

Лекция 7

1. Системы регулирования трансмиссий постоянного тока. Принципы построения систем автоматического регулирования. Структурная схема силовой цепи трансмиссии постоянного тока.

2. Автоматические системы совместного управления трансмиссий постоянного тока.

1

Система автоматического регулирования (САР) тягового привода автономного транспортного средства предназначена для распределения энергии, вырабатываемой ЭУ, между ТЭД в соответствии с их предельными и частичными характеристиками, обеспечивающими заданный режим движения электрического локомотива. Так, в частности, САР тепловых двигателей подвижного состава (ТЭПС) должна обеспечивать:

- наибольшее использование мощности теплового двигателя при всех рабочих скоростях поезда;
- работу теплового двигателя с наибольшей экономичностью в режимах пониженной мощности;
- изменение силы тяги от минимальной, необходимой при пуске и движении одного локомотива (без поезда) до максимальной по сцеплению;
- поддержание приблизительно постоянной силы тяги в процессе разгона поезда;
- изменение скорости движения поезда от нуля до максимальной;
- обеспечение наибольшего к. п. д. самой электропередачи в рабочих режимах и ограничение ее режимов работы в пределах, допустимых по напряжению, току, нагреванию и т. п.

Первые два требования относятся к обеспечению определенных режимов работы теплового двигателя в соответствии с его свойствами и характеристиками. Они могут быть по существу объединены в одно следующее: обеспечить оптимальную зависимость подачи топлива от угловой скорости теплового двигателя. При номинальной скорости подача топлива должна быть наибольшей допустимой, при уменьшении угловой скорости она должна снижаться по линии наибольшей экономичности или наибольшего срока службы. Выполнение этого требования желательно при различных условиях движения, характеризующихся весом поезда, профилем и планом участков пути, графиком движения и т. п., и при различных положениях органа управления ТЭПС.

Остальные требования определяют режимы работы и характеристики самой электропередачи, так как сила тяги и скорость движения зависят от магнитного потока тяговых электродвигателей, тока тяговых двигателей и генератора, напряжения генератора. Выполнение некоторых из этих требований, например, поддержание постоянной силы тяги при разгоне или ограничения режима работы электропередачи, могут приводить к отклонениям режима работы теплового двигателя от оптимального. Необходимо стремиться к тому, чтобы эти отклонения были минимальными или хотя бы кратковременными.

Желательно, чтобы указанные требования выполнялись автоматически, без участия машиниста, так как при этом, как указывалось выше, достигается наибольшее приближение к оптимальным режимам работы оборудования и повышается безопасность движения.

Применение замкнутых систем автоматического регулирования с узлом сравнения, в котором действительное значение регулируемой величины сравнивается с заданным, позволяет резко снизить отклонение от требуемого режима и повысить степень использования установленного оборудования и тяговых свойств подвижного состава.

В общем случае на тепловом подвижном составе могут быть применены три системы автоматического регулирования: теплового двигателя, тягового генератора и тяговых электродвигателей. В САР тепловых двигателей регулируемой величиной является угловая скорость вращения вала ДВС, а регулируемым параметром – подача топлива. В САР генератора исполнительный орган всегда воздействует на возбуждение генератора, так же, как и в САР тяговых двигателей – на их возбуждение. Поэтому САР генератора или электродвигателей может быть выполнена в виде нескольких узлов с измерительными (а иногда и усилительными элементами), воздействующими на общий исполнительный орган.

При выборе и разработке САР необходимо определить:

- какие из факторов, характеризующих режим работы тягового привода, являются внешними (возмущающими воздействиями);
- какие факторы должны под действием САР поддерживаться постоянными или изменяться по заданной программе;
- какие из факторов следует выбирать в качестве регулирующих, т.е. те, на которые воздействует САР с целью установления заданного режима работы.

Основным внешним воздействием во время движения транспортного средства является сопротивление движению. Его изменение вызывает отклонение скорости движения, и, как следствие – изменение токов тяговых двигателей, тока генератора и момента сопротивления генератора. Для двигатель-генератора внешним воздействием будет отклонение тока нагрузки.

Внешним воздействием для ЭУ является также изменение положения органа управления локомотивом (например, рукоятки контроллера машиниста), которое может воздействовать либо непосредственно на режим работы ДВС и (или) генератора (например, путём изменения подачи топлива или возбуждения генератора), либо на САР посредством изменения настройки (программы) регулирования, либо на то и другое одновременно.

Влияние других факторов (вспомогательной нагрузки, температуры и т.п.) в большинстве случаев приводит к отклонения режимов работы как ДВС, так и электропередачи.

В зависимости от того, для выполнения каких требований предназначена САР, регулироваться должны различные факторы и по различным программам, а именно:

