

Лекция 2

1. Особенности условий автоматического регулирования и управления ЭПС.
2. Техничко-экономическая эффективность автоматизации процесса управления ЭПС.
3. Функциональные элементы САР ЭПС: задающие, промежуточные, датчики, объекты регулирования.

1

На работу систем автоматического управления ЭПС оказывают существенное влияние следующие факторы.

Высокий уровень возмущений, воздействующих на ЭПС и особенно на системы автоматики. К таким детерминированным возмущениям относятся: изменения нагрузки, нестабильность питающего напряжения, нестабильность температур, воздействие вибраций и динамических импульсов, электромагнитные помехи.

Разнообразие принципов оптимизации режимов тяги и торможения ЭПС.

Принцип наиболее полного использования мощности оборудования. Для электрооборудования его можно сформулировать в общем виде, как

$$\tau_{\text{макс}}(T) \rightarrow k_{\text{зт}} \tau_{\text{доп}},$$

где $\tau_{\text{макс}}(T)$ – максимальное превышение температуры над температурой окружающей среды в пределах рассматриваемого цикла работы T ; $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры для данного вида оборудования; $k_{\text{зт}} < 1$ – коэффициент запаса по превышению температуры.

Принцип минимального расхода энергии при выполнении заданного графика движения.

При этом должно выполняться условие

$$A_{\text{м}} \leftarrow A = (1/T) \int_0^{T_{\text{п}}} U_c idt \cong (U_c / T_{\text{п}}) \int_0^{T_{\text{п}}} idt; \quad T_{\text{п}} = T_{\text{пз}}$$

где A и A_M – соответственно выполненный и минимальный расход энергии; $T_{пз}$ и $T_{п}$ – соответственно заданное и действительное время хода по перегону.

Этот принцип применяют наиболее часто.

Принцип реализации максимальной пропускной способности участка (наибольшей скорости). Он может быть сформулирован как

$$T_{п\text{мин}} \leftarrow T_{п} = \int_0^L \frac{dl}{v}$$

где $T_{п\text{мин}}$ – минимальное время движения на перегоне; L – длина перегона.

Один из вариантов этого принципа – регулирование заданной постоянной ходовой скорости v_x :

$$v_i \rightarrow v_x = k_{3v} v_{\text{макс}} = \text{const},$$

где $v_{\text{макс}}$ – максимальная допустимая скорость (конструкционная скорость подвижного состава); $k_{3v} < 1$ – коэффициент запаса по скорости.

Принцип полного использования эксплуатационных ограничений. Он предусматривает

выбор режимов работы на границе допустимых предельных значений (ограничений) показателей процессов в условиях эксплуатации. К ним относятся ограничения по перегрузочной способности различных элементов оборудования, например, тяговых двигателей (прямая 1 на рис. 11), по сцеплению (кривая 2), по потенциальной устойчивости – коммутации (кривая 3) и по предельной скорости $v_{\text{макс}}$ (прямая 4).

Работе локомотива при использовании этого принципа оптимизации соответствует на рис. 11 тонкая линия А.

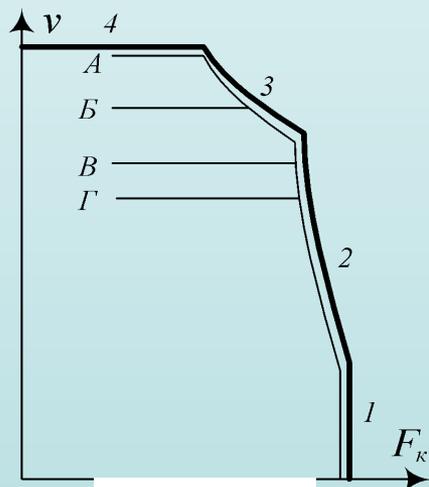


Рис. 11

Комбинированный принцип оптимизации. Он заключается в совмещении нескольких принципов, отмеченных ранее. Например, принцип постоянства скорости или принцип минимального расхода энергии может быть совмещен с принципом использования ограничений в различные моменты движения. Работе локомотива при совмещении принципа постоянства скорости с принципом использования ограничений соответствуют тонкие линии Б, В, Г (см. рис. 11). По-видимому, комбинированные принципы оптимизации наиболее универсальны и приемлемы в общих случаях.

Синхронизация работы САР ЭПС необходима при работе ЭПС по системе многих единиц. Отсутствие синхронизации может вызывать недопустимые перегрузки элементов оборудования отдельных локомотивов и другие неблагоприятные явления.

 Рассмотрим проявления технико-экономической эффективности при различных уровнях автоматизации ЭПС:

1. Автоматическое управление в режиме тяги позволяет улучшить тяговые свойства локомотива: плавное регулирование силы тяги взамен ступенчатого позволяет увеличить расчетный коэффициент сцепления на 5...8 %.
2. Автоматизация управления торможением дает возможность повысить скорость движения поезда за счёт большей точности управления, а электрическое торможение – снизить расход электроэнергии и износ тормозных колодок. Без автоматического регулирования невозможно функционирование рекуперативного торможения на переменном токе.
3. Автоматизация вспомогательных устройств локомотива позволяет снизить расход электроэнергии на вспомогательные нужды, использовать более компактные и надежные устройства.
4. Эффективность автоведения поездов проявляется в увеличении провозной и улучшении использования пропускной способности участков и сопровождается уменьшением расхода электроэнергии на тягу поездов за счёт выбора оптимальных режимов движения.

5. На некотором уровне автоматизации возможно сокращение состава локомотивной бригады. При сопряженном автоматическом телеуправлении поездами возможно существенно снизить трудовые затраты персонала, обслуживающего управление движением (диспетчеры движения и др.), системы тягового электроснабжения и т.д.

6. Автоматизация управления ЭПС благодаря снижению возмущений, воздействующих на основные его подсистемы даёт возможность повысить ремонтпригодность, снизить удельную ремонтёмкость и затраты на техническое обслуживание.

