

Лекция 8

1. САР генератора.

2. Объединённое регулирование теплового двигателя и генератора.

3. Объединённое регулирование дизель-генератора и тяговых двигателей.

1 Каждая из САР или ее узлов может иметь различную структуру, состоять из различных по конструкции и принципу действия элементов, выполнять все или часть из рассмотренных выше операций по регулированию. Поэтому для САР, применяемых в теплоэлектрическом подвижном составе, характерно большое разнообразие как по выполнению отдельных систем или их узлов, так и по сочетанию их между собой. Кроме того, как указывалось, нередко САР используются совместно с некоторыми системами саморегулирования.

Из многочисленных САР, применяемых в теплоэлектрическом подвижном составе рассмотрим

САР электромашинного регулирования по угловой скорости генератора (тахометрическая схема).

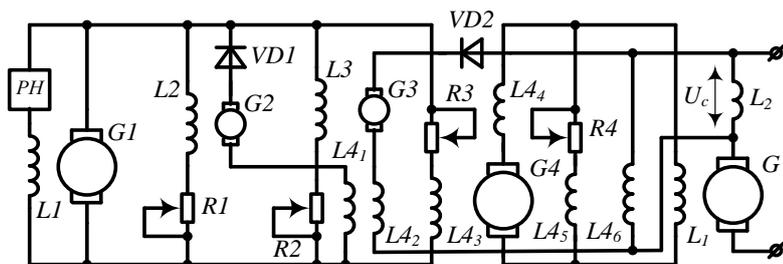


Рис. 8.1

регулятор напряжения; $G1$ – вспомогательный генератор; $G2, G3$ – тахогенераторы; $G4$ – возбудитель; $L41...L46$ – обмотки возбуждения возбудителя; $VD1, VD2$ – диоды.

Кроме обмоток возбуждения $L43...L46$, назначением которых является изменение магнитного потока генератора для создания характеристики, близкой к гиперболе, в возбудителе предусмотрены на ненасыщенных полюсах обмотки $L41$ и $L42$. Обмотка $L41$ служит для повышения использования мощности дизеля путем автоматического регулирования по его угловой скорости. Она действует согласно с независимой обмоткой $L43$. Обмотка $L42$ предназначена для автоматического регулирования пускового тока генератора, и ее н.с. направлена навстречу н.с. обмотки $L43$.

Рассмотрим сначала работу узла регулирования мощности (АРМ), считая ток в обмотке $L42$ равным нулю. Обмотка $L41$ включена на разность напряжений тахогенератора $G2$, приводимого от вала двигатель-генератора, и вспомогательного генератора $G1$. Регулятор напряжения PH поддерживает постоянным напряжение U_{G1} вспомогательного генератора.

Сопротивление в цепи независимой обмотки возбудителя подобрано так, что при отсутствии тока в обмотке $L41$ генератор не может полностью нагрузить тепловой двигатель. Сопротивление $R1$ в цепи обмотки возбуждения тахогенератора $G2$ подобрано таким образом, что при максимальной угловой скорости, поддерживаемой регулятором теплового двигателя, ток в регулирующей обмотке достигает максимально допустимого значения. Это значение, соответствующее максимальному возбуждению возбудителя и сохраняется неизменным, пока момент сопротивления генератора меньше свободного момента теплового двигателя при максимальной подаче топлива. При этом действует регулятор теплового двигателя, поддерживая постоянную угловую скорость его и меняя подачу топлива в зависимости от момента генератора. Когда шток регулятора достигает положения упора, дальнейшее повышение момента вызывает снижение угловой скорости. При этом резко уменьшается ток регулирующей обмотки $L41$ и новое равновесие между моментом теплового двигателя и генератора восстанавливается при некотором снижении угловой скорости. Наоборот, уменьшение момента генератора или увеличение свободного момента теплового двигателя (например, вследствие выключения части вспомогательной нагрузки) повышает угловую скорость, в результате возрастает момент генератора. Таким образом, схема поддерживает приблизительно постоянную угловую скорость путем изменения возбуждения возбудителя.

В схеме отсутствует регулятор генератора как самостоятельный аппарат, и поэтому она может быть отнесена к системам саморегулирования. Однако по своим характеристикам и динамическим свойствам она может быть причислена к замкнутым системам раздельного регулирования. Узел схемы, состоящий из тахогенератора $G2$, вспомогательного генератора $G1$ и регулирующей обмотки $L41$, может рассматриваться как регулятор прямого действия. В регуляторе имеется элемент сравнения, состоящий из тахогенератора, измеряющего угловую скорость и являющегося измерительным органом, и вспомогательного генератора, напряжение которого определяет величину угловой скорости, поддерживаемой регулирующим устройством, и который, следовательно, может рассматриваться как задающий орган. В качестве исполнительного органа служит регулирующая обмотка $L41$ возбудителя, изменяющая его магнитный поток, являющийся регулирующим параметром.

Диод VDI защищает цепь АРМ от повышенного тока при снижении угловой скорости дизеля.

Для цепи регулирующей обмотки при установившемся режиме справедливо равенство

$$E_{G2} = c_e \Phi_{G2} \omega = U_{G1} + i_{L_{A1}} (R_{L_{A1}} + R_{G2}) + u_1, \quad (8.1)$$

де E_{G2} , Φ_{G2} – э. д. с. и магнитный поток тахогенератора; $R_{L_{A1}}$ — сопротивление регулирующей обмотки; R_{G2} – сопротивление цепи якоря тахогенератора $G2$ (вместе с соединительными проводами узла АРМ); u_1 – падение напряжения в диоде VDI и на щетках тахогенератора.

Изменение тока в обмотке PB является результатом отклонения угловой скорости и ЭДС тахогенератора. В установившемся режиме ток должен достигнуть величины, при которой момент генератора M_T становится равным свободному моменту теплового двигателя M_0 .

В свою очередь угловая скорость устанавливается в соответствии с равенством (8.1) в зависимости от тока регулирующей обмотки. При отклонениях M_0 или M_c изменяется i_{PB} , при этом изменяются падения напряжения в цепи регулирующей обмотки, а следовательно, и угловая скорость двигатель-генератора. Таким образом, регулирование угловой скорости является статическим.

Изменение тока в обмотке L_{A1} является результатом отклонения угловой скорости и ЭДС тахогенератора $G2$. В установившемся режиме ток должен достигнуть величины, при которой момент генератора M_c становится равным свободному моменту теплового двигателя M_0 .