1. Для полного использования мощности теплового двигателя необходимо, чтобы его угловая скорость и подача топлива поддерживались постоянными. Для регулятора мощности регулируемыми могут быть обе величины или одна из них, если вторая при его работе поддерживается постоянной другими средствами.
2. При программном регулировании теплового двигателя по линии наибольшей экономичности должны одновременно изменяться мощность, угловая скорость и подача топлива, причем для заданного значения мощности должны поддерживаться определенные величины угловой скорости и подачи топлива. Поскольку мощность определяется произведением крутящего момента (зависящего от подачи топлива) и угловой скорости, достаточно задать любые две из этих величин, которые могут быть выбраны в качестве регулируемых. Если одна из них будет задаваться независимо от САР, можно ограничиться одной регулируемой величиной. В большинстве случаев задается органом управления угловая скорость посредством настройки регулятора теплового двигателя. В некоторых случаях орган управления задает подачу топлива.
3. Для изменения силы тяги не требуется определенной программы. При движении с установившейся скоростью сила тяги равна силе сопротивления движению. При изменении сопротивления движению изменяется скорость поезда, и сила тяги должна стремиться приблизиться к новому значению силы сопротивления движению. Если имеется САР, поддерживающая постоянный режим теплового двигателя, то произведение силы тяги на скорость автоматически будет поддерживаться на уровне, определяемом режимом теплового двигателя. Величина силы тяги при разгоне поезда должна устанавливаться в зависимости от его веса, условий сцепления, требуемого ускорения, а при переходе на тяговый режим после выбега – от скорости движения, профиля пути и путевых сигналов. Как правило, пусковая сила тяги задается положением органа управления.
4. Заданная органом управления пусковая сила тяги может поддерживаться приблизительно постоянной в процессе разгона поезда под действием САР. Для этого в качестве регулируемой величины могут быть выбраны непосредственно сила тяги или ток и магнитный поток тяговых двигателей. При двигателях последовательного возбуждения магнитный поток определяется током, и достаточно поддерживать постоянной одну из этих величин.
5. Автоматическое регулирование скорости поезда в существующих локомотивах не предусматривается. В принципе возможно ввести автоматическое регулирование постоянной скорости, значение которой задается органом управления. Однако при заданной скорости изменение сопротивления движению вызывает изменение мощности теплового двигателя. Поэтому одновременное регулирование постоянного режима теплового двигателя и постоянной скорости поезда невозможно.
6. САР могут быть использованы для ограничения предельных режимов работы электропередачи. Ограничение наибольшего тока важно более всего для генератора, который, как правило, работает при этом с наибольшей угловой скоростью и условия коммутаций являются тяжелыми. Ограничение тока может быть осуществлена посредством САР, используемой для регулирования постоянной силы тяги при разгоне. Регулируемой величиной при этом должен быть ток генератора или электродвигателя. Автоматическое ограничение напряжения генератора целесообразно, если режим работы его или электродвигателей при наибольшем расчетном напряжении близок к предельному по допустимому межламельному напряжению. Для САР, осуществляющей регулирование постоянного наибольшего напряжения, оно и является регулируемой величиной.

Как уже указывалось, при низких температурах необходимо ограничить мощность, реализуемую газотурбовозом. Для этого вводят в систему регулирования ГТУ устройство, уменьшающее подачу топлива при понижении температуры (коррекция по наружной температуре), или предусматривают в системе регулирования электропередачи ограничение мощности. В последнем случае регулируемой величиной является мощность генератора.

Таким образом, для наиболее полного использования локомотива при наибольшей экономичности его следует регулировать по определенным программам подачу топлива, угловую скорость двигатель-генератора, силу тяги локомотива, ток и напряжение генератора. Не все оптимальные программы могут осуществляться одновременно. При различных режимах работы тепловоза необходимо либо изменять программу регулирования какой-либо величины либо регулировать другие величины.

Принципы построения САР

1. САР должна содержать минимум органов управления тяговым приводом автономного транспортного средства (например, одну или в крайнем случае две рукоятки, обеспечивающие управление режимами пуска и торможения);
2. САР должна обеспечивать переход с одного режима работы на другой в течение минимального промежутка времени при условии соблюдения регламентированных ограничений (например, по предельно допустимым величинам ускорения подвижного состава, скорости его нарастания, ограничениям по току, напряжению, мощности и т.д.);
3. САУ отдельными параметрами должны быть автоматическими и объединяться в САР тягового привода;
4. Объединение САУ идентичных элементов трансмиссии в САР должно производиться с применением перекрестных обратных связей по аналогичным параметрам;

5. При возникновении переходных процессов САР должна обеспечивать такое воздействие на элементы трансмиссии, при котором не происходило бы выхода регулируемых параметров за пределы, установленные ограничениями;

6. При одновременном появлении взаимно недопустимых управляющих воздействий САР должна обеспечивать отработку приоритетного сигнала (например, при поступлении сигналов управления на пуск и торможение должна обеспечиваться отработка сигнала на торможение подвижного состава);

7. Для повышения надёжности управления приводом САР должна иметь дублирующие каналы получения и отработки сигналов.

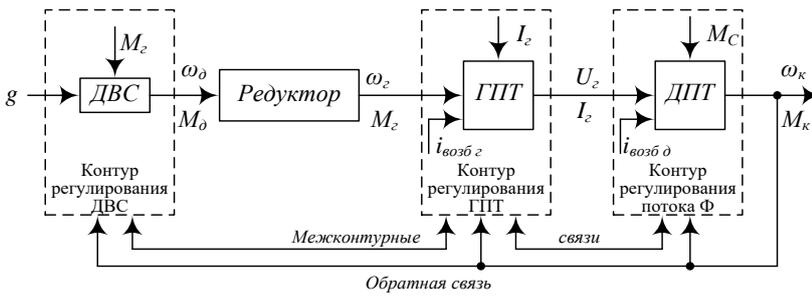


Рис. 7.1

иметь дублирующие каналы получения и отработки сигналов.

Упрощенная структурная схема силовой цепи трансмиссии постоянного тока приведена на рис. 7.1.

Первичным источником энергии в силовой цепи является ДВС, свободная мощность на валу которого

$$N_{св} \equiv M_{\delta} \omega_{\delta}.$$

Входным параметром для ДВС является расход топлива g (или другие факторы от которых зависит мощность ДВС), а регулируемым – угловая скорость ω_{δ} вала ДВС. Основное внешнее возмущающее воздействие на тепловой двигатель оказывает момент сопротивления вращению, создаваемый тяговым генератором постоянного тока ГПТ.