3

Функциональная схема системы автоматики представляет собой её графическое изображение, подразделяющее рассматриваемую систему на элементы, выполняющие типовые функции. **Элементом** называют конструктивно обособленную часть автоматической системы, выполняющую определенные функции.

Элементы различают по принципам действия (электромеханические, электромашинные, электромагнитные, пневматические, полупроводниковые, электронные и т. п.), по исполнению (общепромышленные, тяговые и т.п.), по конструкции, а также по функциональному назначению.

В зависимости от назначения различают следующие элементы:

- *задающий элемент* (задатчик), с помощью которого в САР вводят сигнал g , пропорциональный заданному значению регулируемой величины y ;
- *программный элемент*, обеспечивающий изменение задаваемого значения g^* регулируемой величины y по установленной программе;
- *чувствительный элемент*, предназначенный для ввода в САР сигнала z , пропорционального текущему значению регулируемой величины y , а также сигналов q_i^* , характеризующих уровень возмущений q ;
- *элемент сравнения*, выполняющий сравнение сигналов, пропорциональных заданному

и текущему значению регулируемой величины, для выявления ошибки или рассогласования $\Delta = g - z$;

- *управляющий элемент*, формирующий управляющее воздействие x в зависимости от значения рассогласования Δ или от сигнала q_i^* , пропорционального возмущению;
- *исполнительный элемент*, осуществляющий регулирующее воздействие μ на объект регулирования;
- *промежуточный элемент*, выполняющий необходимое промежуточное преобразование сигнала.

Совокупность чувствительного, управляющего, исполнительного и промежуточных элементов, а также элемента сравнения представляет собой автоматический регулятор (АР).

Ввиду большого разнообразия промежуточных элементов их подразделяют дополнительно на *усилительные, преобразовательные, логические и вычислительные.*

Сравним упрощенную схему управления автоматическим пуском электропоезда (рис. 12а) и соответствующую ей функциональную схему (рис. 12б). Функции исполнительного элемента ИЭ выполняет реостатный контроллер РК, коммутирующий ступени пускового реостата R_{Π} секции вторичной обмотки тягового трансформатора или реостата ослабления возбуждения, а также изменяющий группировки тяговых двигателей ТД, которые являются объектом регулирования ОР. Роль задающего элемента ЗЭ выполняет пружина ВП реле ускорения РУ, с помощью которой регулируется уставка наименьшего значения пускового тока I_M .

Чувствительным элементом ЧЭ является силовая катушка С реле ускорения, а элементом сравнения – якорь Я магнитопровода М, к которому приложены сила возвратной пружины $P_{ВП}$ и электромагнитная сила P_{Σ} зависящая от суммы магнитодвижущих сил (м.д.с.) $F_{НС}$ и $F_{НП}$ силовой С и подъемной П катушек.

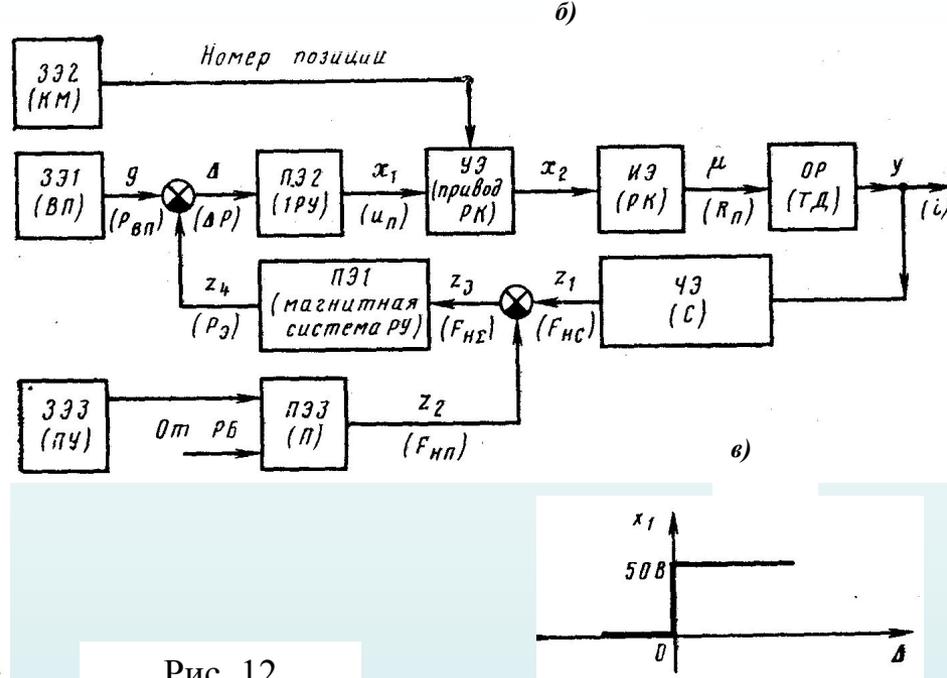
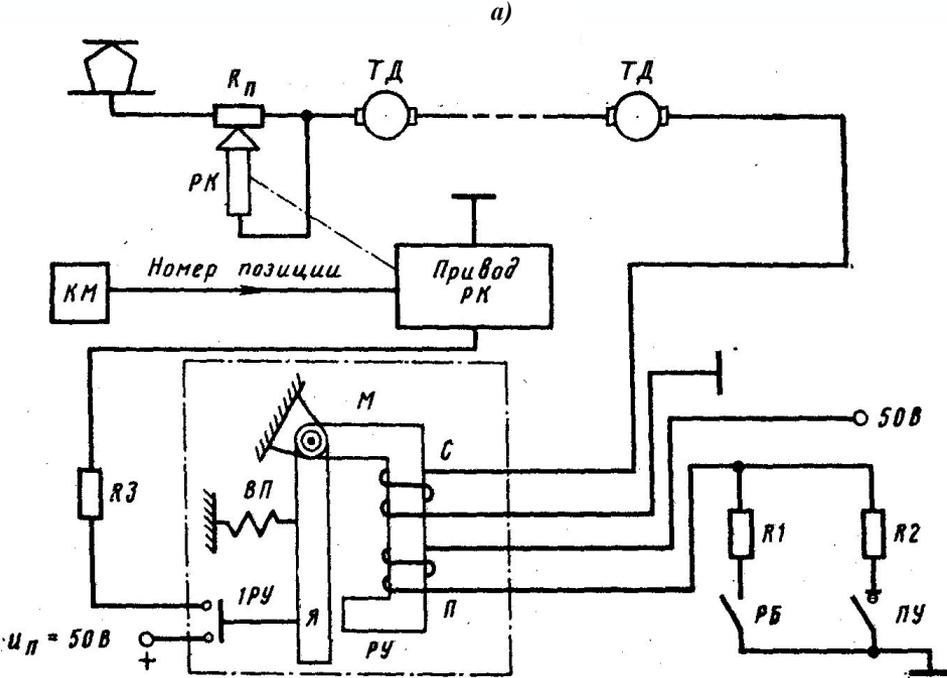


