

## Оптимизация контура скорости с регулятором ЭДС

После оптимизации контура тока структурные схемы рис. 1.6 и 1.7 принимают вид, приведенный, соответственно, на рис. 1, а и 2, а. Если ЭДС двигателя не компенсирована и контур тока настроен без учёта ЭДС, то схемы рис. 1, а и 2, а будут упрощенными, не учитывающими внутреннюю обратную связь по ЭДС двигателя. Оптимизированный замкнутый контур тока в общем случае имеет следующую передаточную функцию

$$W(p)_{\text{Т зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \cdot b}{2 \cdot T_{\text{MTЭ}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{MTЭ}} \cdot p + 1},$$

где

$$b = \frac{1 + \frac{T_{\text{MT}}^2}{T_{\text{ЯЦ}}^2}}{\left(1 + \frac{T_{\text{MT}}}{T_{\text{ЯЦ}}}\right)^2}; \quad T_{\text{MTЭ}} = \frac{T_{\text{MT}}}{1 + \frac{T_{\text{MT}}}{T_{\text{ЯЦ}}}}.$$

При настройке контура тока с ПИ-регулятором следует принять  $b = 1$  и  $T_{\text{MTЭ}} = T_{\text{MT}}$ , при настройке контура тока с П-регулятором значения  $b$  и  $T_{\text{MTЭ}}$  определяются приведенными выше выражениями, а при настройке с компенсацией статической ошибки следует принять  $b = 1$ .

Если выполнить условия точной настройки обратной связи по ЭДС двигателя:

$$k_{\text{от1}} = \frac{k_{\text{ДН}} \cdot k_{\text{ОН}}}{k_{\text{ДТ}}} \cdot R_{\text{ДВ}} \text{ и } T_{\text{ФН}} = T_{\text{ДВ}}$$

– для схемы рис. 1.6;

$$k_{\text{от2}} = \frac{k_{\text{ДН}}}{k_{\text{ДТ}}} \cdot R_{\text{ДВ}} \text{ и } T_{\text{ФН}} = T_{\text{ДВ}}$$

– для схемы рис. 1.7

и ограничиться усечённой до первого порядка передаточной функцией замкнутого контура тока

$$W(p)_{\text{Т зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \cdot b}{2 \cdot T_{\text{MTЭ}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\text{MTЭ}} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \cdot b}{T_{\text{T}} \cdot p + 1},$$

где  $T_{\text{T}} = a_{\text{T}} \cdot T_{\text{MT}}$  – эквивалентная постоянная времени замкнутого оптимизированного контура тока, то структурные схемы рис. 1, а и 2, а преобразуются к виду, приведенному, соответственно, на рис. 1, б и 1, б.

Структурные схемы контура ЭДС с обратной связью по напряжению двигателя и ИР-компенсацией и с обратной связью по ЭДС двигателя отличаются

ся только коэффициентом обратной связи. Наличие апериодического звена в цепи обратной связи вызывает необходимость включения на входе контура апериодического звена (сглаживающего фильтра) с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1}$$

и постоянной времени

$$T_2 = T_{\text{фн}}$$

для исключения повышенного перерегулирования скорости при отработке ступенчатого управляющего воздействия.

### ***Расчёт параметров цепи обратной связи по ЭДС двигателя***

Коэффициент обратной связи контура по ЭДС

$$k_{\text{э}} = \frac{U_{\text{зс.макс}}}{E_{\text{дв.макс}}},$$

где

$U_{\text{зс макс}}$  – максимальное значение управляющего напряжения на входе контура напряжения, в аналоговых системах  $U_{\text{зт макс}} \leq 10 \text{ В}$ ;

$$E_{\text{дв макс}} \leq E_{\text{дв н}} = c \cdot \omega_{\text{дв н}}$$

– максимальное значение ЭДС двигателя при настройке контура, В;

$\omega_{\text{дв.н}}$  – номинальная скорость электродвигателя, рад/с.

Коэффициент передачи входной цепи регулятора обратной связи по ЭДС:

– для схемы рис. 1, б

$$k_{\text{он}} = \frac{k_{\text{э}}}{k_{\text{дн}}},$$

где  $k_{\text{дн}}$  – коэффициент передачи датчика напряжения;

– для схемы рис 2, б

$$k_{\text{оэ}} = \frac{k_{\text{э}}}{k_{\text{дэ}}} \cdot k_{\text{дн}},$$

где  $k_{\text{дэ}}$  – коэффициент передачи датчика ЭДС.