В свою очередь угловая скорость устанавливается в зависимости от тока регулирующей обмотки. При отклонениях M_d или M_c изменяется $i_{L_{A1}}$, при этом изменяются падения напряжения в цепи регулирующей обмотки и угловая скорость двигатель-генератора. Таким образом, регулирование угловой скорости является статическим.

Ток в регулирующей обмотке L_{A1} устанавливается в процессе регулирования таким, чтобы момент сопротивления генератора при любом его значении был равен свободному моменту дизеля.

Узел АРМ, как и регулятор теплового двигателя, является регулятором угловой скорости дизель-генератора. Однако цели их применения различны. Регулятор теплового двигателя поддерживает постоянную угловую скорость при изменении развиваемой генератором мощности и устанавливает подачу топлива в соответствии с последней, т. е. режим дизеля определяется режимом генератора. Регулятор генератора имеет целью обеспечить полное использование мощности дизеля путем изменения возбуждения генератора при неизменной подаче топлива, причем мощность, потребляемая генератором, определяется величиной свободной мощности, передаваемой от дизеля на вал генератора. Наличие двух отдельных регуляторов, поддерживающих одну величину, вызывает необходимость строгого разграничения областей их работы и взаимной настройки.

Регулятор дизеля должен действовать, пока генератор не может полностью нагрузить его из-за ограничения по напряжению. Для возможно большего использования мощности дизеля целесообразно обеспечить при этом наибольшее допустимое возбуждение генератора. Следовательно, в области тока нагрузки от 0 до $I_{c_{мин}}$ нужно посредством изменения тока возбуждения тахогенератора $G2$ установить наибольший ток регулирующей обмотки. Так как в этой области угловая скорость поддерживается постоянной, ток регулирующей обмотки не изменяется, т. е. регулятор генератора не действует.

Для того чтобы регулятор генератора выполнял свое назначение – поддерживал (с той или иной точностью) постоянный режим работы дизеля, необходимо постоянство подачи топлива. Для этого нужно, чтобы в области $I_c > I_{c_{мин}}$ магнитный поток тягового генератора при максимальном значении тока регулирующей обмотки и любых условиях (нагретые обмотки возбуждения и т. п.) был больше потока, соответствующего наибольшему свободному моменту дизеля. Тогда при $I_c > I_{c_{мин}}$ регулирующий орган дизеля достигает положения упора. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к перегрузке дизеля, его угловая скорость снижается, в результате чего ток регулирующей обмотки уменьшается до тех пор, пока момент генератора не станет равным свободному моменту дизеля. Система возбуждения возбудителя при отключенной обмотке L_{A1} должна настраиваться так, чтобы при всех условиях магнитный поток генератора был меньше потока, соответствующего минимальному свободному моменту дизеля. Это нужно для того, чтобы ток в обмотке PB был всегда больше нуля.

При заданном напряжении вспомогательного генератора настройка регулятора генератора на определенную угловую скорость может осуществляться посредством изменения тока возбуждения тахогенератора.

Если регулятор теплового двигателя вследствие неправильной настройки или нарушения ее в эксплуатации поддерживает не номинальную угловую скорость, а меньшую, то максимальный ток L_{A1} уменьшится и дизель может оказаться недогруженным. Необходимость взаимной настройки и опасность нарушения ее являются существенным недостатком схемы.

Обмотка L_{A2} узла регулирования пускового тока (АРТ) включена на разность напряжения U_c , пропорционального току нагрузки, и напряжения тахогенератора $G3$. В тепловозах ТЭЗ и ТЭ7 узел АРТ включен на суммарное падение напряжения в обмотках возбуждения одной группы тяговых двигателей и в обмотке дополнительных полюсов генератора.

Узел регулирования пускового тока приходит в действие, когда входное напряжение U_c становится больше ЭДС тахогенератора $G3$ (см. рис. 8.1). Возбуждение тахогенератора $G3$ устанавливается так, чтобы при номинальной угловой скорости двигатель-генератора ЭДС тахогенератора равнялась входному напряжению U_c при токе тяговых двигателей, близком к предельному по условиям сцепления колес с рельсами или коммутации генератора. При токе в силовой цепи, меньшем этого значения и называемым током отсечки, в цепи тахогенератора $G3$ протекает незначительный ток, равный обратному току вентиля $VD2$. При превышении тока отсечки в обмотке LA_2 появляется ток i_{LA_2} .

При установившемся режиме для цепи обмотки LB справедливо уравнение

$$U_c = I_c R_c = E_{G3} + u_2 + i_{LA_2} (R_{LA_2} + R_{G3}), \quad (8.2)$$

где R_c – эквивалентное сопротивление участка силовой цепи, с которого снимается напряжение; u_2 – падение напряжения на диоде $VD2$ и под щётками $G3$; R_{LA_2} – сопротивление обмотки LA_2 и соединительных проводов; R_{G3} – сопротивление цепи якоря $G3$.

При увеличении U_c растет ток i_{LA_2} , что вызывает уменьшение напряжения на зажимах возбуждителя и генератора.

Ток в обмотке LA_2 достигает максимального значения при трогании поезда, когда ЭДС тяговых двигателей равна нулю и напряжение генератора равно падению напряжения в силовой цепи (линия OA на рис. 8.2). При разгоне поезда ток генератора уменьшается. В результате снижается ток i_{LA_2} и увеличивается напряжение генератора по кривой AB . При $i_{LA_2} = 0$ размагничивающее действие обмотки LA_2 прекращается, что соответствует выходу на характеристику полной мощности двигатель-генератора (точка B).

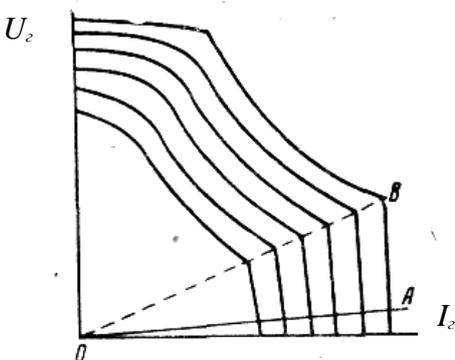


Рис. 8.2

Желательно, чтобы сила тяги в процессе пуска не изменялась, для чего необходимо сохранение постоянного значения тока генератора. Точное выполнение этого условия затрудняется тем, что для повышения напряжения генератора требуется снижение тока i_{LA_2} , следствием чего будет уменьшение членов правой части равенства (8.2), в то время как для уменьшения отклонения тока генератора при пуске необходимо добиваться их постоянства. Для этой цели элементы цепи следует выполнять с минимальным сопротивлением.

Увеличение сопротивления R_c и ЭДС E_{G3} уменьшает относительное влияние отклонения переменных членов правой части, а также и отклонение пускового тока.