Рис. 12

Преобразование м.д.с. в электромагнитную силу $P_{\text{Э}}$, происходит в магнитной системе $РУ$. На схеме, приведенной на рис. 12б, этому соответствует промежуточный элемент $ПЭ1$.

После окончания перехода на очередную реостатную позицию ток i в силовой катушке по мере увеличения скорости уменьшается, и когда он становится равным $I_{\text{М}}$ якорь $Я$ реле ускорения под действием разности сил ΔP отпадает и замыкает контакты $ИРЧ$ цепи питания привода $РК$. Эти контакты следует рассматривать как промежуточный элемент $ПЭ2$, имеющий характеристику, приведенную на рис. 12в. При подаче напряжения питания и привод $РК$ переключает реостатный контроллер на следующую позицию, в результате чего ток двигателя скачком возрастает, и якорь $Я$ притягивается к магнитопроводу $М$, размыкая контакты $ИРЧ$.

Машинист имеет возможность задавать с помощью контроллера $КМ$ (задающий эле-

мент 3Э2) позицию привода исполнительного элемента PK , на которой должен закончиться процесс пуска. Кроме того, машинист может изменять значение I_M , меняя напряжение питания катушки $П$ с помощью кнопочного выключателя $ПУ$ (задающий элемент 3Э3). Изменение уставки происходит также при буксовании, когда реле буксования $РБ$ замыкает свой контакт в цепи катушки $П$.

В общем случае *объектом регулирования в системах автоматизации ЭПС является поезд*, а конечной регулируемой величиной – параметры, характеризующие его перемещение, т.е. скорость v , путь l или время хода t .

Однако в ряде частных случаев регулируемой величиной может быть сила тяги или ток тяговых двигателей. Поэтому целесообразно в общем случае рассмотреть объект регулирования в виде функциональной цепочки, в которой первые два блока соответствуют электромагнитным процессам в тяговом двигателе, а другие два блока – механическим процессам в тяговой передаче и собственно в поезде как в механической системе (рис. 13а).

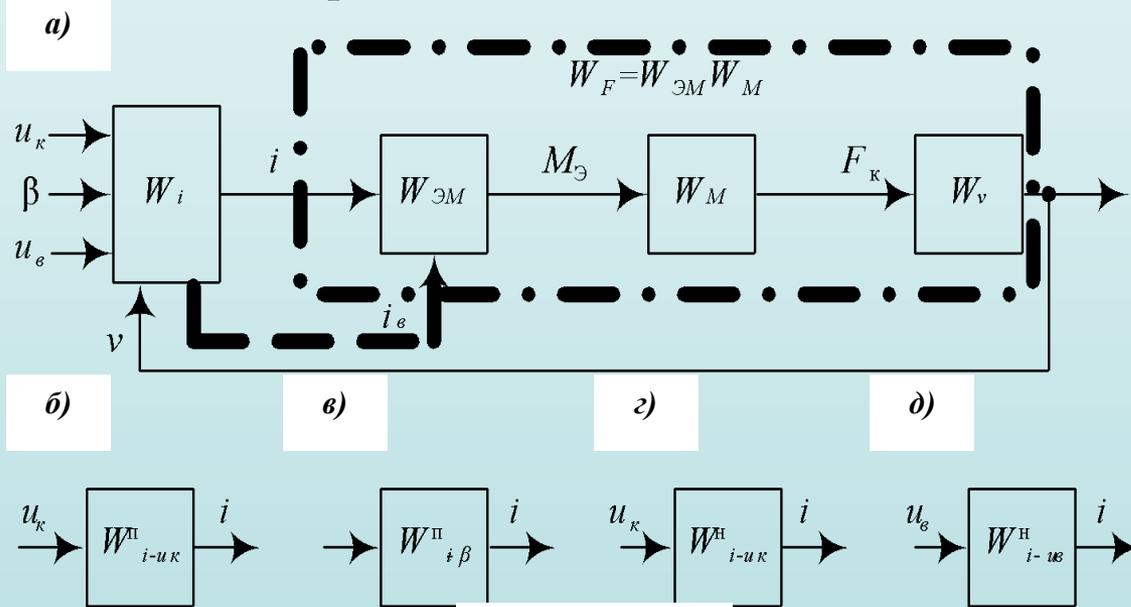


Рис. 13

Вначале целесообразно рассмотреть только электромагнитные процессы (блок W_i), описываемые дифференциальными уравнениями в схеме замещения двигателя, содержащей только сосредоточенные элементы (активное сопротивление r , индуктивность l , источник – ЭДС).

Т.К. скорость протекания электромагнитных процессов на порядок выше скорости протекания

механических, то электромагнитные процессы можно рассматривать при неизменной скорости поезда $v = const$.

Если рассматривать тяговый двигатель последовательного возбуждения с электромагнитным моментом $M_{\text{э}}$ и силой тяги $F_{\text{к}}$, то для него возможны два способа регулирования, когда входной величиной являются соответственно напряжение питания $u_{\text{к}}$ (рис. 13б) или коэффициент регулирования м.д.с. β (рис. 13в).