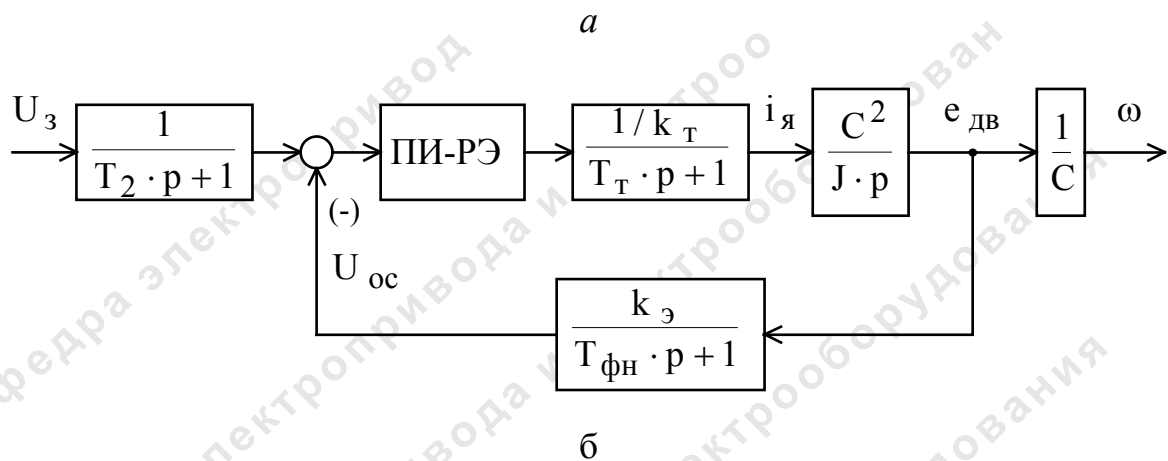


Рис. 1. Структурная схема САУ РЭП с обратной связью по напряжению и  $IR$  –компенсацией с компенсированной или без учёта внутренней обратной связи по ЭДС двигателя: а – после оптимизации контура тока; б – преобразованная для контура ЭДС

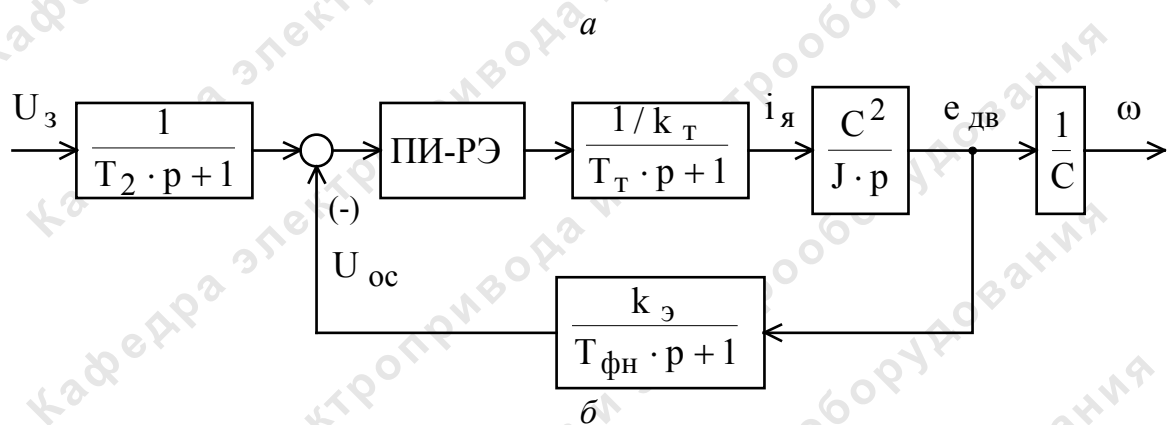


Рис. 2. Структурная схема САУ РЭП с обратной связью по напряжению и  $IR$  –компенсацией с компенсированной или без учёта внутренней обратной связи по ЭДС двигателя: а – после оптимизации контура тока; б – преобразованная для контура ЭДС