Входными параметрами для ГПТ являются угловая скорость $\omega_z = i_{ред} \omega_{\delta}$ и ток обмотки возбуждения генератора $i_{возб z}$. Выходным – U_z . Основное внешнее возмущающее воздействие оказывает ток нагрузки, т.е. I_z , потребляемый двигателем постоянного тока ДПТ, являющийся последним агрегатом в силовой цепи.

Входными параметрами для ДПТ являются питающее напряжение U_z и магнитный поток Φ , определяемый величиной тока обмотки возбуждения $i_{возб \delta}$. Выходными параметрами являются угловая скорость вращения вала двигателя ω_{κ} и крутящий момент M_{κ} , приведённые к ободу колеса. Основное возмущающее воздействие – момент сопротивления вращению, создаваемый на ободу колеса $M_{с}$.

Особенность работы силового электрооборудования автономного транспортного средства заключается в том, что одновременному регулированию подлежат несколько (не менее двух) параметров, связанных между собой определенными функциональными зависимостями.

Возможны две различные системы автоматического управления агрегатами трансмиссий. На рис. 7.2а в качестве примера приведена структурная схема простейшей системы управления ЭУ ТЭПС, в которой тепловой двигатель ДВС и тяговый генератор постоянного тока ТГ, питающий тяговые электродвигатели ТЭД1...ТЭДm последовательного возбуждения, управляются автономными, никак не связанными, САР.

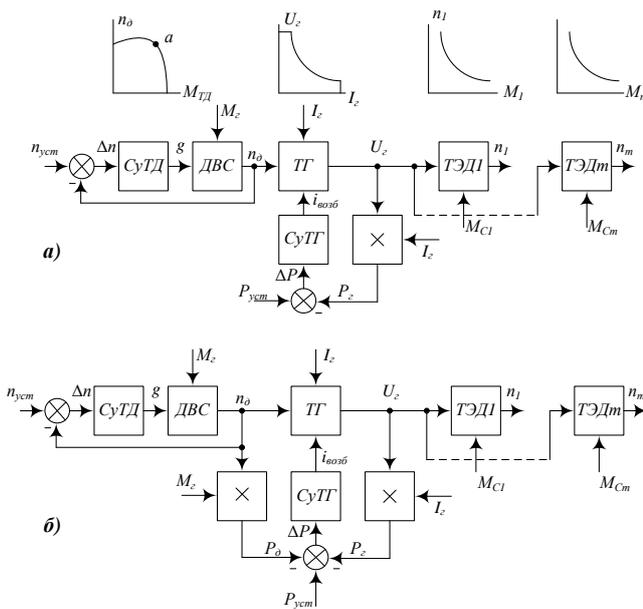


Рис. 7.2

ДВС имеет автономную систему управления СуТД, на вход которой подаётся сигнал рассогласования Δn_{δ} по скорости вращения вала ДВС, полученный как разность между уставкой скорости $n_{уст}$ и реальной величиной n_{δ} . В соответствии с сигналом СуТД (регулятор подачи топлива) изменяет количество топлива g , подаваемого в ДВС. При использовании дизеля и применении в качестве СуТД, например всережимного регулятора, изменением подачи топлива обеспечивается внешняя характеристика $n_{\delta} = f(M_{\delta})$. Точка a соответствует номинальной мощности, для использования которой необходимо, чтобы момент генератора M_z оставался неизменным.

Так как $M_z = c_m \Phi_z I_z$, то Φ_z и I_z должны изменяться обратно пропорционально. Поскольку измерить магнитный поток в генераторе затруднительно, а при постоянной скорости вращения вала ДВС $U_z \approx c_e \Phi_z n_{\delta}$, то крутящий момент на валу генератора можно определить как $M_z = c U_z I_z$, где $c = c_m / c_e n_{\delta}$. Следовательно, для обеспечения неизменного

момента M_z мощность генератора, равная произведению выходной координаты U_z на возмущающее воздействие I_z ,

должно быть постоянной, что и определяет принцип работы и структуру САР генератора ТГ. СуТГ обеспечивает постоянство развиваемой генератором мощности по сигналу рассогласования ΔP , определяемой как разность уставки мощности $P_{уст}$ и вычисленного её текущего значения путём перемножения сигналов от датчиков напряжения на зажимах генератора U_2 и тока I_2 , установленного в его якоре. Регулирование мощности осуществляется изменением тока $i_{возб}$ в обмотке возбуждения генератора.

Возмущающее воздействие I_2 определяется суммарным током тяговых двигателей, включённых параллельно. С увеличением возмущающих воздействий $M_{c1} \dots M_{cm}$ уменьшается скорость вращения колёс $n_1 \dots n_m$, что приводит к возрастанию токов ТЭД, тока тягового генератора ТГ I_2 , а, следовательно – к снижению напряжения на зажимах генератора U_2 .

Структурная схема САР, приведённая на рис. 7.2б отличается от рассмотренной тем, что системы управления тепловым двигателем и тяговым генератором объединены путём заведения сигнала пропорционального частоте вращения вала ДВС n_0 в сумматор на входе СуТГ. При уменьшении n_0 происходит снижение тока в обмотке возбуждения ТГ, а, следовательно, и развиваемой им мощности, что исключает перегрузку ДВС.

Необходимость одновременного управления несколькими физическими величинами объектов регулирования – тяговых электродвигателей, других силовых агрегатов обуславливает применение многоконтурной САР, объединяющей автономные контуры (подсистемы) автоматического регулирования, в первую очередь ЭУ и ТЭД. Поэтому прежде чем рассматривать САР тягового электропривода в целом, изложим принципы работы отдельных контуров регулирования.