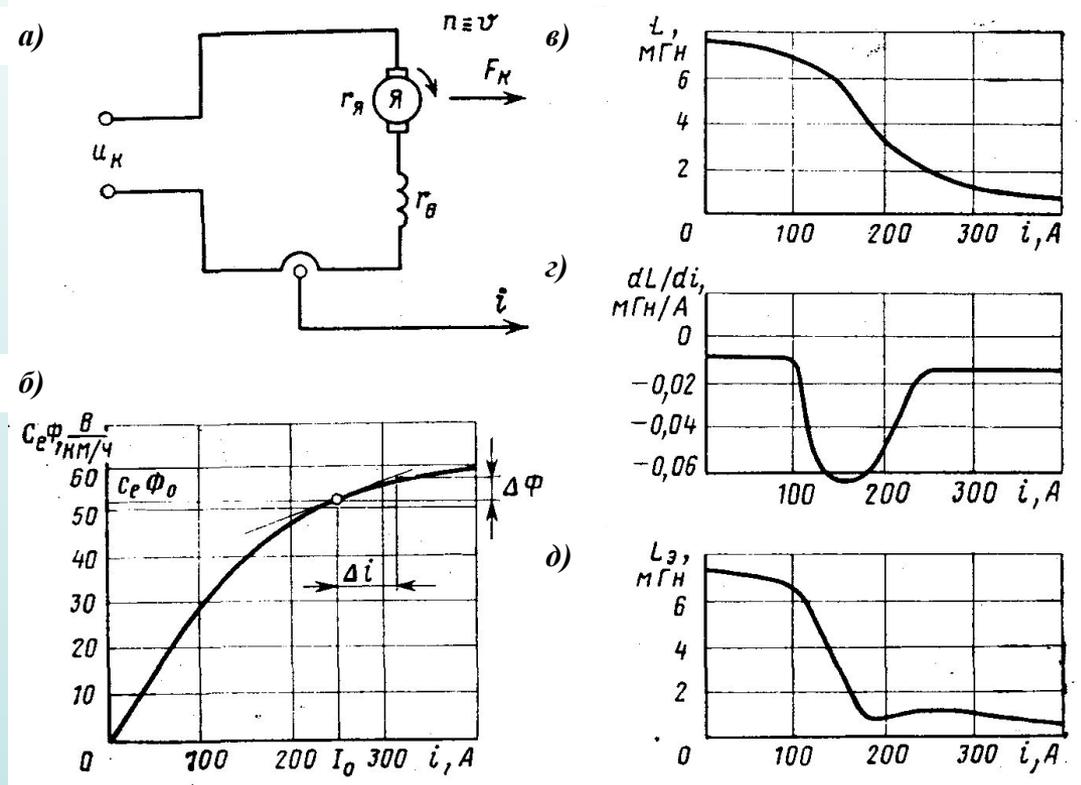


Рис. 14

Для двигателя независимого возбуждения тоже имеются два способа регулирования: по напряжению питания якорной обмотки $u_{\text{к}}$ (рис. 13з) и по напряжению питания обмотки возбуждения $u_{\text{в}}$ (рис. рис. 13д).

Тяговый двигатель последовательного возбуждения, регулируемый по напряжению (рис. 14а) может быть описан нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{d\psi}{dt} + ri = u_{\text{э}} - \dot{a},$$

где ψ – потокосцепление; r – сопротивление обмоток двигателя; $u_{\text{к}}$ – приложенное к двигателю напряжение; e – ЭДС.

При этом ψ , может быть условно представлено как $\psi = Li = w_{\text{в}} \Phi$ где $w_{\text{в}}$ – количество витков обмотки возбуждения.

Индуктивность двигателя L сильно зависит от тока, а ЭДС определяется выражением $e=c_e \Phi v$, где величина $c_e \Phi$ представляет собой существенно нелинейную характеристику. Таким образом, L и e являются нелинейными функциями тока. На рис. 14б и в показан характерный вид функции $c_e \Phi(i)$ и $L(i)$. Исходное нелинейное выражение целесообразно записать в виде

$$\frac{d}{dt}(Li) + ri = u_{\hat{e}} - c_e \hat{O} v,$$

где выражение в скобках следует продифференцировать как произведение двух переменных, в результате чего получим

$$\left(L + i \frac{dL}{di} \right) \frac{di}{dt} + ri = u_{\hat{e}} - c_e \hat{O} v.$$

В этом уравнении выражение в скобках представляет собой эквивалентную индуктивность нелинейной схемы замещения L_3 , которая может быть вычислена по характеристике $L(i)$ (рис. 14в) при помощи производной dL/di (рис. 14г). Характерная зависимость $L_3(i)$ приведена на рис. 14д.

Расчеты процессов регулирования с учетом нелинейностей сводятся к решению полученного уравнения методом малых отклонений заключающегося в том, что в качестве исходного рассматривается стационарное состояние системы, характеризующееся неизменными параметрами v_0 , $U_{к0}$, I_0 и Φ т.е.

$$rI_0 = U_{к0} - c_e \Phi v_0.$$

Далее задаются малым отклонением входной величины $\Delta u_{\kappa}(t)$, которое вызывает отклонение выходной величины $\Delta i(t)$ (рис. 15а). При этом в окрестности выбранной базовой точки имеем $L_{30} \approx const$, а зависимость магнитного потока (или ЭДС) от тока считают линейной, т.е.

$$\hat{O} = \hat{O}_0 + \Delta i \frac{d\hat{O}}{di} = \hat{O}_0 + \hat{e}_0 \Delta i.$$

ПОСКОЛЬКУ

$$\Delta v = 0 \quad \text{è} \quad e_0 + \Delta e = c_e (\hat{O}_0 + \hat{e}_{\hat{O}} \Delta i),$$

ТО

$$L_{y\hat{i}} \frac{d}{dt} (I_0 + \Delta i) + r(I_0 + \Delta i) = (U_{\hat{e}0} + \Delta \dot{e}_{\hat{e}}) - c_e (\hat{O}_0 + \hat{e}_{\hat{O}} \Delta i) v_0.$$