### Настройка контура ЭДС двигателя с ПИ-регулятором

Передаточная функция регулятора ЭДС

$$W(p)_{рэ} = k_{рэ} \cdot \frac{T_{рэ} \cdot p + 1}{T_{рэ} \cdot p}.$$

Контур регулирования с интегрирующим звеном в прямом канале и ПИ-регулятором (рис. 1, б и 2, б) оптимизируется по СО. Для оптимизации контура с инерционной обратной связью параметры регулятора и фильтра на входе контура выбираются в соответствии со следующими соотношениями [10]:

$$k_{рэ} = \frac{J_э \cdot k_T}{k_э \cdot c^2 \cdot a_э \cdot (T_T + T_{дв})};$$

$$T_{pэ} = a_э \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв}); \quad T_2 = T_{дв}.$$

Оптимизированный контур ЭДС имеет следующую передаточную функцию разомкнутого контура

$$W(p)_{э раз} = \frac{a_э \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв}) \cdot p + 1}{a_э^2 \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв})^2 \cdot p^2 \cdot (T_T \cdot p + 1)(T_{дв} \cdot p + 1)}$$

и замкнутого контура с фильтром на входе при  $T_2 = T_{дв}$ , записанную относительно скорости двигателя как выходной координаты электропривода

$$W(p)_{с зам} = \frac{\omega_{дв}(p)}{U_{зс}(p)} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_э} \cdot [a_э \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв}) \cdot p + 1]}{a_э^2 \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв})^2 \cdot p^2 \cdot (T_T \cdot p + 1)(T_{дв} \cdot p + 1) + a_э \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв}) + 1}$$

Если принять, что

$$(T_T \cdot p + 1)(T_{дв} \cdot p + 1) \approx (T_T + T_{дв}) \cdot p + 1,$$

то передаточная функция оптимизированного замкнутого контура скорости при коэффициентах оптимизации  $a_э = b_э = 2$  принимает вид

$$W(p)_{с зам} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_э} \cdot (4 \cdot T_{мсэ} \cdot p + 1)}{8 \cdot T_{мсэ}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{мсэ}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{мсэ} \cdot p + 1},$$

где

$$T_{мсэ} = (T_T + T_{дв})$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости двигателя.

Настройка контура скорости электропривода с обратной связью по ЭДС двигателя при принятых упрощениях и коэффициентах оптимизации  $a_э = b_э = 2$  точно соответствует настройке на СО контура 3-го порядка. Отработку ступенчатого входного воздействия контур осуществляет с перерегулированием  $\gamma = 43.4\%$ . Для уменьшения перерегулирования на входе контура необходимо установить дополнительный сглаживающий фильтр с постоянной времени

$$T_2 = T_{мсэ} = a_э \cdot b_э \cdot (T_T + T_{дв}).$$

С двумя фильтрами на входе передаточная функция замкнутого контура скорости при коэффициентах оптимизации  $a_э = b_э = 2$  имеет вид следующий вид

$$W(p)_{с зам} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_э}}{8 \cdot T_{мсэ}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{мсэ}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{мсэ} \cdot p + 1},$$

что соответствует точной настройке на МО контура 3-го порядка. Контур представляет собой статическую систему регулирования по управлению и обеспечивает следующие показатели качества работы:

– установившееся значение скорости

$$\omega_{\text{дв уст}} = \omega_{\text{зад}}, \text{ рад/с,}$$

где  $\omega_{\text{зад}} = \frac{U_{3с}}{c \cdot k_{э}}$  – заданное значение скорости двигателя, рад/с;

– статическая ошибка по управлению

$$\Delta\omega_{\text{у.ст}} = 0;$$

– полоса пропускания по модулю

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0.5}{T_{\text{мсэ}}}, \text{ рад/с;}$$

– полоса пропускания по фазе

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0.35}{T_{\text{мсэ}}}, \text{ рад/с;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5% зону установившегося значения скорости при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$y = 8.1\%, \quad t_{\text{пу1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\text{мсэ}}, \text{ с,} \quad t_{\text{пу2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\text{мсэ}}, \text{ с.}$$

Вместо двух входных фильтров на входе контура достаточно установить один фильтр с постоянной времени

$$T_2 \approx T_{\text{дв}} + a_э \cdot b_э \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}).$$

На практике может оказаться достаточным установка на входе контура одного сглаживающего фильтра с постоянной времени

$$T_2 = a_э \cdot b_э \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}).$$

В этом случае передаточная функция замкнутого контура скорости при  $a_э = b_э = 2$  имеет вид следующий вид

$$W(p)_{\text{с.зам}} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_{э}} \cdot (T_{\text{дв}} \cdot p + 1)}{8 \cdot T_{\text{мсэ}}^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_{\text{мсэ}}^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_{\text{мсэ}} \cdot p + 1}.$$