2 При рассмотрении САР приняты следующие допущения:

- изменение возмущающего воздействия, т.е. статического момента нагрузки на двигатель, вызывающее переходный процесс, происходит мгновенно;
- влияние работы одного двигателя на другой пренебрежимо мало;
- при одновременном и равном по величине изменении моментов сопротивления на колёсах транспортного средства происходит переходный процесс, сводящийся к изменению напряжения генератора в зависимости от тока нагрузки и равномерному распределению напряжения (мощности) между двигателями;
- при составлении дифференциальных уравнений учитываются постоянные времени только тех звеньев, которые существенно влияют на переходные процессы.

САР по отклонению напряжения на двигателе.

Принципиальная схема системы управления одним двигателем приведена на рис. 7.3а, а структурная схема линейной модели – на рис. 7.3б.

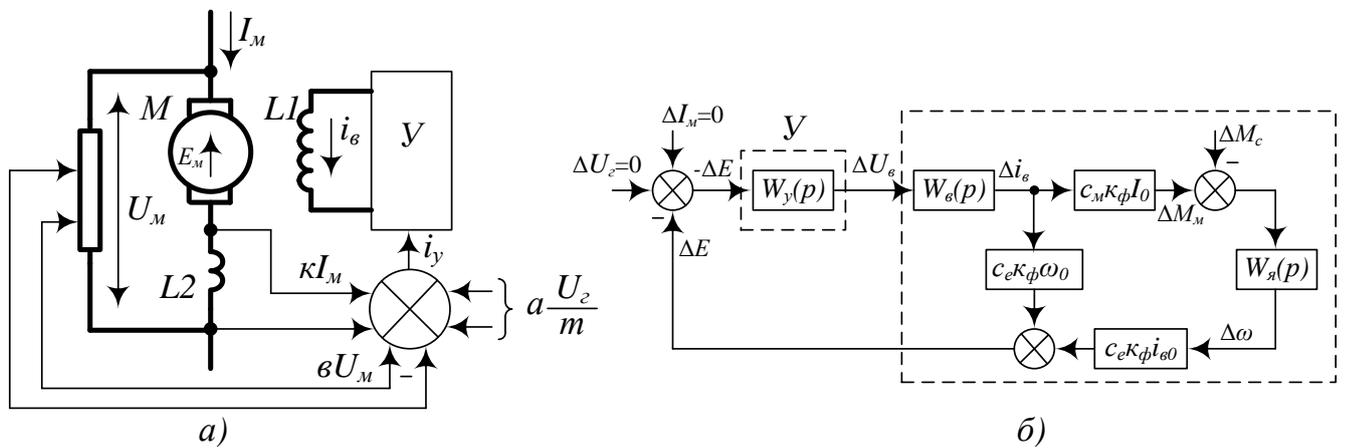


Рис. 7.3

Сумматором (рис. 7.3а) формируется сигнал управления

$$i_y = \kappa I_m + a \frac{U_2}{m} - \nu U_m,$$

где κ , a , ν – коэффициенты пропорциональности; m – количество последовательно включённых ТЭД.

Уравнения для приращений моментов и ЭДС двигателя E_m имеют вид

$$\Delta M - \Delta M_c = Jp\Delta\omega \quad (7.1)$$

$$\Delta E_m = c_e \kappa_\phi (i_0 \Delta\omega + \omega_0 \Delta i_{e0}), \quad (7.2)$$

где $\Delta M = c_m \kappa_\phi I_0 \Delta i_e$ – приращение момента двигателя; c_m – постоянная двигателя по моменту; κ_ϕ – коэффициент пропорциональности между магнитным потоком двигателя и током возбуждения; I_0 – начальное значение тока якоря двигателя; Δi_e – приращение тока возбуждения; ΔM_c – приращение момента сопротивления; J – приведённый к двигателю момент инерции привода; p – оператор дифференцирования; $\Delta\omega$ – приращение

угловой скорости вращения якоря двигателя; c_e – постоянная двигателя по ЭДС; i_{e0} и ω_0 – начальные значения тока возбуждения и угловой скорости соответственно.

Поскольку принято считать, что САР работают практически точно, а после возникновения возмущающего воздействия ΔM_C ток в цепи якоря остаётся неизменным, то приращение напряжения на двигателе ΔU_m равно приращению его ЭДС ΔE_m .

Передаточные функции звеньев структурной схемы, приведённой на рис. 7.3б имеют вид:

$$\text{усилитель } U \quad W_y(p) = \frac{\Delta U_e}{\Delta E_m} = \frac{\kappa_y}{T_y p + 1},$$

где κ_y – коэффициент усиления усилителя U по напряжению; ΔU_e – приращение напряжения возбуждения; T_y – постоянная времени усилителя;

$$\text{обмотка возбуждения } LI \text{ двигателя} \quad W_e(p) = \frac{\Delta i_e}{\Delta U_e} = \frac{I}{r_e(T_e p + 1)},$$

где r_e и T_e – сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения;

$$\text{якорь двигателя} \quad W_a(p) = \frac{\Delta \omega}{\Delta M - \Delta M_C} = \frac{I}{Jp}.$$

В соответствии со структурной схемой

$$\Delta E_m(p) = c_e \kappa_\phi i_{e0} (\Delta M - \Delta M_C) W_a(p) - c_e \kappa_\phi \omega_0 \Delta E_m W_y(p) W_e(p)$$