Вычитая из этого уравнения приведенное ранее уравнение стационарного режима для базовой точки и учитывая, что

$$\frac{d}{dt} (I_0 + \Delta i) = \frac{d}{dt} \Delta i,$$

ПОЛУЧИМ

$$L_{y\hat{i}} \frac{d}{dt} \Delta i + r \Delta i = \Delta \dot{e}_{\hat{e}} - c_e \hat{e}_{\hat{O}} \Delta i v_0$$

или в операторной форме

$$(L_{y\hat{i}} p + r \Delta i + c_e \hat{e}_{\hat{O}} v_0) \Delta i(p) = \Delta \dot{e}_{\hat{e}}(p),$$

что позволяет записать передаточную функцию в виде

$$W_{i-u_{\hat{e}}}^{\ddot{i}} = \frac{\Delta i(p)}{\Delta u_{\hat{e}}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)W_3(p)} = \frac{\hat{e}_{i-u_{\hat{e}}}^{\ddot{i}}}{1 + \hat{O}_{i-u_{\hat{e}}}^{\ddot{i}} \check{\delta}},$$

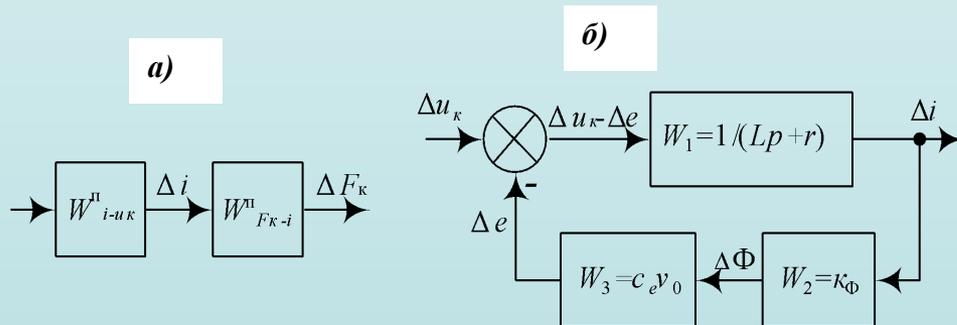


Рис. 15

где $\kappa_{i-u_{\kappa}}^{\ddot{i}} = 1/(r + c_e \kappa_{\Phi} v)$

и $T_{i-u_{\hat{e}}}^{\ddot{i}} = L_{y0} / (r + c_e \hat{e}_{\hat{O}} v)$.

Структурная схема двигателя, соответствующая передаточной функции, приведена на рис. 15б.

Двигатель последовательного возбуждения с регулированием м.д.с. (рис. 16а) опи-

сывается уравнением в отклонениях

$$L_{y1} \frac{d}{dt} (I_0 + \delta i) + r_y (I_0 + \Delta i) = U_{\hat{e}0} + \Delta \dot{e}_{\hat{e}} - c_e (\hat{O}_0 + \hat{e}_{\hat{O}} \Delta i) v_0,$$

где $r_{\Sigma} = \beta r_B + r_{\Sigma}$ – эквивалентное сопротивление двигателя при регулировании м.д.с.

Поскольку $\beta = \beta_0 + \Delta\beta$, то $r_{\Sigma} = (\beta_0 + \Delta\beta)r_B + r_{\Sigma}$. Приращение тока возбуждения $i_B = \beta i$ можно выразить по формуле полного дифференциала в виде