В этом случае настройка контура скорости близка к настройке на МО системы 3-го порядка. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению и с учетом имеющего место значения соотношения постоянных

времени  $\frac{4 \cdot T_{\text{мсэ}}}{T_{\text{дв}}} < 0.25$  контур имеет следующие динамические показатели качества работы:

– установившаяся статическая ошибка по управлению при постоянном значении задающего сигнала

$$\Delta\omega_{уст} = 0;$$

– полоса пропускания контура по модулю и по фазе изменяется в пределах:

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0.5 \div 0.54)}{T_{\mu\text{сэ}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad \omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0.36 \div 0.42)}{T_{\mu\text{сэ}}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5 % зону при отработке скачка задания изменяются в пределах:

$$\sigma = (8.1 \div 10)\%; \quad t_{\text{пу}1}^{(5)} = (7 \div 5.8) \cdot T_{\text{мсэ}}, \text{ с}; \quad t_{\text{пу}2}^{(5)} = (12 \div 9.5) \cdot T_{\text{мсэ}}, \text{ с}.$$

### **Настройка контура ЭДС двигателя с П-регулятором**

Поскольку в контуре ЭДС имеется интегрирующее звено, то контур можно оптимизировать по МО применив П-регулятор. Для оптимизации контура с инерционной обратной связью параметры регулятора и фильтра на входе контура выбираются в соответствии со следующими соотношениями [10]:

$$k_{\text{рз}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_{\text{т}}}{k_{\text{э}} \cdot c^2 \cdot a_{\text{э}} \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}})}, \quad T_2 = T_{\text{дв}}.$$

Оптимизированный контур ЭДС имеет передаточную функцию разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{э раз}} = \frac{1}{a_{\text{э}} \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}) \cdot p \cdot (T_{\text{т}} \cdot p + 1)(T_{\text{дв}} \cdot p + 1)};$$

и следующие передаточные функции замкнутого контура, записанные относительно скорости двигателя как выходной координаты электропривода:

– без фильтра на входе

$$W(p)_{\text{с зам}} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_{\text{э}}} \cdot (T_{\text{дв}} \cdot p + 1)}{a_{\text{э}} \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}) \cdot p \cdot (T_{\text{т}} \cdot p + 1)(T_{\text{дв}} \cdot p + 1) + 1};$$

– с фильтром на входе и  $T_2 = T_{\text{дв}}$

$$W(p)_{\text{с зам}} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_{\text{э}}}}{a_{\text{э}} \cdot (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}) \cdot p \cdot (T_{\text{т}} \cdot p + 1)(T_{\text{дв}} \cdot p + 1) + 1}.$$

Если принять, что

$$(T_{\text{т}} \cdot p + 1)(T_{\text{дв}} \cdot p + 1) \approx (T_{\text{т}} + T_{\text{дв}}) \cdot p + 1,$$

то передаточная функция оптимизированного замкнутого контура скорости при коэффициенте оптимизации  $a_{\text{э}} = 2$  принимает вид:

– без фильтра на входе контура

$$W(p)_{с\ зам} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_{\mathcal{E}}} (T_{дв} \cdot p + 1)}{2 \cdot T_{мс\mathcal{E}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{мс\mathcal{E}} \cdot p + 1};$$

– с фильтром на входе контура

$$W(p)_{с\ зам} = \frac{\frac{1}{c} \cdot \frac{1}{k_{\mathcal{E}}}}{2 \cdot T_{мс\mathcal{E}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{мс\mathcal{E}} \cdot p + 1},$$

где

$$T_{мс\mathcal{E}} = (T_{т} + T_{дв})$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости.

Настройка контура скорости электропривода с обратной связью по ЭДС двигателя при коэффициенте оптимизации  $a_{\mathcal{E}} = 2$  и фильтром на входе точно соответствует настройке на МО контура 2-го порядка.