Поскольку $\Delta M = -c_m \kappa_\phi I_0 \Delta E_m W_y(p)$, то после преобразования получаем

$$\Delta E_m(p) = -A \frac{p^2 + bp + c}{p^3 + K_1 p^2 + K_2 p + K_3} \Delta M_C, \quad (7.3)$$

где $A = \frac{E_{m10}}{J\omega_0}$; E_{m10} – начальное значение ЭДС двигателя; $b = K_1 = \frac{T_\Sigma}{T_e T_y}$; $T_\Sigma = T_e + T_y$;

$$K_2 = \frac{I}{T_e T_y} \left(1 + \frac{\kappa_y E_{m0}}{U_{e0}} \right); \quad c = \frac{I}{T_e T_y}; \quad K_3 = \frac{\kappa_y E_{m0} M_0}{J T_e T_y \omega_0 U_{e0}}; \quad U_{e0} = r_e i_0.$$

В квазистационарном режиме ($p=0$) выражение (7.1) принимает вид

$$\Delta E_{mc} = -\frac{I}{\kappa_y} \frac{U_{e0}}{M_0} \Delta M_C. \quad (7.4)$$

Из приведённых выражений видно, что динамическая $\Delta E_m(p)$ и статическая ΔE_{mc} ошибки САР имеют положительные значения при отрицательных приращениях ΔM_C , т.е. при снижениях нагрузки.

Анализ САР в общем виде при свободном и вынужденном движении возможен с помощью решения уравнения (7.3) и построения зависимости $\Delta E_m(t)$ от возмущающего воздействия ΔM_C . Практический интерес представляют затухающие переходные процессы, характер которых определяется корнями уравнения $p^3 + K_1 p^2 + K_2 p + K_3 = 0$.

САР по отклонению частоты вращения якоря двигателя

На рис. 7.4 представлены принципиальная и структурные схемы управления одним двигателем постоянного тока. Управляющий сигнал, как и в схеме рис. 7.3 формируется в соответствии с выражением

$$i_y = \kappa I_m + a \frac{U_e}{m} - \nu U_{mt},$$

где U_{mt} – напряжение на зажимах тахогенератора.

Параметры САР подбираются так, чтобы при равенстве моментов на всех двигателях и одинаковой скорости вращения их якорей выполнялось условие $a \frac{U_e}{m} = b U_{mt}$. Поскольку обмотка возбуждения тахогенератора включена параллельно обмоткам добавочных полюсов ТЭД, то протекающий по ней ток пропорционален току якоря I_m , а напряжение на зажимах тахогенератора U_{mt} – напряжению на тяговом двигателе.

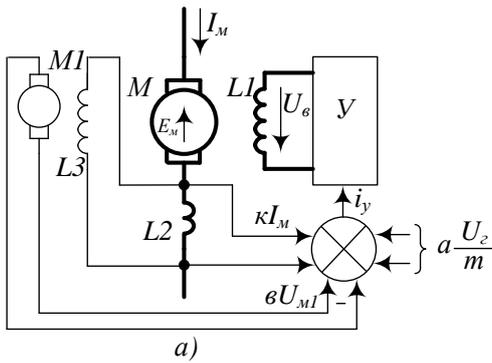
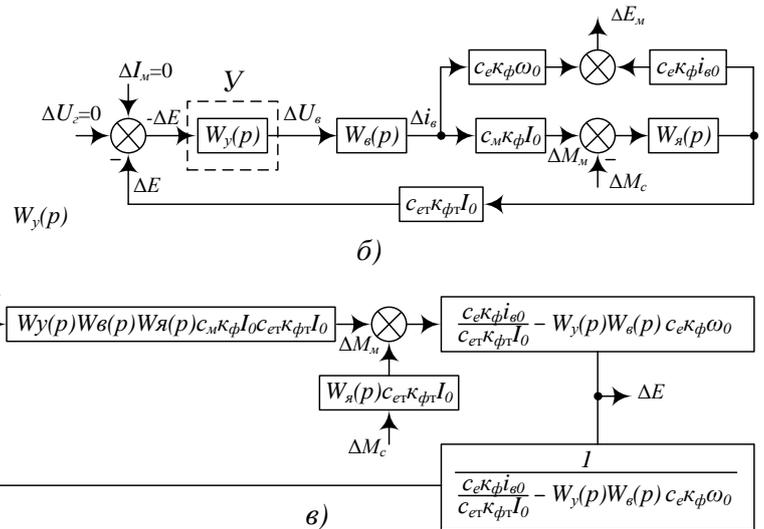


Рис. 7.4



При анализе САР приняты следующие допущения:

- падение напряжения в цепи якоря тахогенератора пренебрежимо мало;
- постоянные времени цепей обмоток якоря и возбуждения также пренебрежимо малы вследствие значительных величин их активного электрического сопротивления.

При этих допущениях ЭДС тахогенератора $\Delta E_{\tau} \approx c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0 \Delta \omega$, где $c_{\text{ет}}$ – постоянная тахогенератора по ЭДС; $\kappa_{\text{ф}\tau}$ – коэффициент пропорциональности между магнитным потоком тахогенератора и током якоря двигателя.

Уравнения (7.1) и (7.2) справедливы и в данном случае. Справедливы также выражения для передаточных функций усилителя $Y - W_y(p)$, обмотки возбуждения двигателя $L1 - W_\phi(p)$ и якоря двигателя $M - W_\alpha(p)$.