Возможна также компенсация изменения падений напряжения в цепи АРТ обратным по знаку изменением ЭДС тахогенератора $G3$. Для этой цели в тахогенераторе предусмотрена

последовательная обмотка возбуждения, действующая навстречу независимой, и возможность поворота щеток.

Особенностью данной схемы является автоматическое изменение тока отсечки без всяких переключений в схеме при отклонениях угловой скорости двигатель-генератора. Ток отсечки, т.е. ток начала действия узла АРТ,

$$I_{c0} = \frac{E_{G3}}{R_c} = \frac{c_{eG3} \Phi_{G3} \omega_0}{R_c}.$$

ЭДС тахогенератора изменяется пропорционально угловой скорости и ток отсечки, следовательно, также пропорционален ей. Поэтому при повороте рукоятки контроллера одновременно с увеличением мощности теплового двигателя растет пусковой ток и ускорение поезда, устанавливающиеся в результате работы узла АРТ. Статизм регулирования с понижением угловой скорости возрастает в связи с относительным увеличением влияния переменных членов. Поэтому пусковые характеристики генератора с понижением угловой скорости делаются более пологими.

Существенным недостатком схемы АРТ является зависимость тока отсечки от температуры обмоток, с которых снимается входное напряжение U_c , в связи с изменением их сопротивления. Кроме того, вследствие гистерезиса в магнитных цепях тахогенератора $G3$ и возбуждителя ток отсечки при увеличении напряжения генератора (во время пуска поезда) больше, чем ток отсечки при снижении напряжения (ограничение тока).

Рассмотренная схема решает задачу полного использования мощности теплового двигателя, регулирования пускового тока и ограничения максимального тока. Пусковая сила тяги изменяется в зависимости от угловой скорости двигатель-генератора без всяких переключений. Режимы работы двигатель-генератора при частичных нагрузках определяются характеристиками возбуждителя с расщепленными полюсами (см. главу IV).

Достоинством схемы является ее простота и значительный запас устойчивости. В случае неисправности в узле АРТ он может быть отключен. Наличие возбуждителя с расщепленными полюсами обеспечивает возможность удовлетворительной работы тепловоза, но с пониженным использованием мощности.

Вследствие рассмотренных выше недостатков раздельного регулирования теплового двигателя и генератора в современных тепловозах широкое распространение получили системы регулирования, в которых регулятор теплового двигателя и регулятор генератора кинематически связаны между собой.

Применяются различные способы выполнения таких регуляторов. В одних системах регулятор теплового двигателя по существу остается без изменения, но на его выходном штоке, соединенном с регулирующим органом теплового двигателя (например, с рейками топливных насосов дизеля), добавляется рычаг, приводящий в действие регулятор генератора. При токах нагрузки меньше $I_{c \text{ мин}}$ и других режимах работы, когда генератор не может полностью нагрузить тепловой двигатель, регулятор генератора не действует, находясь в положении, соответствующем наибольшему возбуждению. При этом регулятор теплового двигателя поддерживает постоянную угловую скорость двигатель-генератора, изменяя подачу топлива. Когда подача топлива достигает наибольшей допустимой величины, шток регулятора при дальнейшем перемещении приводит в действие регулятор генератора, изменяющий возбуждение последнего так, чтобы угловая скорость и подача топлива поддерживались постоянными.

Такое соединение регуляторов можно назвать каскадным, так как выходной – исполнительный орган регулятора теплового двигателя – является одновременно входным органом регулятора генератора. Оба регулятора могут представлять собой отдельные конструкции со своими усилительными, преобразовательными и исполнительными органами. В некоторых системах они объединены в одну общую конструкцию, но и в этом случае можно в ней выделить узлы, относящиеся к каждому из регуляторов. Процесс регулирования всегда начинается с отклонения угловой скорости в результате изменения нагрузки двигатель-генератора или настройки регулятора теплового двигателя, что приводит последний в действие, а в зависимости от положения исполнительного органа меняется подача топлива или возбуждение генератора или то и другое одновременно. При каскадном соединении необходима взаимная настройка обоих регуляторов.

Применяются также системы, в которых имеется один общий регулятор, исполнительный орган которого соединен непосредственно с регулируемыми органами теплового двигателя и генератора так, что при увеличении потребляемой мощности генератора исполнительный орган сначала увеличивает подачу топлива до наибольшей величины, а затем уменьшает возбуждение генератора.

Существует достаточно большое количество вариантов исполнения объединенных регуляторов, построенных на различных принципах работы: угольный гидравлический регулятор, вибрационный регулятор, гидравлический регулятор с гибкой обратной связью, электрогидравлический объединенный регулятор, объединенные регуляторы с индуктивными датчиками, бесконтактный регулятор мощности и т.д.

Ниже рассмотрены принципиальные схемы устройства и принцип действия некоторых из применяемых на современных локомотивах систем регулирования.

Гидравлический объединенный регулятор с гибкой обратной связью

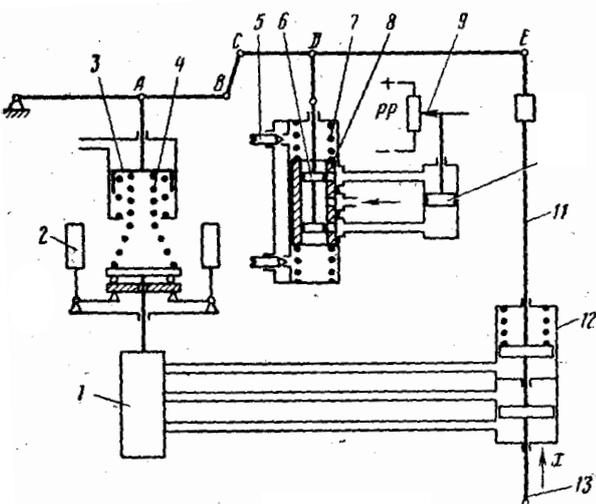


Рис.8.3

На рис. 8.3 изображена упрощенная принципиальная схема регулятора с гибкой обратной связью. В качестве регулятора дизеля применен изодромный гидромеханический регулятор (см. рис. 3.11).

Регулятор генератора состоит из золотникового устройства, гидравлического сервомотора и регулировочного реостата *PP* (рис. 8.3). Регулировочный реостат включен в цепь управления регулировочной обмотки магнитного усилителя (*МУ*) – на схеме не показан. Золотниковый плунжер 6 (рис. 8.3) шарнирно связан с ломаным рычагом *ABCDE*, который в свою очередь, соединен в шарнире *E* с тягой 11, связанной с поршнем сервомотора 12 и выходным штоком 13 регулятора дизеля, а в шарнире *A* с поршнем 3, являющимся органом настройки регулятора.