$$\Delta i_B = \Delta i \beta + \Delta \beta I_0.$$

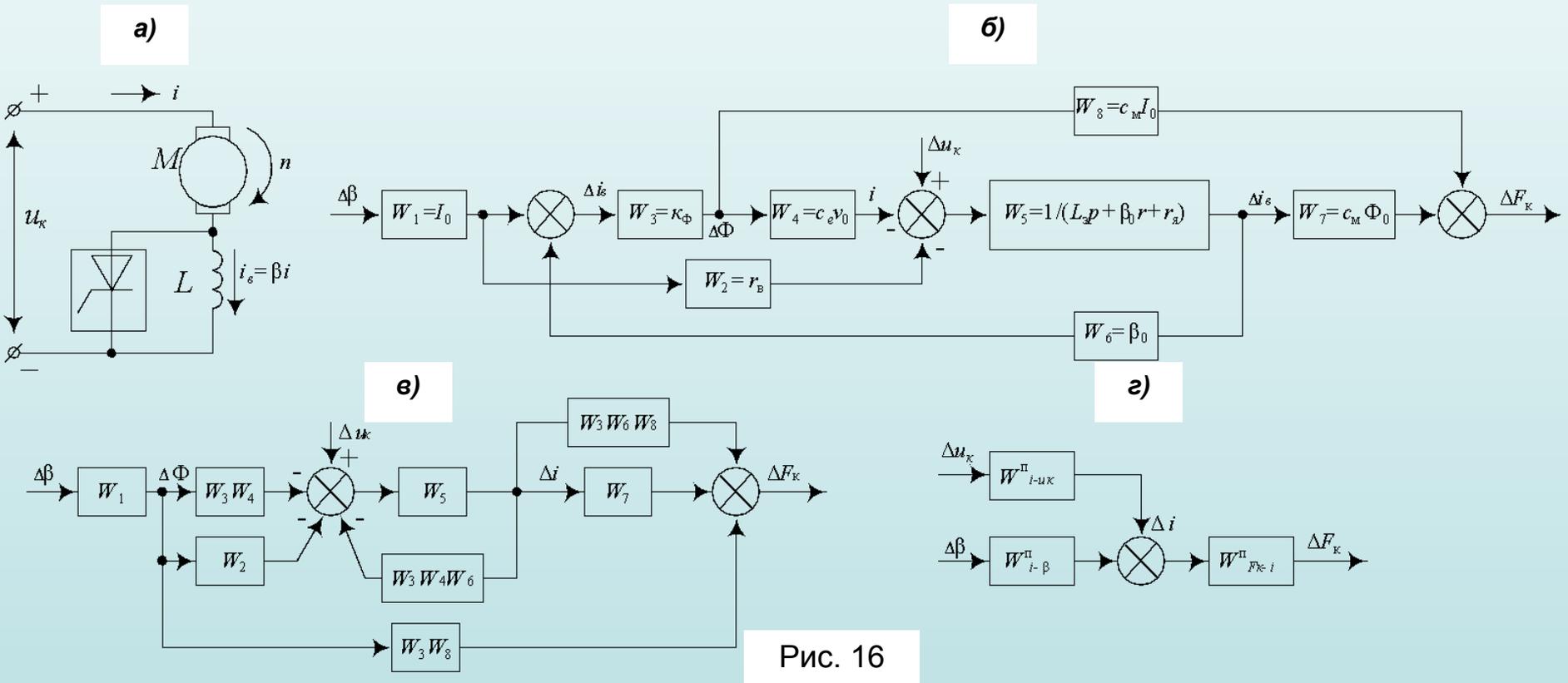


Рис. 16

Подставляя выражения для $r_{\dot{\gamma}}$ и $\Delta i_{\dot{\beta}}$ в уравнение и пренебрегая величинами второго порядка малости типа $\Delta i \Delta \beta$ или Δi_2 получим окончательно:

$$L_{\dot{\gamma}} \frac{d\Delta i}{dt} + I_0 r_{\dot{\alpha}} \Delta \beta + \beta_0 r_{\dot{\alpha}} \Delta i + r_{\dot{\gamma}} \Delta i = \Delta \dot{e}_{\dot{\epsilon}} - c_e \hat{e}_{\dot{\delta}} v_0 (\beta_0 \Delta i + I_0 \Delta \beta),$$

что после применения операционного метода дает возможность составить структурную схему (рис. 16б).

Преобразовав эту схему по известным правилам, к виду, показанному на рис. 16в и г, найдём передаточные функции тягового двигателя по регулируемому воздействию $\Delta \beta(p)$, т.е.

$$W_{i-\beta}^i = -W_1(p)[W_2(p) + W_3(p)W_4(p)] \frac{W_5(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p)} =$$

$$= -I_0 \frac{r_{\dot{\alpha}} + c_e \hat{e}_{\dot{\delta}} v_0}{L_{\dot{\gamma}} p + \beta_0 r_{\dot{\alpha}} + r_{\dot{\gamma}} + c_e \hat{e}_{\dot{\delta}} \beta_0 v_0};$$

$$W_{i-u_{\dot{\epsilon}}}^i = \frac{W_5(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p)} = \frac{1}{L_{\dot{\gamma}} p + \beta_0 r_{\dot{\alpha}} + r_{\dot{\gamma}} + c_e \hat{e}_{\dot{\delta}} \beta_0 v_0}.$$

Эти передаточные функции соответствуют апериодическим звеньям 1-го порядка.

Двигатель независимого возбуждения, регулируемый по напряжению на якорной обмотке (рис. 17а и б), описывается уравнением в отклонениях

$$L_{\dot{\gamma}\dot{\gamma}} \frac{d\Delta i}{dt} + r_{\dot{\gamma}} \Delta i = \Delta \dot{e}_{\dot{\epsilon}} - \Delta e,$$

которое соответствует уравнению двигателя последовательного возбуждения для случая $\Phi = const$ и $v = const$. Из этого уравнения получим передаточную функцию в виде, соответст-

вующем инерционному звену 1-го порядка, т. е.

$$W_{i-u_{\hat{e}}}^i = \frac{\hat{e}_{i-u_{\hat{e}}}^i}{T_{i-u_{\hat{e}}}^i p + 1},$$

при этом $\hat{e}_{i-u_{\hat{e}}}^i = 1 / r_{\hat{y}}; \quad \dot{O}_{i-u_{\hat{e}}}^i = L_{\hat{y}\hat{y}} / r_{\hat{y}}.$

Структурные схемы двигателя даны на рис. 17в и г.

В двигателе независимого возбуждения, регулируемого по цепи возбуждения (рис. 18а), процессы описываются системой уравнений в отклонениях:

$$\left. \begin{aligned} L_{\hat{y}\hat{y}} \frac{d\Delta i_{\hat{y}}}{dt} + r_{\hat{y}} \Delta i_{\hat{y}} &= \Delta \hat{e}_{\hat{e}} - c_e \hat{e}_{\hat{O}} v_0 \Delta i_{\hat{a}}; \\ L_{\hat{a}\hat{y}} \frac{d\Delta i_{\hat{a}}}{dt} + r_{\hat{a}} \Delta i_{\hat{a}} &= \Delta \hat{e}_{\hat{a}}. \end{aligned} \right\}$$