Схема рис. 7.4б преобразуется к схеме рис. 7.4в и для неё справедливо выражение

$$\Delta E_m(p) = \left[- \frac{\Delta E E_y(p) W_\phi(p) W_\alpha(p) c_m \kappa_\phi I_0 c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0}{\frac{c_e \kappa_\phi \dot{i}_{\phi 0}}{c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0} - W_y(p) W_\phi(p) c_e \kappa_\phi \omega_0} - W_\alpha(p) c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0 \Delta M_c \right] \times \left[\frac{c_e \kappa_\phi \dot{i}_{\phi 0}}{c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0} - W_y(p) W_\phi(p) c_e \kappa_\phi \omega_0 \right]$$

$$\text{или после преобразования } \Delta E_m(p) = - \frac{\left[\frac{c_e \kappa_\phi \dot{i}_{\phi 0}}{c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0} - W_y(p) W_\phi(p) c_e \kappa_\phi \omega_0 \right] W_\alpha(p) c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0}{1 + W_y(p) W_\phi(p) W_\alpha(p) c_m \kappa_\phi I_0 c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0} \Delta M_c.$$

После преобразования выражение (7.4) приводится к виду (7.3) с той лишь разницей, что коэффициенты

$$c = \frac{1}{T_\phi T_y} \left(1 - \kappa_y \frac{E_{\tau 0}}{U_{\phi 0}} \right); \quad K_2 = \frac{1}{T_\phi T_y} \quad \text{и} \quad K_3 = \frac{\kappa_y E_{\tau 0} M_0}{J T_\phi T_y \omega_0 U_{\phi 0}},$$

где $E_{\tau 0} = c_{\text{ет}} \kappa_{\text{ф}\tau} I_0 \omega_0$ – начальное значение ЭДС тахогенератора.

Статическая ошибка данной САР определяется по формуле

$$\Delta E_c = - \frac{1}{\kappa_y} \frac{E_0 U_{\phi 0}}{E_{\tau 0} M_0} \left(1 - \kappa_y \frac{E_{\tau 0}}{U_{\phi 0}} \right) \Delta M_c.$$

Эта формула существенно отличается от формулы (7.4) для предыдущей схемы.

Преимуществами данной САР являются возможности обеспечения динамической и статической погрешности любого знака, что позволяет желательным образом перераспределять мощности между последовательно включёнными двигателями; незначительной погрешности в режиме максимальной тяги при соответствующем выборе параметров.

Основной недостаток обуславливается необходимостью применения тахогенераторов, вызывающих снижение надёжности трансмиссии.

САР по разности напряжений на двигателях

Принципиальная схема САР приведена на рис. 7.5. Обмотка возбуждения первого тягового двигателя MI питается от усилителя Y , управляемого сигналом i_y , поступающим от сумматора. На вход сумматора подаются

сигналы пропорциональные току якоря $M1$, напряжению на последовательно включённых тяговых двигателях $M1$ и $M2$. При этом сигналы vU_{M1} и aU_{M2} противоположны по знаку, поэтому при увеличении напряжения на одном из двигателей вследствие, например, буксования колеса его магнитный поток ослабляется, а поток другого ТЭД – возрастает. Полагаем, что:

- двигатели питаются от генератора с $U_2 = const$, и при этом $\Delta U_{M1} = -\Delta U_{M2}$;
- до начала переходного процесса моменты сопротивления движению на колёсах – равны ($M_{C1} = M_{C2}$);
- ток двигателей изменяется незначительно.

В этих условиях справедливы следующие соотношения:

для двигателя $M1$:

$$\left. \begin{aligned} \text{уравнение динамики} & - & c_{M1} k_{\phi 1} (i_{\phi 1 0} \Delta I_{M1} - I_{M1 0} \Delta i_{\phi 1}) - \Delta M_{C1} &= j p \Delta \omega_1; \\ \text{ЭДС якоря} & - & \Delta E_{M1} &= c_{e1} k_{\phi 1} (i_{\phi 1 0} \Delta \omega_1 + \Delta \omega_{10} \Delta i_{\phi 1}); \\ \text{приращения напряжения} & & & \\ \text{на обмотке возбуждения} & - & \Delta U_{\phi 1} &= r_{\phi 1} (T_{\phi 1} p + I) \Delta i_{\phi 1}; \\ & & \Delta U_{\phi 1} &= k_{y1} (\Delta I_{M1} - \Delta U_{M1} + \Delta U_{M2}); \end{aligned} \right\}$$

для двигателя $M2$:

$$\left. \begin{aligned} \text{уравнение динамики} & - & c_{M2} k_{\phi 2} (i_{\phi 2 0} \Delta I_{M2} - I_{M2 0} \Delta i_{\phi 2}) - \Delta M_{C2} &= j p \Delta \omega_2; \\ \text{ЭДС якоря} & - & \Delta E_{M2} &= c_{e2} k_{\phi 2} (i_{\phi 2 0} \Delta \omega_2 + \Delta \omega_{20} \Delta i_{\phi 2}); \\ \text{приращения напряжения} & & & \\ \text{на обмотке возбуждения} & - & \Delta U_{\phi 2} &= r_{\phi 2} (T_{\phi 2} p + I) \Delta i_{\phi 2}; \\ & & \Delta U_{\phi 2} &= k_{y2} (\Delta I_{M2} - \Delta U_{M2} + \Delta U_{M1}), \end{aligned} \right\}$$

(7.5)

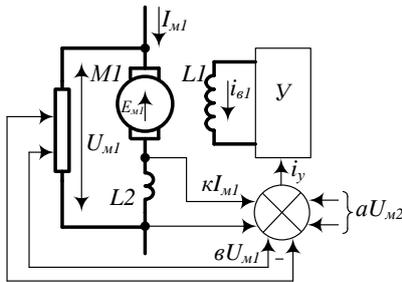


Рис. 7.5

где $\Delta E_{M1,2}$, $\Delta i_{\phi 1,2}$, $\Delta M_{C1,2}$, $\Delta \omega_{1,2}$ – приращения ЭДС, токов возбуждения, моментов сопротивления движению и угловых скоростей якорей тяговых двигателей $M1$ и $M2$ соответственно, а индексом 0 обозначены начальные значения этих величин.