Рассмотрим работу регулятора при настройке регулятора на номинальную скорость при неизменном положении поршня 3. Положение регулятора на рис. 8.3

соответствует установившемуся режиму работы дизеля, причем выходной шток 13 занимает положение, соответствующее полной подаче топлива. При увеличении нагрузки угловая скорость дизель-генератора снижается, грузы сходятся и шток 13 поднимается в сторону увеличения подачи топлива. При этом рычаг *SE* поворачивается против часовой стрелки, золотниковый плунжер 6 поднимается, открывая доступ рабочей жидкости в цилиндр над поршнем 10 сервопривода регулятора генератора. Поршень 10 и движок 9 опускаются, уменьшая ток в регулировочной обмотке управления *МУ*. В результате этого уменьшается ток возбуждения, а следовательно, и нагрузка генератора.

При опускании поршня 10 часть рабочей жидкости из-под поршня перетекает в корпус золотника и под давлением жидкости золотниковая втулка 8 поднимается, уменьшая отверстие, открытое золотником, и тем самым замедляет перемещение поршня 10. В конце процесса регулирования золотниковая втулка под действием

компенсационной пружины 7 возвращается в первоначальное положение, заставляя рабочую жидкость перетекать из нижней полости золотника в верхнюю через малые отверстия игольчатых клапанов 5.

Золотниковая втулка 8 вместе с пружинами 7 и игольчатыми «клапанами» 5 представляет собой гибкую обратную связь – изодром и регулятор генератора, как и регулятор дизеля, является изодромным. Устойчивая работа системы достигается регулировкой игольчатых клапанов.

К концу процесса регулирования золотниковая втулка 8 и золотник 6 занимают первоначальное положение. Следовательно, шток 13 также возвращается в первоначальное положение, а контактный движок 9 и поршень 10 занимают новое положение, требуемое по условиям равенства моментов теплового двигателя и генератора.

Таким образом, регуляторы действуют по принципу каскадного соединения: сначала приходит в действие регулятор дизеля, его выходной шток приводит в действие золотник регулятора генератора, который поддерживает постоянное положение исполнительного органа регулятора дизеля.

Связь между рычагами *AB* и *CE* устанавливает определенную зависимость между угловой скоростью и подачей топлива. Для снижения угловой скорости нужно уменьшить натяжение пружины 4, т. е. поднять поршень 3. В результате уменьшения силы пружины грузы 2 расходятся и шток 13 опускается, уменьшая подачу топлива, что приводит к снижению угловой скорости дизель-генератора. В то же время вследствие поворота рычага *AB* против часовой стрелки точка *O* поднимается, золотниковый плунжер 6 сдвигается вверх и регулятор генератора уменьшает ток в регулировочной обмотке магнитного усилителя и возбуждение генератора. Следовательно, в начале процесса регулирования оба регулятора приходят в действие одновременно, но в дальнейшем перемещение вниз штока 13 приводит к опусканию плунжера 6, уменьшению скорости, а затем и к остановке поршня 10. Установившийся режим возможен, когда оба золотника регулятора дизеля и регулятора генератора находятся в положении перекрытия проходных отверстий, т. е. центробежные грузы и точка *O* занимают первоначальное положение. Так как сила пружины 4 уменьшилась, уравновешивающие ее центробежные силы должны соответственно быть меньше, что возможно при неизменном положении грузов за счет снижения угловой скорости. При перемещении вверх точки *A* сохранение первоначального положения точки *B* возможно, если в установившемся режиме точка *E* и шток 13 опустятся по отношению к первоначальному положению, что означает уменьшение подачи топлива в новом режиме. Таким образом, при снижении угловой скорости уменьшается подача топлива, т. е. устанавливается определенная зависимость крутящего момента дизеля от угловой скорости. В регуляторе предусмотрена возможность изменения этой зависимости путем изменения длин рычагов 11, *CD* и *DE*. Следовательно, регулятор позволяет при частичных нагрузках обеспечить работу дизеля в режимах наибольшей экономичности.

Перемещение поршня 3 осуществляется электрогидравлическим приводом управления, схема и принцип действия которого рассмотрены ниже.

Когда поршень 10 достигает крайнего верхнего положения, соответствующего максимальному возбуждению генератора, регулятор последнего выключается и положение точки *D* не влияет на режим работы двигатель-генератора. При этом подача топлива изменяется в соответствии с мощностью, потребляемой генератором. Регулятор генератора поддерживает постоянный момент теплового двигателя путем изменения возбуждения на различном уровне для каждого положения рукоятки управления, но не препятствует уменьшению момента теплового двигателя, когда момент сопротивления генератора при максимальном возбуждении его меньше крутящего момента дизеля при заданной подаче топлива.

Гибкая обратная связь в регуляторе генератора и возможность обеспечения желательной зависимости $M_o(n_o)$ за счет кинематической связи между органом управления и исполнительным органом являются существенным преимуществом данной схемы в сравнении с ранее рассмотренными.

Недостаток системы заключается в наличии контактов реостата, подверженных износу и подгоранию, в особенности при размещении в непосредственной близости от дизеля, так как повышенная температура воздуха, водяные и масляные пары, попадание масла и топлива на контакты понижают надежность их работы. Реостат *PP* и сервопривод к нему могут выполняться с поступательным движением или с поворотным движком и поршнем.

Регулятор генератора в описанной системе имеет те же элементы, как и регулятор теплового двигателя: золотник, изодром, гидропривод. Уравнения их выводятся, так же, как уравнение соответствующих звеньев регулятора теплового двигателя, и отличаются от них постоянными коэффициентами и регулируемыми величинами.

При пониженной угловой скорости регулирующий орган не достигает положения упора. Регулятор генератора поддерживает постоянную подачу топлива со статической ошибкой, зависящей от мертвых ходов и трения в золотнике регулятора генератора и шарнирах рычажной системы. При номинальной угловой скорости работа регулятора зависит от настройки регулятора генератора по отношению к рейкам топливных насосов. Если перемещение золотникового плунжера вверх начинается после того, как рейки топливных насосов достигают положения упора, то при работе регулятора подача топлива постоянна и, следовательно, устраняется статическая ошибка по подаче топлива. Однако при этом трудно обеспечить устойчивую работу регулятора. Устойчивая работа легче достигается, если одновременно с изменением возбуждения меняется подача топлива, т. е. упор реек топливных насосов сдвигается дальше по отношению к положению штока 13, при котором золотник регулятора генератора находится в положении перекрытия отверстий, но при этом вводится статическая ошибка по подаче топлива.