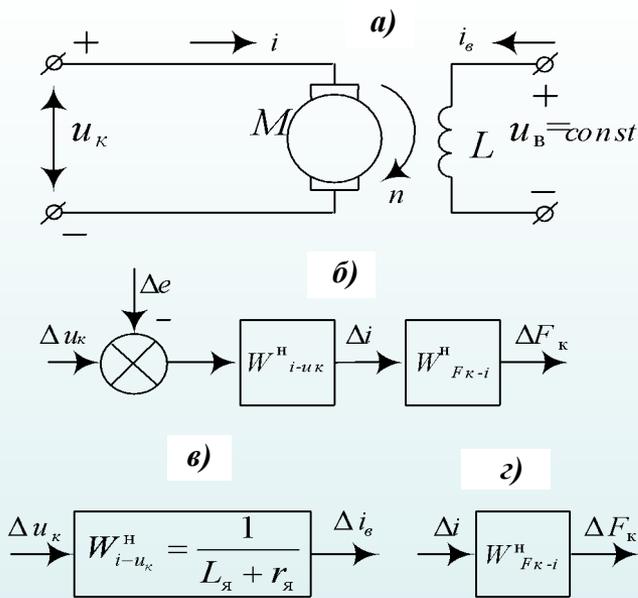


Рис. 17

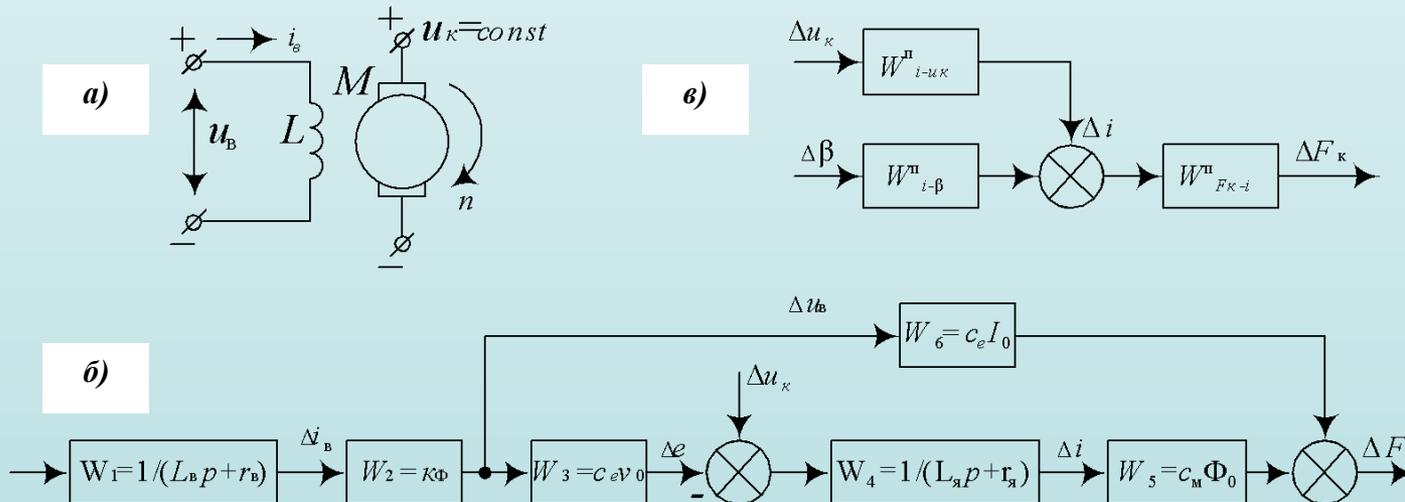


Рис.18

Структурная схема для этого варианта (рис. 18б) может быть преобразована к виду, приведённому на рис. 18в, а передаточные функции по регулирующему и возмущающему воз-

действиям определяются выражениями:

$$W_{i-u_{\hat{a}}}^i = W_1(p)W_2(p)W_4(p) = \frac{c_e \hat{e}_{\hat{O}} v_0}{(L_{\hat{a}} p + r_{\hat{a}}) + (L_{\hat{y}} p + r_{\hat{y}})} = \frac{\hat{e}_{i-u_{\hat{a}}}^i}{(\hat{O}_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad W_{i-u_{\hat{e}}}^i(p) = \frac{\hat{e}_{i-u_{\hat{e}}}^i}{\hat{O}_2 p + 1},$$

$$\text{где } \hat{e}_{i-u_{\hat{a}}}^i = \frac{c_e \hat{e}_{\hat{O}} v_0}{r_{\hat{y}} r_{\hat{a}}}, \quad \hat{e}_{i-u_{\hat{e}}}^i = \frac{1}{r_{\hat{y}}}, \quad T_1 = \frac{L_{\hat{a}\hat{y}}}{r_{\hat{a}}}, \quad \hat{O}_2 = \frac{L_{\hat{y}\hat{y}}}{r_{\hat{y}}}.$$

При дальнейшем анализе структурной цепочки (см. рис. 6.2a) целесообразно объединить элементы $W_{\text{ЭМ}}(p)$ и $W_{\text{М}}(p)$ и рассматривать сразу преобразование тока i в силу тяги $F_{\text{кв}}$ соответствии с выражением

$$F_{\text{к}} = c_{\text{М}} \Phi i,$$

где $c_{\text{М}}$ – электромеханическая постоянная.

Для базовой точки

$$F_{\text{к0}} = c_{\text{М}} \Phi_0 I_0.$$

С учетом малого отклонения входной величины

$$F_{\text{к0}} + \Delta F_{\text{к}} = c_{\text{М}} (\Phi_0 + \Delta \Phi) (I_0 + \Delta i).$$

Преобразуем это уравнение к виду

$$F_{\text{к0}} + \Delta F_{\text{к}} = c_{\text{М}} (\Phi_0 + k \Phi \Delta i) (I_0 + \Delta i)$$

Вычитая из последнего уравнения уравнение стационарного режима для базовой точки, получим

$$\Delta F_{\text{к}} = c_{\text{М}} (\Phi_0 \Delta i + k \Phi I_0 \Delta i + k \Phi \Delta i^2)$$

Слагаемым с Δi^2 можно пренебречь как величиной второго порядка малости. Тогда окончательно получим

$$\Delta F_{\text{к}} = c_{\text{М}} (\Phi_0 + k \Phi I_0) \Delta i,$$

что дает передаточную функцию в виде

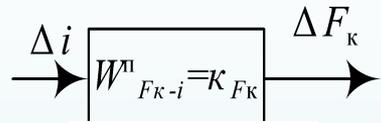


Рис. 19

$$W_{F_{\hat{e}}-i}^{\ddot{i}} = \frac{\Delta F_{\hat{e}}(p)}{\Delta i(p)} = c_1 (\hat{O}_0 + \hat{e}_{\hat{O}} I_0) = \hat{e}_{F_{\hat{e}}},$$

т.е. для выбранной базовой точки передаточная функция представляет постоянный коэффициент (рис. 19).