Совместное решение системы уравнений (7.5) относительно ΔE_{M1} имеет вид:

$$\Delta E_{M1}(p) = -\frac{E_{M10}}{2\omega_{10}} \frac{T_{\phi 1} p + I}{J T_{\phi 1} p^2 + J \left[1 + \frac{E_{M10}}{U_{\phi 10}} (\kappa_y + 1) \right] p + (\kappa_y + 1) \frac{M_{10} E_{M10}}{U_{\phi 10} \omega_{10}}} \Delta M_{C1} \quad (7.6)$$

Система устойчива при любых значениях параметров, а переходные процессы носят затухающий аperiodический или колебательный характер.

В статических условиях (при $p=0$) уравнение (7.6) приобретает вид

$$E_{M1} = -\kappa_{рег} \frac{U_{\phi 10}}{2M_{10}} \Delta M_{C1},$$

$$\text{где } \kappa_{рег} = \frac{1}{\kappa_y + 1}.$$

Отсюда видно, что статическая погрешность данной САР вдвое меньше погрешности САР по отклонению напряжения на двигателе. Недостатком является то, что данная САР работает только при последовательном соединении двух двигателей. Однако на практике это наиболее распространённый случай соединения двигателей.

Функциональная САР

САР, приведённая на рис. 7.6 также обеспечивает постоянство мощности каждого из двух последовательно включённых двигателей. Поскольку ток генератора и тягового двигателя один и тот же, то постоянство мощности двигателя можно обеспечить поддержанием напряжения на двигателе, равным доле напряжения генератора.

Поскольку при исходном условии прикладываемое к двигателю напряжение $U_0 = const$ и справедливо соотношение

$$U_0 = E_{M1} + I_0 R_0 = c_{e1} k_{\phi 1} i_{\phi 1} \omega_{10} + I_0 R_0,$$

то выражение для определения тока возбуждения $i_{\phi 1}$ тягового двигателя имеет вид

$$i_{\phi 1} = \frac{U_0 - I_0 R_0}{c_{e1} k_{\phi 1} \omega_{10}} \approx \frac{E_0}{c_{e1} k_{\phi 1} \omega_{10}},$$

где R_0 – сопротивление якорной цепи ТЭД.

В статике условие выполняется при $U_{e0} - \kappa_y E_{T0} = 0$, чему соответствует начальная частота вращения вала якоря ТЭД

$$\omega_{10} = \frac{r_e}{\alpha \kappa_y c_{e1} \kappa_{\phi T}}, \text{ где } \alpha = I_{M0} / i_{e0}.$$

Следовательно, данная САР инвариантна в статическом режиме только при одном значении ω_0 , которое целесообразно выбирать для наиболее тяжёлого режима работы. В окрестностях этого режима можно добиться существенного уменьшения погрешности САР путём увеличения значения знаменателя в выражении (7.7).

Таким образом, данная САР сочетает положительные свойства исходных схем и может обеспечить более высокую точность работы.

САР для выравнивания токов в параллельных цепях

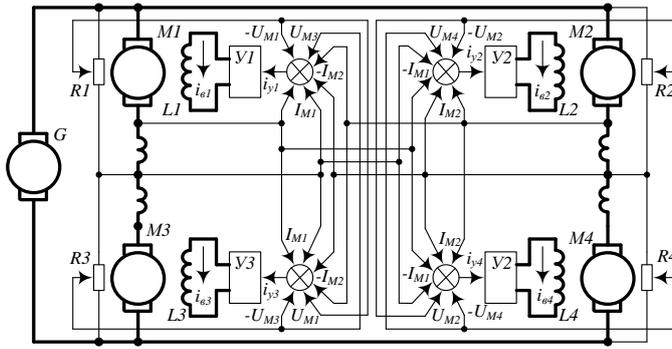


Рис. 7.8

В данном варианте САУ объединены две системы управления: первая обеспечивает выравнивание токов в параллельно включённых цепях двигателей, вторая служит для выравнивания напряжений между двигателями в каждой цепи. Обе САУ действуют через один усилитель.

Приращения суммарных токов управления усилителей определяются выражениями

$$7.8) \quad \left. \begin{aligned} \Delta i_{y1} &= a \Delta I_{M1} - b \Delta I_{M2} - c \Delta U_{M1} + c \Delta U_{M3} \\ \Delta i_{y2} &= a \Delta I_{M2} - b \Delta I_{M1} - c \Delta U_{M2} + c \Delta U_{M4} \\ \Delta i_{y3} &= a \Delta I_{M1} - b \Delta I_{M2} - c \Delta U_{M3} + c \Delta U_{M1} \\ \Delta i_{y4} &= a \Delta I_{M2} - b \Delta I_{M1} - c \Delta U_{M4} + c \Delta U_{M2}, \end{aligned} \right\} \quad ($$

где a, b, c – коэффициенты; $\Delta I_{M1, M2}$ и $\Delta U_{M1...M4}$ – приращения токов и напряжений соответственно $I_{M1, M2}$ и $U_{M1...M4}$.