Рассмотренный регулятор может быть использован не только совместно со схемой с селективным узлом, но и с любой схемой возбуждения генератора. Системы, подобные этой, имеют наибольшее применение в современных тепловозах США, Франции, Швейцарии и других стран, часто в цепи независимой обмотки трехобмоточного генератора.

Электрогидравлический объединенный регулятор

Принципиальная электрическая и кинематическая схемы регулирования дизель-генератора (рис. 8.4) разработана фирмой Джeneral Электрик и применена на тепловозах и газотурбовозах США. Электрогидравлический регулятор состоит из регулятора скорости РС и ограничителя подачи топлива ОП. Каждый из них включает в себя золотник с электромагнитным приводом и гидравлический сервопривод. Поршень П1 сервопривода связан с одной стороны с коробкой КП, которая рычагами соединена с регулирующим органом теплового двигателя. С другой стороны он соединен с контактными движками Дв1 и Дв2 потенциометров R_1 и R_2 , включенных на источник тока

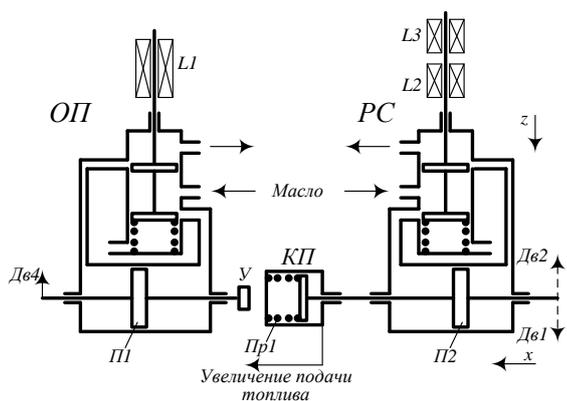
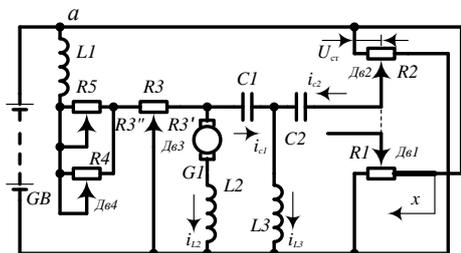


Рис. 8.4

постоянного напряжения, например, аккумуляторную батарею. Напряжение между движком Дв1 и минусом батареи является входным напряжением для усилителя цепи возбуждения генератора. В первых тепловозах по этой системе это напряжение приложено к обмотке управления электромашинного усилителя с поперечным полем (амплидина), в газотурбовозах и позднейших тепловозах – к обмотке управления магнитного усилителя в цепи возбуждения возбудителя.

Поршень П1 управляется золотником, на который действует снизу усилие пружины и сверху усилие электромагнита. При установившемся режиме работы двигатель-генератора отверстия золотника перекрыты. Ток катушки L_2 равен

$$i_{L2} = \frac{E_{G2}}{R_3 + R_p} = \frac{a_{G2} n_\omega}{R_3 + R_p} \quad (8.3)$$

где E_{G1} – ЭДС тахогенератора $G1$, приводимого от двигатель-генератора; a_{G2} – коэффициент, зависящий от параметров тахогенератора и передаточного отношения к валу теплового двигателя; R_3' – часть реостата, включенная в цепь тахогенератора; R_{L2} – сопротивление катушки L_2 и якоря тахогенератора.

Положению золотника, при котором отверстия его закрыты, соответствует определенное усилие пружины и уравновешивающее его усилие электромагнита и, следовательно, определенное значение тока катушки и установившейся угловой скорости.

При увеличении нагрузки генератора угловая скорость и ток катушки уменьшаются. Золотник перемещается вверх. Поршень П1 движется влево, увеличивая подачу топлива. Движок Дв1 скользит по контактной пластине и в цепь возбуждения подается наибольшее напряжение потенциометра, что соответствует максимальному возбуждению генератора.

Когда коробка КП касается упора У, увеличение подачи топлива прекращается. Если перегрузка теплового двигателя при этом еще не устранена, поршень П1 и движок Дв1 перемещаются дальше, вследствие чего уменьшается возбуждение генератора.

Процесс регулирования продолжается до тех пор, когда восстановится равновесие между двигателем и генератором и золотник перекроет оба отверстия. Последнее становится возможным, когда угловая скорость восстанавливает первоначальное значение. Отсюда вытекает, что угловая скорость, поддерживаемая регулятором, не зависит от положения исполнительного органа и регулятор является астатическим.

Настройка регулятора осуществляется движком Дв3, при перемещении которого вправо уменьшается сопротивление R_3' , что вызывает снижение установившейся угловой скорости, как это следует из равенства (8.3).

Для обеспечения устойчивой работы регулятора предусмотрена стабилизирующая катушка L_3 , присоединенная через конденсаторы $C1$ и $C2$ к тахогенератору и движку Дв2. При установившемся режиме ток в катушке равен нулю.

В процессе изменения угловой скорости и координаты x поршня П1 через конденсаторы и стабилизирующую катушку протекает ток. Рассмотрим уравнения переходного процесса.

Измерительным органом регулятора является электромагнит с тахогенератором, пружиной и золотником. Его работа описывается следующими уравнениями.

Уравнение цепи катушки L_2 (если пренебречь взаимоиндукцией между катушками L_2 и L_3)

$$a_{G2} n_\omega = i_{L2} R_{L2} + (i_p - i_{c1}) R_3' + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (8.4)$$

Ток в цепи катушки L_3 зависит от изменения напряжения на обкладках конденсаторов $C1$ и $C2$. Напишем уравнения для цепи конденсаторов $C1$ и $C2$ в соответствии с обозначениями на рис. 8.4:

$$E_{G2} = a_{G2}n_{\dot{o}} = L2\frac{di_{L2}}{dt} + i_{L2}R_{L2} + \int \frac{i_{c1}}{C_1}dt + L3\frac{di_{L3}}{dt} + R_{L3}i_{L3}; \quad (8.5)$$

$$U_{GB} = U_{L3} + R_{L3}i_{L3} + L3\frac{di_{L3}}{dt} + \int \frac{i_{c2}}{C_2}dt; \quad (8.6)$$

$$i_{c1} + i_{c2} = i_{L3}, \quad (8.7)$$

где R_{L3} – сопротивление стабилизирующей катушки; U_{GB} – напряжение источника тока.