При коэффициенте оптимизации  $a_{\mathcal{E}} = 2$  и с фильтром на входе контур скорости обеспечивает следующие ожидаемые показатели качества работы:

– установившееся значение скорости

$$\omega_{дв\ уст} = \omega_{зад}, \text{ рад/с,}$$

где  $\omega_{зад} = \frac{U_{зс}}{c \cdot k_{\mathcal{E}}}$  – заданное значение скорости двигателя, рад/с;

– статическая ошибка по управлению

$$\Delta\omega_{уст} = 0;$$

– полоса пропускания по модулю и фазе

$$\omega_{п}^{(м)} = \omega_{п}^{(ф)} = \frac{0.707}{T_{мс\mathcal{E}}}, \text{ рад/с;}$$

– перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5% зону установившегося значения скорости при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$y = 4.3\%, \quad t_{пу1}^{(5)} = t_{пу2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{мс\mathcal{E}}, \text{ с.}$$

Показатели качества работы контура скорости без фильтра на входе будут определяться отношением постоянных времени контуре  $\frac{T_{дв}}{T_{мс\mathcal{E}}}$  [10]. При имею-

щем место фактическом значении отношении  $\frac{T_{дв}}{T_{мс\mathcal{E}}} < 0.5$  настройка контура

скорости будет близка к настройке на МО системы 2-го порядка. Контур является астатической системой регулирования первого порядка по управлению,

обеспечивает нулевую установившуюся ошибку  $\Delta\omega_{уст} = 0$  и динамические показатели качества работы, которые изменяются в следующих пределах:

– полоса пропускания по модулю

$$\omega_{П}^{(м)} = \frac{(0.71 \div 0.9)}{T_{мсэ}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование и время первого вхождения в 5 % зону при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$\sigma = (4.3 \div 6.7) \%, \quad t_{пу1}^{(5)} = (4.1 \div 2.75) \cdot T_{мсэ}, \text{ с.}$$

Обеспечиваемые контуром скорости с П-регулятором показатели качества работы свидетельствуют о нецелесообразности установка на его входе сглаживающего фильтра.

Контур скорости с П-регулятором ЭДС, настроенный на МО, обеспечивает при отработке управляющих воздействий большее быстродействие электропривода в сравнении с ПИ-регулятором и настройкой на СО.

Из-за наличия в системе некомпенсированной постоянной времени  $T_{дв}$  быстродействие и статическая точность регулирования системы с обратной связью по ЭДС в  $\frac{(T_T + T_{дв})}{T_T}$  раз (при прочих равных условиях) меньше, чем в системе с обратной связью по скорости. Динамические и статические показатели системы с обратной связью по ЭДС будут тем ближе к показателям системы с обратной связью по скорости, чем меньше величина  $T_{дв}$ .

### **Реакция контура скорости с регулятором ЭДС на изменение статической нагрузки электропривода**

Если ограничиться усечённой до первого порядка передаточной функцией замкнутого контура тока, то структурные схемы контура скорости рис. 1, а и 2, а для режима отработки возмущающего воздействия по нагрузке можно представить в виде, приведенном соответственно на рис. 3, а и 4, а. Если выполнить условия точной настройки обратной связи по ЭДС двигателя, то структурные схемы рис. 3, а и 4, а преобразуются к виду, приведенному, соответственно, на рис. 3, б и 4, б.

*Рис. 3. Структурная схема контура скорости с обратной связью по напряжению двигателя и IR-компенсацией в режиме отработки возмущения по нагрузке: а – исходная; б – преобразованная*

*Рис. 4. Структурная схема контура скорости с обратной связью по ЭДС двигателя в режиме отработки возмущения по нагрузке: а – исходная; б – преобразованная*



### ***Настройка контура скорости с ПИ-регулятором ЭДС***

Передаточная функция по возмущению оптимизированного замкнутого контура скорости с обратной связью по ЭДС двигателя (рис. 3, б и 4, б) и ПИ-регулятором с учётом принятых упрощений имеет в общем случае следующий вид

$$\begin{aligned}
 W(p)_{\text{в зам}} &= \frac{\omega_{\text{ДВ}}(p)}{-M_c(p)} = \\
 &= \frac{\frac{a_3^2 \cdot b_3}{J_3} \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}})^2 \cdot p \cdot (T_T \cdot p + 1)(T_{\text{ДВ}} \cdot p + 1)}{a_3^2 \cdot b_3 \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}})^2 \cdot p^2 \cdot (T_T \cdot p + 1)(T_{\text{ДВ}} \cdot p + 1) + a_3 \cdot b_3 \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{a_3^2 \cdot b_3}{J_3} \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}})^2 \cdot p \cdot [(T_T + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1]}{a_3^2 \cdot b_3 \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}})^2 \cdot p^2 \cdot [(T_T + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1] + a_3 \cdot b_3 \cdot (T_T + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{\frac{a_3^2 \cdot b_3 \cdot T_{\text{МСЭ}}^2}{J_3} \cdot p \cdot (T_{\text{МСЭ}} \cdot p + 1)}{a_3^2 \cdot b_3 \cdot T_{\text{МСЭ}}^3 \cdot p^3 + a_3^2 \cdot b_3 \cdot T_{\text{МСЭ}}^2 \cdot p^2 + a_3 \cdot b_3 \cdot T_{\text{МСЭ}} \cdot p + 1}.
 \end{aligned}$$

