульса 120 эл. град. может оказаться недостаточной и должна быть увеличена до 150 эл. град.

Система управления САУПЧ также может быть использована и в тормозном режиме, но необходимо

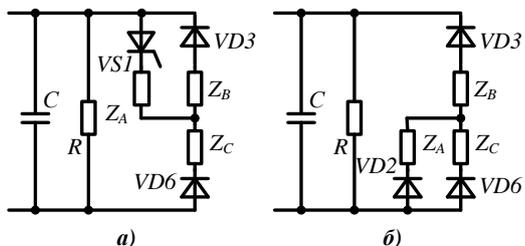


Рис. 9.9

изменить знак скольжения, что в схеме, изображенной на рис. 9.5а, может быть выполнено реверсированием сигнала ФПС, а в схеме, показанной на рис. 9.6, изменением задающего сигнала. Кроме того, задающие сигналы должны подаваться от органа управления тормозным режимом (тормозной педали). Необходимость в работе САУГ, подобной тяговому режиму, в тормозном режиме отпадает, так как дизель при этом работает в режиме, близком к холостому ходу. Необходимо лишь предусмотреть возможность начального возбуждения двигателя АД и устранить или, по крайней мере, уменьшить питание тормозных сопротивлений активным током синхронного генератора так как это вызовет излишний расход

топлива при тормозном режиме.

Схемы САУ тяговых приводов с НПЧ для питания асинхронных, синхронных и вентильных двигателей в достаточном объёме рассматриваются в дисциплине «Импульсные системы управления транспортными средствами» и поэтому здесь не приводятся.

4

Рассмотренные системы совместного управления для трансмиссий с двигателями постоянного тока одинаковой мощности построены исходя из того, что как внешняя, так и частичные характеристики генератора имеют гиперболический вид с переменными отсечками по току и напряжению (см. рис. 6.5). Любое изменение тяговой нагрузки (тока) вызывает соответствующее изменение скорости движения машины (напряжения генератора). Если же условия работы таковы, что движение необходимо осуществлять с постоянной скоростью независимо от нагрузки, то более подходящим будет генератор с гиперболической характеристикой и жёсткими частичными характеристиками (см. рис. 9.10). В этом случае при работе на частичных характеристиках и переменной тяговой нагрузке представляется возможным существенно сократить количество управляющих команд и упростить работу водителя

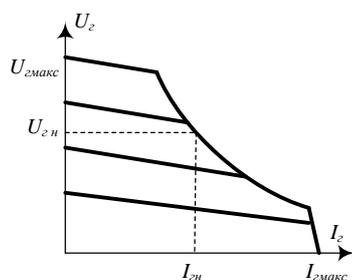


Рис. 9.10

Жёсткие частичные характеристики генератора более предпочтительны, если в качестве теплового двигателя используется газотурбинная установка, у которой, как известно, более низкая по сравнению с дизелем приёмистость, а также возникает стремительное увеличение скорости вращения турбины при внезапном снятии нагрузки (например, при переходе на выбег).

В силу изложенных выше соображений на транспортном средстве с газотурбинным двигателем (ГТД) и синхронным генератором (СГ) целесообразно применить объединённую САУ, действующую так, что каждому положению командоконтроллера хода  $KK_x$  соответствует жёсткая внешняя характеристика генератора ( $U_g = const$ ) и приблизительно постоянная частота вращения турбины ГТУ. Для этого необходимо, чтобы управление положением дозирующего клапана (ДК) подачи топлива в камеру сгорания (КС) осуществлялось под воздействием задающего сигнала  $KK_x$  и сигналов обратных

связей по напряжению СГ ( $U_g$ ), току нагрузки  $I_g$  с датчика тока  $IP1$ , мощности нагрузки  $P_T$ . Кроме того, САУ должна обеспечивать приблизительное равенство распределения напряжений (до 10...12% от номинального значения) между последовательно включёнными тяговыми двигателями и токов между параллельными цепями тяговых двигателей.

На рис. 9.11 приведена функциональная схема трансмиссии переменного-постоянного тока и САУ, отвечающие изложенным выше требованиям. Для реализации САУ в схему включены: датчик частоты вращения вала компрессора  $n_k$ ; датчик частоты вращения вала тяговой турбины (синхронного генератора)  $n_g$ ; датчик мощности ( $P_T$ ), развиваемой турбиной; датчик напряжения генератора ( $U_g$ ); датчики токов генератора ( $IP1$ ), двигателей  $M1, M3$  ( $IP2$ ) и  $M2, M4$  ( $IP2$ ); датчики напряжений на ТЭД, выполненные на резисторах (в качестве примера на схеме показаны резисторы  $R6$  и  $R7$ ).