При равномерной намотке провода на сопротивлении $R2$, пренебрегая влиянием тока в $C1$ на падение напряжения в $R2$ и принимая за начало отсчета координаты x исполнительного органа крайнее правое положение, соответствующее выключенной подаче топлива, при котором движок Дв2 находится на крайнем правом зажиме потенциометра $R2$, получим

$$U_{GB} = U_{cr} + b_{cr}x \quad (8.8)$$

где b_{cr} – постоянный коэффициент.

Продифференцировав равенства (8.5), (8.6) и (8.8), получим (при $U_{GB} = const$) уравнения:

$$a_{\tau} \frac{dn_{\dot{o}}}{dt} = L2\frac{d^2i_{L2}}{dt^2} + R_{L2}\frac{di_{L2}}{dt} + L3\frac{d^2i_{L3}}{dt^2} + R_{L3}\frac{di_{L3}}{dt} + \frac{i_{c1}}{C_1} \quad (8.9)$$

$$b_{cr} \frac{dx}{dt} = L3\frac{d^2i_{L3}}{dt^2} + R_{L3}\frac{di_{L3}}{dt} + \frac{i_{c2}}{C_2}. \quad (8.10)$$

Для обеспечения достаточной эффективности действия стабилизирующей катушки необходимо получить наибольший ток в ней при относительно малом ускорении двигатель-генератора и небольшой скорости поршня П1. Поэтому дроссели $L2$ и $L3$ следует выполнять с возможно меньшими индуктивностями и сопротивлениями. Если в первом приближении в уравнениях (8.9) и (8.10) пренебречь слагаемыми с параметрами дросселей в силу их малости, то с учетом равенства (8.7) уравнения в отклонениях для токов цепей дросселей $L2$ и $L3$ примут вид:

$$a_{\tau}C_1\frac{dn_{\dot{o}}}{dt} + b_{cr}C_2\frac{dx}{dt} = \Delta i_{c1} + \Delta i_{c2} = \Delta i_{L3} \quad (8.11)$$

$$\text{и } a_{\tau}\Delta n_{\dot{o}} = (R_{L2} + R'_{L3})\Delta i_{L2} - R'_{L3}i_{c1}. \quad (8.12)$$

Роль муфты в центробежном измерителе для данного регулятора выполняет золотник. Он находится под действием силы электромагнита $F_{эм}$ и поддерживающей силы F_n . В установившемся режиме работы золотник занимает положение z_n (рис. 8.5), и силы, действующие на него, уравниваются. Устойчивое равновесие отдельно взятого измерителя возможно, если крутизна характеристики поддерживающей силы больше крутизны характеристики электромагнита. Сила электромагнита, как правило, увеличивается при притяжении якоря, т. е. при опускании золотника. Если изменение воздушного зазора при перемещении золотника мало в сравнении с начальным зазором, электромагнит имеет пологую характеристику. Поддерживающая сила равна сумме веса частей, связанных с золотником, и силы пружины. Крутизна ее зависит главным образом от жесткости пружины.

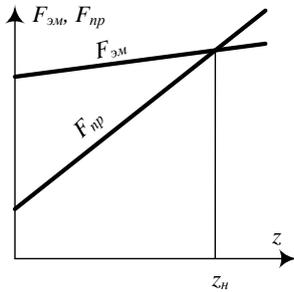


Рис. 8.5

В переходном процессе движение золотника описывается уравнением

$$m_3 \frac{d^2z}{dt^2} = F_{эм} - F_n - F_{mp}, \quad (8.13)$$

где m_3 – масса подвижных частей, связанных с золотником; F_{mp} – сила трения в золотнике и электромагните.

Сила электромагнита зависит нелинейно от токов в дросселях $L2$ и $L3$ и от положения якоря. При анализе линейное отклонение силы электромагнита можно представить в виде

$$\Delta F_{эм} = \frac{\partial F_{эм}}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}} \Delta i_{L2} + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}} \Delta i_{L3},$$

где $\frac{\partial F_{эм}}{\partial z}$, $\frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}}$, $\frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}}$ – определяются по опытным или расчетным характеристикам электромагнита для z_n .

Отклонение поддерживающей силы

$$\Delta F_n = \frac{\partial F_n}{\partial z} \Delta z.$$

С учетом вязкого и сухого трения силу трения можно представить в виде

$$F_{mp} = k_\kappa \frac{dz}{dt} + F_c \text{sign} \frac{dz}{dt}.$$

Подставив отклонения сил в равенство (8.69), получим уравнение движения золотника:

$$m_3 \frac{d^2 z}{dt^2} + k_\kappa \frac{dz}{dt} + \left(\frac{\partial F_n}{\partial z} - \frac{\partial F_{эм}}{\partial z} \right) \Delta z = \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}} \Delta i_{L2} + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}} \Delta i_{L3} + F_c \text{sign} \frac{dz}{dt}. \quad (8.14)$$

Сравнивая это уравнение с уравнением (3.3) центробежного измерителя, видно, что левые части их практически одинаковы, но в правой части уравнения (8.14) вместо отклонения угловой скорости имеются отклонения токов в катушках, связанных с угловой скоростью и координатой исполнительного органа уравнениями (8.4), (8.7), (8.9) и (8.10). Полная система уравнений измерительного органа достаточно сложна, т.к. состоит из пяти уравнений 7-го порядка.

Одним из достоинств рассматриваемой системы является отсутствие центробежных грузов, представляющих собой основную массу в центробежном измерителе, а также рычагов и шарниров, создающих дополнительную силу трения.

Для качественного приближенного анализа динамики измерителя примем массу и силы трения равными нулю. Тогда приближенное уравнение движения золотника получим в форме:

$$\left(\frac{\partial F_n}{\partial z} - \frac{\partial F_{эм}}{\partial z} \right) \Delta z = B \Delta z = \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}} \Delta i_{L2} + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}} \Delta i_{L3}. \quad (8.15)$$

Исключив из уравнений (8.11), (8.12) и (8.15) токи в катушках, получим приближенное уравнение измерителя

$$B \Delta z = \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}} \cdot \frac{a_r}{R_{L2} + R_3} \Delta n_\delta + \left(\frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L2}} \cdot \frac{R_3}{R_{L2} + R_3} + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}} \right) \cdot C_1 a_r \frac{dn_\delta}{dt} + \frac{\partial F_{эм}}{\partial i_{L3}} b_{ст} C_2 \frac{dx}{dt} \quad (8.16)$$

Приближенное уравнение (8.16) позволяет оценить влияние стабилизирующей катушки и конденсаторов на процесс регулирования. Первый член правой части представляет собой основное воздействие регулятора: при отклонении угловой скорости золотник открывает отверстие и регулятор начинает изменять подачу топлива или возбуждение генератора. Одной из главных причин возникновения колебаний в астатических регуляторах является перерегулирование, возникающее вследствие того, что в начале процесса регулирования, когда Δn_δ мало, проходное сечение золотника и скорость исполнительного органа также малы, что замедляет процесс уравнивания моментов двигателя и нагрузки и приводит к увеличению Δn_δ . Максимальные Δn_δ и скорость исполнительного органа достигаются, когда эти моменты уравниваются и, следовательно, исполнительный орган проходит положение нового установившегося режима.