Для двигателя последовательного возбуждения с регулированием м.д.с. (рис. 16) на изменения F_k будут влиять как изменения тока i , так и изменения магнитного потока Φ , поэтому выражение для ΔF_k может быть выражено в операторной форме

$$\Delta F_{\hat{e}}(p) = W_7(p) \Delta i(p) + W_8(p) \Delta \hat{O}(p), \quad W_7(p) = c_1 \hat{O}_0, \quad W_8(p) = c_1 I_0$$

Для определения передаточной функции воспользуемся преобразованиями структурной схемы, приведенными на рис. 16, из которых

$$\begin{aligned} W_{F_{\hat{e}}-i}(p) &= W_7(p) + W_3(p)W_6(p)W_8(p) + \frac{W_3(p)W_8(p)[1 + W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p)]}{[W_2(p) + W_3(p)W_4(p)]W_5(p)} = \\ &= c_1 \left[\hat{O}_0 + \frac{\hat{e}_{\hat{O}} I_0 (L_{\dot{y}} p + \beta_0 r_{\dot{a}} + r_{\dot{y}} + c_e \hat{e}_{\hat{O}} \beta_0 v_0)}{r_{\dot{a}} + c_e \hat{e}_{\hat{O}} v_0} \right]. \end{aligned}$$

Для тягового двигателя независимого возбуждения, регулируемого по напряжению (рис. 17а), при постоянном магнитном потоке имеет место пропорциональная зависимость $F_k = c_m \Phi_0 i$, так что

$$W_{F_{\hat{e}}-i}^i(p) = c_1 \hat{O}_0,$$

т.е. передаточная функция соответствует постоянному коэффициенту как это показано на рис. 17г.

Для двигателя независимого возбуждения, у которого входной величиной является на-

пряжение на обмотке возбуждения Δu_b (рис. 18а), преобразование $\Delta\Phi$ и Δi в ΔF_k аналогично рассмотренному на рис. 16в. Перенося, как и в том случае, точку разветвления с выхода звена $W_2(p)$ на выход $W_4(p)$, получим передаточную функцию для рассматриваемого варианта:

$$W_{F_{\hat{e}-i}}(p) = W_5(p) + \frac{W_6(p)}{W_3(p)W_4(p)} = c_1 \left[\hat{O}_0 + \frac{I_0}{c_e v_0} (L_{\ddot{y}} \ddot{\delta} + r_{\ddot{y}}) \right].$$

Последний элемент в схеме объекта регулирования W_v (см. рис. 15а) реализует преобразование, описываемое уравнением движения поезда

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{1 + \gamma} \left[\frac{F_{\hat{e}}}{m} - (w_0 + w_{\ddot{a}}) \right],$$

где m – масса поезда; w_0 – основное удельное сопротивление движению; $w_{\ddot{a}}$ – дополни-тельное сопротивление от уклонов и кривых.

Уравнение движения в малых отклонениях имеет вид

$$\frac{d}{dt} \Delta v = \frac{1}{1 + \gamma} \left[\frac{\Delta F_k}{m} - \Delta w_0 - \Delta w_{\ddot{a}} \right]$$

Поскольку $w_0 = a_0 + a_1 v + a_2 v^2$, то $\Delta w_0 = (a_1 + 2a_2 v_0) \Delta v$. С учётом этого уравнение в отклонениях примет вид:

$$\frac{d}{dt} \Delta v = \frac{1}{1 + \gamma} \left[\frac{\Delta F_k}{m} - (a_1 + 2a_2 v_0) \Delta v - \Delta w_{\ddot{a}} \right]$$

или в операторной форме записи

$$p\Delta v = \frac{1}{1+\gamma} \left[\frac{\Delta F_{\hat{e}}(p)}{m} - (a_1 + 2a_2 v_0)\Delta v(p) - \Delta w_{\hat{a}}(p) \right],$$

что соответствует структурной схеме, приведенной на рис. 20.

Преобразуем это уравнение к виду:

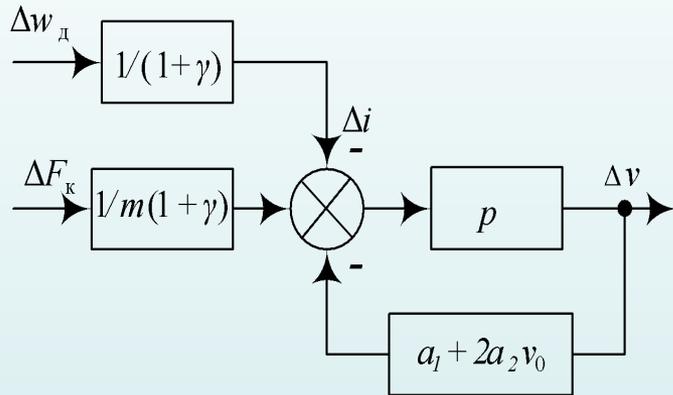


Рис. 20

$$p\Delta v + \frac{1}{1+\gamma} (a_1 + 2a_2 v_0)\Delta v(p) = \frac{1}{1+\gamma} \left[\frac{\Delta F_{\hat{e}}(p)}{m} - \Delta w_{\hat{a}}(p) \right]$$

или

$$\Delta v(p) = W_{v1}(p)\Delta F_k(p) - W_{v2}(p)\Delta w_d(p),$$

где $W_{v1}(p)$ и $W_{v2}(p)$ – передаточные функции поезда как механической системы. Причём:

$$W_{v1}(p) = \frac{\Delta v(p)}{\Delta F_{\hat{e}}(\delta)} = \frac{\hat{e}_{v1}}{1 + T_v p}; \quad W_{v2}(p) = \frac{\hat{e}_{v2}}{1 + T_v p};$$

$$\hat{e}_{v1} = \frac{1}{m(a_1 + 2a_2 v_0)}; \quad \hat{e}_{v2} = \frac{1}{a_1 + 2a_2 v_0}; \quad \dot{O}_v = \frac{1+\gamma}{a_1 + 2a_2 v_0}.$$

Таким образом, поезд как механическая система описывается передаточными функциями, соответствующими инерционному звену 1-го порядка. Следовательно, общая передаточная функция объекта регулирования (см. рис. 6.4a) может быть получена перемножением передаточных функций соответствующих блоков $W_i(p)$, $W_F(p)$, $W_v(p)$.