Частота вращения вала тяговой турбины ГТУ (ротора СГ) в режиме пуска определяется положением клапана ДК, устанавливаемого по сигналу  $h_p$ , поступающего с усилителя У. Максимальная подача топлива в КС

осуществляется при нулевых сигналах ( $\Delta n_k, \Delta n_z, \Delta I_z, \Delta U_z$  и  $\Delta P=0$ ) вследствие того, что поступающее на сумматор с резистора  $R2$  смещение ( $-\Delta U_{cm}$ ) способствует появлению на входе усилителя максимального тока управления  $i_y$ .

При нулевом положении ходового командоконтроллера задающий сигнал с резистора  $R8$  минимален ( $-\Delta U_{xxUz}=0$ ), а выходной сигнал сумматора  $\Delta U_{cx}$  – максимален, что приводит к снижению подачи топлива в КС до минимума. В результате напряжение СГ – минимально.

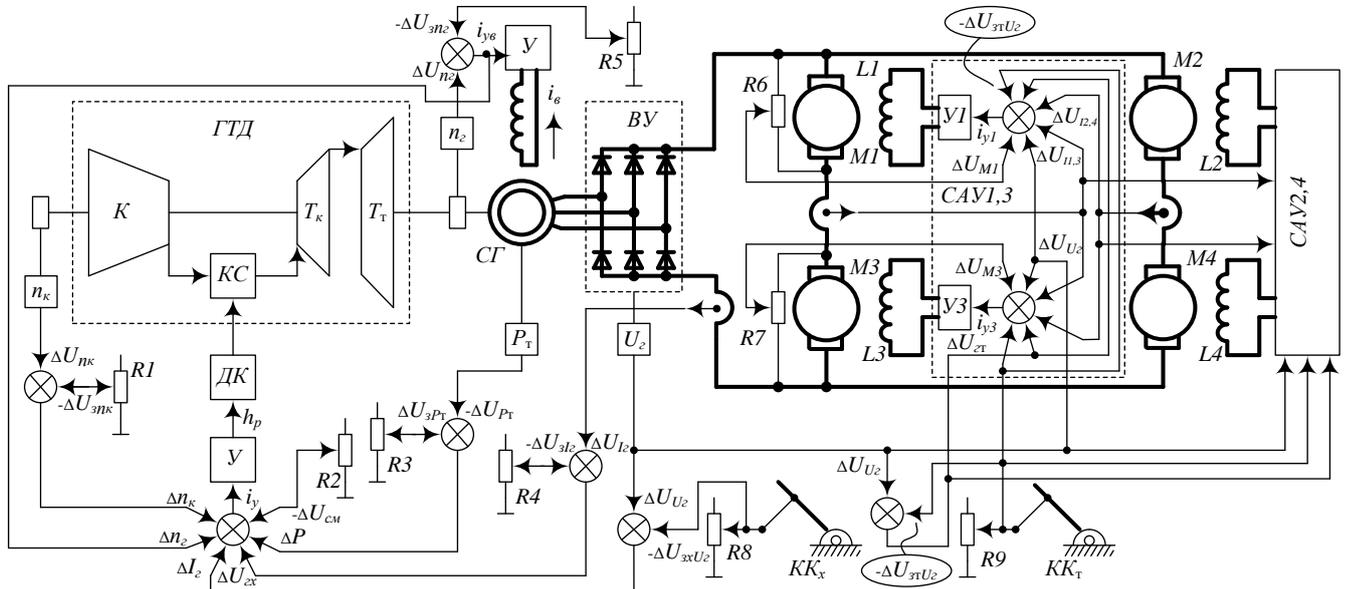


Рис. 9.11

Рассмотрим процесс регулирования выходного напряжения СГ. Пусть в исходном состоянии с  $KK_x$  поступал сигнал, уравниваемый сигналом датчика напряжения ( $|\Delta U_{xxUz}| = |\Delta U_{Uz}|$ ), чему соответствовали подача в КС некоторого количества топлива и определённое напряжение на генераторе. При перемещении  $KK_x$  с целью повышения скорости движения сигнал с потенциометра  $R8$  начинает возрастать по абсолютной величине ( $|\Delta U_{xxUz}| > |\Delta U_{Uz}|$ ) и, суммируясь с сигналом с датчика напряжения  $\Delta U_{Uz}$ , уменьшает входной сигнал  $\Delta U_{cx}$  до нуля, что приводит к увеличению  $i_y$ . Это приводит к увеличению подачи топлива и, как следствие – к увеличению  $n_z$  (а, следовательно, и  $U_z$ ) до тех пор, пока вновь не установится равенство сигналов  $|\Delta U_{xxUz}| = |\Delta U_{Uz}|$  при новом расходе топлива. При сбросе скорости сигнал с потенциометра  $R8$  начинает убывать ( $|\Delta U_{xxUz}| < |\Delta U_{Uz}|$ ), входной сигнал  $\Delta U_{cx}$  возрастает, что приводит к снижению  $i_y$  и уменьшению подачи топлива до тех пор пока вновь не установится равновесие  $|\Delta U_{xxUz}| = |\Delta U_{Uz}|$ .

Гиперболическая внешняя характеристика генератора обеспечивается при помощи датчика  $\Delta P_t$ . При работе ГТД на частичных характеристиках всегда  $|\Delta U_{xxP_t}| > |\Delta U_{P_t}|$ , поэтому сигнал  $\Delta P > 0$ , и величина  $i_y$ , а значит и подача топлива, зависит от соотношения сигналов ( $-\Delta U_{cm}$ ) и  $\Delta P$ . По мере роста мощности сигнал с датчика мощности увеличивается, выходной сигнал  $\Delta P$  уменьшается, а подача топлива увеличивается. По достижении равенства  $|\Delta U_{xxP_t}| = |\Delta U_{P_t}|$  увеличение подачи топлива прекращается, достигая максимума. Если же нагрузка продолжает увеличиваться сигнал  $\Delta P$  становится больше 0, что приводит к уменьшению подачи топлива, а значит и к уменьшению развиваемой генератором мощности.

Таким образом, рассмотренная САУ обеспечивает формирование линейных частичных характеристик путём изменения подачи топлива.

Формирование внешней характеристики генератора осуществляется с помощью САУ возбуждением СГ, в которой используется положительный сигнал с датчика  $n_z$ , сравниваемый с отрицательным смещением  $-\Delta U_{znz}$ , формируемым потенциометром  $R5$ . Максимальная величина сигнала соответствует частоте вращения вала тяговой турбины на холостом ходу. При увеличении частоты вращения ротора СГ происходит уменьшение сигнала  $i_{yв}$ , вследствие чего уменьшается ток возбуждения генератора  $i_g$  и напряжение  $U_z$ .

Описанные САУ действуют одновременно, обеспечивая заданный режим работы агрегата ГТД–СГ.

В схеме предусмотрены защиты: от превышения частоты вращения вала турбокомпрессора и вала тяговой турбины сверх допустимой, от токовых перегрузок СГ. Первые две защиты действуют на основе сравнения сигналов с датчиков с сигналами смещений, снимаемых с соответствующих потенциометров ( $\Delta n_z$  – с  $R5$ ;  $\Delta n_k$  – с  $R1$ ). При  $|\Delta U_{nk}| \geq |\Delta U_{znk}|$  сигнал  $\Delta n_k$  становится больше 0, что приводит к уменьшению сигнала  $i_y$  и уменьшению

подачи топлива. Аналогично при  $|\Delta U_{не} | \geq | -\Delta U_{зне} |$  сигнал  $\Delta n_c$  становится больше 0, что приводит к уменьшению сигнала  $i_y$ , и снижению подачи топлива.

Аналогично действует и защита от перегрузок по току на базе датчика *IP1* и потенциометра *R4*.

САУ возбуждением тяговых двигателей обеспечивает выравнивание напряжений между двигателя *M1, M3* в одной цепи и *M2, M4* другой цепи, как в режиме пуска, так и в режиме торможения. Рассмотрим работу системы управления на примере САУ1,3 первой цепи привода на двигателях *M1* и *M3*. Регулирование токов возбуждения ТЭД осуществляется усилителями *У1* и *У3* соответственно. Выравнивание напряжений в режимах тяги и торможения на последовательно включенных двигателях осуществляется так же, как это было рассмотрено применительно к рис. 7.3.