Второй член представляет собой воздействие, находящееся в прямой зависимости от ускорения двигатель-генератора. Оно пропорционально разности моментов двигателя и генератора и, следовательно, является наибольшим в начале изменения режима двигателя или генератора. В процессе регулирования разность моментов уменьшается и при уравнивании двигатель-генератора это воздействие равно нулю. Таким образом, воздействие по производной увеличивает смещение золотника в начальный момент, ускоряя начало процесса уравнивания моментов двигателя и генератора, и замедляет скорость исполнительного органа при подходе к положению равновесия. Такое воздействие снижает динамическую ошибку, повышает быстродействие и степень устойчивости.

Третий член представляет собой гибкую обратную связь исполнительного органа с измерительным, аналогичную изодрому. При увеличении угловой скорости ($\Delta n_\delta > 0$) исполнительный орган перемещается в направлении уменьшения подачи топлива (или увеличения возбуждения). При этом $\frac{dx}{dt} < 0$ и обратная связь стремится уменьшить Δz и скорость исполнительного органа тем в

большей степени, чем больше эта скорость. Таким образом, обратная связь по перемещению исполнительного органа является отрицательной и замедляет процесс регулирования главным образом вблизи нового положения. Обе дополнительные связи действуют только в переходном процессе и не влияют на статические характеристики системы регулирования. Их эффективность зависит в основном от величин емкостей.

Механизм ограничения подачи топлива по конструкции аналогичен регулятору скорости, но имеет один дроссель LI , который последовательно с реостатами $R4$, $R5$ и $R3''$ включён на зажимы аккумуляторной батареи. Ток в ней

$$i_n = \frac{U_{GB}}{R_{LI} + R_3'' + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}}, \quad (8.73)$$

где R_{LI} – активное электрическое сопротивление дросселя LI .

При перемещении движка ДЗ вправо для снижения угловой скорости увеличивается часть реостата $R3''$, введенная в цепь дросселя LI . Ток в нём уменьшается, вследствие чего золотник поднимается под действием пружины и поршень П2 перемещается вправо, передвигая упор У и уменьшая предельную подачу топлива. Одновременно перемещается движок Д4, уменьшая сопротивление в цепи дросселя LI . Поршень П2 останавливается, когда восстанавливается первоначальное значение тока дросселя LI и золотник закрывает отверстия. Таким образом, каждому положению движка ДЗ соответствует определенное положение движка Д4 и упора У. Этим достигается изменение крутящего момента теплового двигателя в зависимости от изменения угловой скорости. Желательная зависимость $M_\theta(n_\theta)$ устанавливается настройкой сопротивлений $R4$, и $R5$.

Неравномерность регулирования определяется нечувствительностью измерительного органа – тахогенератора, электромагнита и золотника. Отклонения угловой скорости могут быть вызваны изменением магнитного потока тахогенератора и падением напряжения на щетках. Для снижения этих отклонений тахогенератор выполняется трехфазным с постоянными магнитами. Для питания катушки ток его выпрямляется по мостовой схеме. Выпрямитель может вносить некоторое отклонение тока вследствие изменения падения напряжения его в зависимости от приложенного напряжения и в результате старения. Изменение температуры катушки дросселя LI , мертвый ход и трение золотника также увеличивают неравномерность регулирования. Однако все эти отклонения могут быть сделаны достаточно малыми.

Достоинствами системы регулирования являются объединение регуляторов теплового двигателя и генератора в единую конструкцию, что избавляет от взаимной настройки их введение регулирования по производной, а также возможность установить практически любую желательную зависимость $M_\theta(n_\theta)$. С другой стороны, схема сложна. В связи с необходимостью управления несколькими локомотивами по системе многих единиц практически вместо движка ДЗ применяются реле, переключающие ступени сопротивления $R3$. В схеме тепловоза для получения восьми ступеней настройки регулятора использованы три четырехконтактных реле.



Выше указывалось, что для уменьшения кратности изменения напряжения генератора (или увеличения кратности изменения скорости при полной мощности дизеля) применяется ослабление поля тяговых электродвигателей и переключение группировок их. Как правило, эти операции по управлению тяговыми, электродвигателями осуществляются автоматически в зависимости от режима генератора или скорости движения. Во всех советских и большинстве зарубежных построенных тепловозах схемы управления тяговыми электродвигателями не связаны с системами автоматического регулирования генератора.

Переключение группировок двигателей на большее число параллельных цепей и переходы на ступени большего ослабления поля их целесообразно осуществлять, когда напряжение генератора приближается к максимальному значению» а обратные переходы – когда ток генератора, увеличиваясь, достигает величины, близкой к длительному току. Это справедливо, если дизель-генератор работает при полной мощности. При снижении его скорости напряжение и ток прямого и обратного перехода целесообразно снижать. При всех скоростях двигатель-генератора прямой переход осуществляется при возбуждении генератора близком к наибольшему, а обратный – при пониженном возбуждении. После каждого перехода ток возбуждения генератора должен измениться, т. е. система автоматического регулирования генератора (или система саморегулирования дизель-генератора) приходит в действие, изменяя ток возбуждения генератора.

В принципе возможно связать систему регулирования мощности двигатель-генератора со схемой управления тяговыми электродвигателями в одну систему объединенного регулирования теплового двигателя, генератора и тяговых электродвигателей. Такие системы применены на некоторых английских и французских тепловозах. В выполненных системах такого вида переключение группировок не применяется и объединенная система регулирования поддерживает постоянную мощность теплового двигателя путем изменения возбуждения генератора и тяговых электродвигателей при неизменной подаче топлива, а в режимах, когда вследствие ограничений по возбуждению генератора и тяговых электродвигателей электропередача не может полностью нагрузить тепловой двигатель, система регулирования последнего поддерживает постоянную скорость посредством изменения подачи топлива.

Каждому положению рукоятки контроллера управления, как и в других системах регулирования, соответствует настройка объединенного регулятора на определенную угловую скорость теплового двигателя. Ниже кратко рассмотрен принцип действия некоторых систем объединенного регулирования.