Для элементов линейной модели САУ справедливы следующие соотношения: уравнения динамики двигателей

$$\left. \begin{aligned} c_M \kappa_{\phi} (I_{M10} \Delta i_{e1} + i_{e10} \Delta I_{M1}) - \Delta M_{C1} &= J p \Delta \omega_1; \\ c_M \kappa_{\phi} (I_{M20} \Delta i_{e2} + i_{e20} \Delta I_{M2}) - \Delta M_{C2} &= J p \Delta \omega_2; \\ c_M \kappa_{\phi} (I_{M30} \Delta i_{e3} + i_{e30} \Delta I_{M3}) - \Delta M_{C3} &= J p \Delta \omega_3; \\ c_M \kappa_{\phi} (I_{M40} \Delta i_{e4} + i_{e40} \Delta I_{M4}) - \Delta M_{C4} &= J p \Delta \omega_4; \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

напряжения на двигателях

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{M1} &= c_e \kappa_{\phi} (i_{e10} \Delta \omega_1 + \omega_{10} \Delta i_{e1}) + \Delta I_{M1} R_0; \\ \Delta U_{M2} &= c_e \kappa_{\phi} (i_{e20} \Delta \omega_2 + \omega_{20} \Delta i_{e2}) + \Delta I_{M2} R_0; \\ \Delta U_{M3} &= c_e \kappa_{\phi} (i_{e30} \Delta \omega_3 + \omega_{30} \Delta i_{e3}) + \Delta I_{M3} R_0; \\ \Delta U_{M4} &= c_e \kappa_{\phi} (i_{e40} \Delta \omega_4 + \omega_{40} \Delta i_{e4}) + \Delta I_{M4} R_0; \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

токов обмоток возбуждения двигателей

$$\Delta i_{e1} = \frac{\kappa_y r_y \Delta i_{y1}}{r_e (T_e p + 1)};$$

$$\Delta i_{e2} = \frac{\kappa_y r_y \Delta i_{y2}}{r_e (T_e p + 1)};$$

(7.11)

$$\Delta i_{e3} = \frac{\kappa_y r_y \Delta i_{y3}}{r_e (T_e p + 1)};$$

$$(7.12) \quad \left. \begin{aligned} \Delta i_{e4} &= \frac{\kappa_y r_y \Delta i_{y4}}{r_e (T_e p + 1)}; \\ \Delta U_{M1} + \Delta U_{M3} &= 0; \end{aligned} \right\}$$

$$(7.13) \quad \left. \begin{aligned} \Delta U_{M2} + \Delta U_{M4} &= 0; \\ \Delta I_{M1} + \Delta I_{M2} &= 0; \end{aligned} \right\}$$

связи моментов нагрузки при неизменном сопротивлении движению

$$(7.14) \quad \Delta M_{C1} + \Delta M_{C2} + \Delta M_{C3} + \Delta M_{C4} = 0.$$

Решение уравнений (7.8)...(7.14) относительно, например, ΔI_{M1} равестве параметров входящих в систему элементов выражается формулой

$$\Delta I_{M1}(p) = \frac{r_e i_{e0}}{T_e^2 T_2^2 K_2^2} \frac{(mp^2 + np + g)(\Delta M_{C1} + \Delta M_{C3})(m_1 p^2 + n_1 p + g_1)(\Delta M_{C2} + \Delta M_{C4})}{p^4 + q_2 p^3 + q_3 p^2 + q_4 p + q_5},$$

где $m = K_1 T_e T_1 + K_2 T_e T_2$; $n = K_1(T_e + T_1) + K_2(T_e + T_2)$; $g = K_1 + K_3$; $m_1 = K_3 T_e T_1$; $n_1 = K_3(T_e + T_1)$; $g_1 = K_3$;
 $T_1 = \frac{J\omega_0}{M_0}$; $T_2 = \frac{JR_0}{c_e \kappa_\phi r_e K_0 M_0}$; $q_2 = \frac{2K_1 T_1}{K_2 T_e T_2} + \frac{2T_e T_2^2 + 2T_e^2 T_2}{T_e^2 T_2^2}$; $K_0 = i_{e0}/I_{M0}$; $K_1 = a \kappa_y r_y M_{C0}$; $K_2 = \kappa_0 r_e M_{C0}$;
 $K_3 = b \kappa_y r_y M_{C0}$; $q_3 = \gamma \frac{T_1^2}{T_e T_2^2} + \sigma \frac{(T_e + T_1)T_2 + T_e T_1}{T_e^2 T_2^2} + \frac{T_2^2 + T_e^2 + 4T_e T_2}{T_e T_2^2}$; $q_4 = 2 \frac{(1 + \sigma)T_e + (\gamma + \sigma)T_1 + \sigma T_2}{T_e^2 T_2^2}$;
 $q_5 = \frac{1}{T_e^2 T_2^2} (\gamma + \sigma + 1)$; $\gamma = \frac{K_1^2 - K_3^2}{K_2^2}$; $\sigma = \frac{2K_1}{K_2}$.

В статических условиях (при $p=0$)

$$\Delta I_{M1} = \frac{r_e r_y i_{e0}}{\kappa_y M_{C0}} \frac{(a+b)(\Delta M_{C1} + \Delta M_{C3}) + b(\Delta M_{C2} + \Delta M_{C4})}{r_y^2 (a^2 - b^2) + \frac{2aK_0 r_e r_y}{\kappa_y} + \frac{2K_0^2 r_e}{\kappa_y^2}}.$$

Поскольку $K_0 \ll 1$, а $\kappa_y \gg 0$, то последними двумя членами в знаменателе можно пренебречь и тогда

$$\Delta I_{M1} \approx \frac{r_e i_{e0}}{\kappa_y M_{C0}} \frac{(a+b)(\Delta M_{C1} + \Delta M_{C3}) + b(\Delta M_{C2} + \Delta M_{C4})}{r_y (a^2 - b^2)}.$$