Контур скорости с ПИ-регулятором ЭДС представляет собой астатическую систему регулирования по возмущению (по нагрузке) и обеспечивает нулевую статическую ошибку по нагрузке

$$\Delta\omega_{\text{в ст}} = 0$$

и динамический провал (всплеск) скорости при ступенчатом набросе (сбросе) нагрузки  $\Delta M_c$

$$\Delta\omega_{\text{в ст}} = \left( \frac{a_3 \cdot T_{\text{МСЭ}}}{J_3} \cdot \Delta M_c \right) \cdot [0.44 \cdot (1 + 0.615 \cdot a_3)], \text{ рад/с.}$$

### ***Настройка контура скорости с П-регулятором ЭДС***

Передаточная функция по возмущению оптимизированного замкнутого контура скорости с обратной связью по ЭДС двигателя (рис. 3, б и 4, б) и П-регулятором с учётом принятых упрощений имеет в общем случае следующий вид

$$W(p)_{\text{в зам}} = \frac{\omega_{\text{ДВ}}(p)}{-M_c(p)} = \frac{\frac{a_{\text{Э}}}{J_{\text{Э}}} \cdot (T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot (T_{\text{T}} \cdot p + 1)(T_{\text{ДВ}} \cdot p + 1)}{a_{\text{Э}} \cdot (T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot p \cdot (T_{\text{T}} \cdot p + 1)(T_{\text{ДВ}} \cdot p + 1) + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{a_{\text{Э}}}{J_{\text{Э}}} \cdot (T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot [(T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1]}{a_{\text{Э}} \cdot (T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot p \cdot [(T_{\text{T}} + T_{\text{ДВ}}) \cdot p + 1] + 1} = \frac{\frac{a_{\text{Э}} \cdot T_{\text{МСЭ}}}{J_{\text{Э}}} \cdot (T_{\text{МСЭ}} \cdot p + 1)}{a_{\text{Э}} \cdot T_{\text{МСЭ}}^2 \cdot p^2 + a_{\text{Э}} \cdot T_{\text{МСЭ}} \cdot p + 1}.$$

Контур скорости с П-регулятором ЭДС представляет собой статическую систему регулирования по возмущению (по нагрузке) и имеет статическую ошибку по нагрузке

$$\Delta\omega_{\text{в ст}} = \frac{a_{\text{Э}} \cdot T_{\text{МСЭ}}}{J_{\text{Э}}} \cdot \Delta M_c, \text{ рад/с}$$

и динамический провал (всплеск) скорости при ступенчатом набросе (сбросе) нагрузки  $\Delta M_c$

$$\Delta\omega_{\text{в ст}} = \left( \frac{a_{\text{Э}} \cdot T_{\text{МСЭ}}}{J_{\text{Э}}} \cdot \Delta M_c \right) \cdot [0.37 \cdot (1 + 0.95 \cdot a_{\text{Э}})], \text{ рад/с.}$$

#### Литература

1. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентиляльными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970. – 200 с.
2. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентиляного электропривода постоянного тока. М.: Энергия, 1972. – 136 с.
3. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.Н. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. М.: Металлургия, 1977. – 192 с.
4. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок/ Под. ред. Я.М. Большама и др. М.: Энергия, 1974. – 728 с.
5. Справочник по наладке электроустановок/ Под. ред. А.С. Дорофеюка, А.П. Хечумяна. М.: Энергия, 1977. – 560 с.
6. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/ Под. ред. В.И. Круповича и др. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.
7. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий/ Под. ред. М.Г. Зименкова и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.
8. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорным электроприводом постоянного тока. М.: Энергоатомиздат. 1988. – 304 с.
9. Части 1,2.
10. Часть 7.