Схема объединенного регулирования с общим контроллером для возбуждения генератора и тяговых двигателей

На рис. 8.6 изображена в упрощенном виде принципиальная схема регулирования, примененная на некоторых английских тепловозах. На схеме показан один тяговый двигатель с двумя ступенями ослабления поля. В действительной схеме используется несколько двигателей с большим числом ступеней ослабления поля.

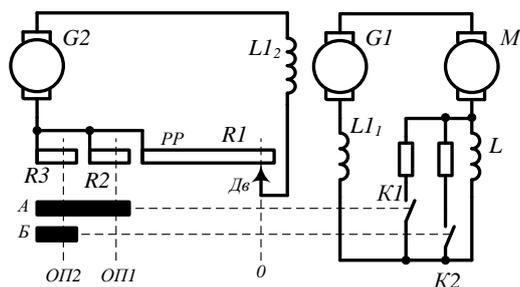


Рис.8.6

Регулятор мощности (PM) состоит из регулирующего реостата PP, включенного в цепь обмотки Н независимого возбуждения генератора, и кулачкового вала. Часть кулачковых шайб регулятора мощности служит для переключения ступеней регулирующего реостата. На схеме они условно представлены движком Дв реостата. Кулачковые шайбы (А и Б) используются для замыкания контактов, шунтирующих обмотки возбуждения тяговых двигателей. Число шайб для каждого двигателя равно числу ступеней ослабления поля и количество таких групп равно числу двигателей.

Кулачковый вал регулятора мощности получает вращение от гидравлического привода, управляемого штоком сервомотора регулятора дизеля.

Схема действует следующим образом. При пуске тепловоза кулачковый вал находится в положении 0, когда сопротивление $R1$ полностью введено в цепь обмотки возбуждения генератора (движок в крайнем правом положении). При повышении скорости движения поезда регулятор увеличивает возбуждение генератора (движок перемещается влево). Устройство, состоящее из трех электрогидравлических вентилей (на рис. 199 оно не показано), управляет скоростью поворота кулачкового вала так, что ток генератора поддерживается приблизительно постоянным. При этом регулятор дизеля увеличивает подачу топлива. Когда она становится максимальной, кулачковым валом регулятора мощности начинает управлять регулятор дизеля. Возбуждение генератора увеличивается по мере возрастания скорости движения за счет уменьшения сопротивления $R1$.

Если ток генератора продолжает уменьшаться, когда кулачек; вый вал выведет все сопротивление $R1$ то вал регулятора поворачивается дальше. При этом в цепь возбуждения генератора вводится небольшое сопротивление $R2$, а кулачковая шайба А включает первую ступень ослабления поля (закрывается контакт 1). Дальнейший разгон происходит опять за счет увеличения возбуждения генератора. После перехода положения максимального возбуждения генератора вводится сопротивление $R3$ и шайба Б замыкает контакт 2, т. е. происходит переключение на следующую ступень ослабления поля.

В случае увеличения тока генератора (например, при входе поезда на подъем) шток регулятора дизеля включает гидропривод регулятора мощности для движения в обратном направлении. Кулачковый вал сначала уменьшает возбуждение генератора, затем выключает последнюю ступень ослабления поля, одновременно увеличивая возбуждение генератора и т. д.

Преимуществом схемы является отсутствие дополнительных аппаратов и других элементов для управления тяговыми двигателями. Отпадает также необходимость настройки схемы управления двигателями, поскольку режим переключений задается кинематически на определенных положениях регулятора. Недостаток ее заключается в громоздкости регулятора мощности вследствие большого тока возбуждения генератора и наличия силовых контактов для шунтирования обмоток возбуждения двигателей.

Схема управления контакторами ослабления поля от объединенного регулятора дизель-генератора.

В качестве примера рассмотрим примененную на французских тепловозах серии 68000 схему (рис. 8.7), в которой регулятор мощности с 40 ступенями регулирующего реостата включен в цепь одной из двух независимых обмоток возбуждения генератора. На регуляторе имеются дополнительные контакты в положении максимального возбуждения (R_0) и некоторого промежуточного положения (R_{28}).

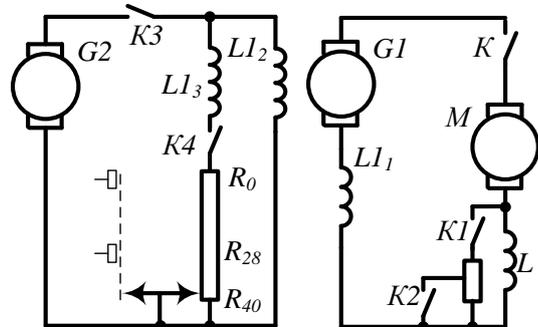


Рис. 8.7

Регулятор мощности приводится в действие от гидравлического сервомотора регулятора дизеля. Если подача топлива превышает величину, установленную для данной угловой скорости дизеля, движок регулятора мощности перемещается к R_0 , при пониженной подаче топлива – R_{40} . Когда при увеличении скорости движения поезда регулятор мощности, увеличивая возбуждение генератора, достигает положения R_0 , регулятор получает сигнал к перемещению движка в обратном направлении до положения R_{28} , где замыкание контакта дает сигнал к включению группового контактора 1 первой ступени ослабления поля всех двигателей. При дальнейшем увеличении скорости регулятор вновь достигает положения R_0 , и вновь получает сигнал к возвращению в положение R_{28} . При этом включается групповой контактор 2 второй ступени ослабления поля. Обратный переход осуществляется под действием реле тока. Когда ток генератора вследствие уменьшения скорости двигателя увеличивается до 2700 А (длительный ток равен 2640 А), контакты реле тока

При дальнейшем увеличении скорости регулятор вновь достигает положения R_0 , и вновь получает сигнал к возвращению в положение R_{28} . При этом включается групповой контактор 2 второй ступени ослабления поля. Обратный переход осуществляется под действием реле тока. Когда ток генератора вследствие уменьшения скорости двигателя увеличивается до 2700 А (длительный ток равен 2640 А), контакты реле тока

отключают контактор первой ступени ослабления поля. Ток генератора уменьшается, реле отпадает, но контактор не включается, если реостат не на положении R_{28} . Если при дальнейшем снижении скорости ток вновь достигает 2700 А, реле тока отключает контактор второй ступени ослабления поля;

На английских тепловозах применяется схема, где контакт на регуляторе мощности в положении максимального возбуждения включает серводвигатель контроллера управления, который управляет контакторами ступеней ослабления поля. В схеме используются четыре ступени ослабления поля.