



2.3. Тиристорные электроприводы постоянного тока.



Тиристорный электропривод постоянного тока, содержащий системы подчиненного регулирования, обладает статическими и динамическими характеристиками и свойствами, наиболее приемлемыми для электроприводов конвейеров.

К ним относятся:

- 1. Большие, до 3-3.5 М ном перегрузочные моменты, обеспечивающие пуски загруженного конвейера.***
- 2. Независимость момента, развиваемого электродвигателями, от падения напряжения в сети.***
- 3. Ограничение статических перегрузок в процессе пуска без рывков.***
- 4. Ограничение динамических моментов при экстренном стопорении тягового органа.***
- 5. Высокое быстродействие.***



6. Возможности плавного пуска и торможения с надежным ограничением ускорения и рывка, а также максимального момента двигателя и его производной.

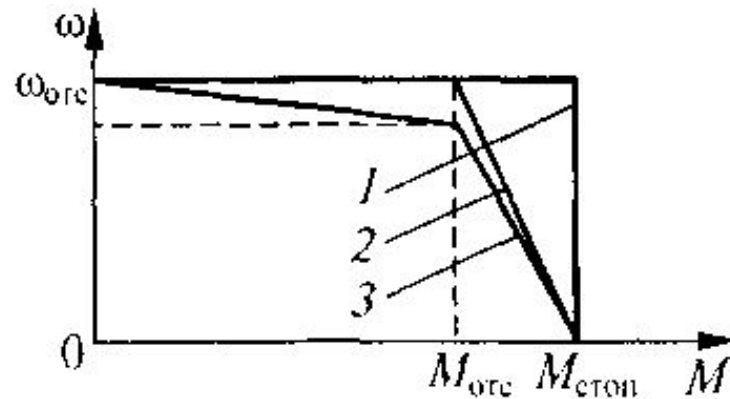
7. Широкий диапазон регулирования скорости.

8. Возможность демпфирования динамических нагрузок в тяговом органе.

9. Возможность распределения нагрузок между приводами в заданном соотношении в многодвигательных электроприводах.

10. Возможность равномерного распределения нагрузок между двигателями, для электроприводов конвейеров, работающих на один барабан или приводную звездочку.

11. Формирование экскаваторных механических характеристик.



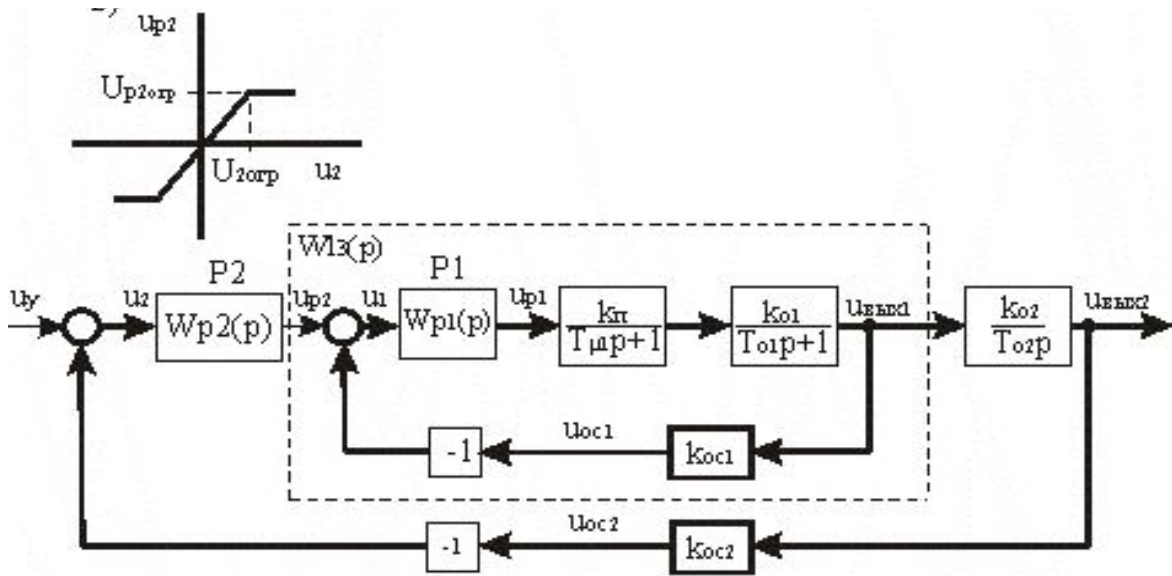
Экскаваторные механические характеристики

1- идеальная теоретическая экскаваторная характеристика;

2, 3 –реальные экскаваторные характеристики.

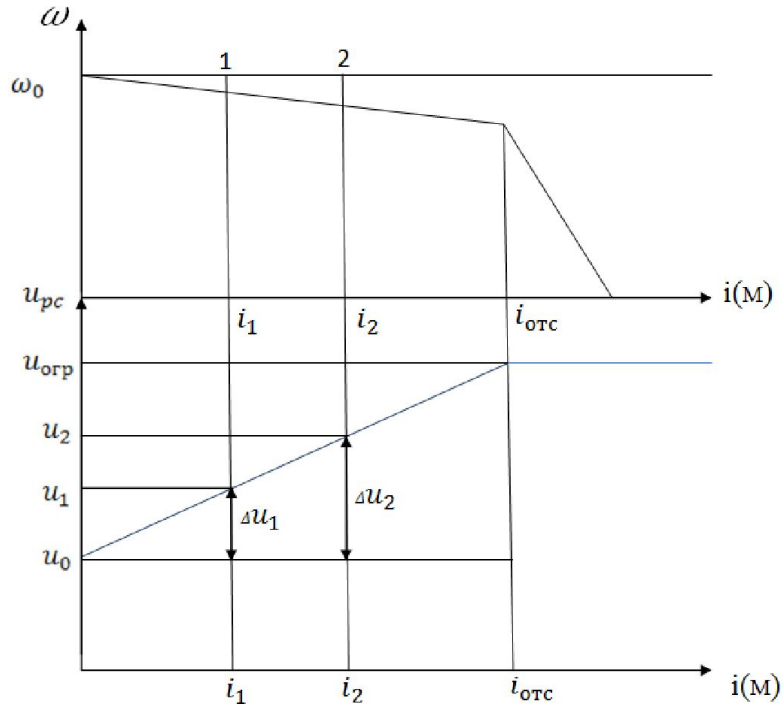
Максимальная производительность при нагрузках до уровня токоограничения и ограничение максимальных моментов электродвигателя при статических перегрузках и стопорениях тягового органа.

При идеальной экскаваторной механической характеристике на участке ограничения момента электропривод переходит в автоколебательный режим, поэтому практического смысла характеристика не имеет.



Структура системы подчиненного регулирования

В системе предусмотрены два контура регулирования со своими регуляторами $P1$ и $P2$, причем выходное напряжение регулятора внешнего контура является заданным значением для внутреннего контура. Выходное напряжение регулятора $P2$ ограничено предельным значением $U_{p2огр}$. Поскольку $u_{вых1}$ задается выходным напряжением $P2$, оно не может превысить значения $U_{P2огр}$



$$M = c \Phi i \quad \omega = \frac{u - iR}{c \Phi}$$

$$\omega_0 = \frac{u_0 \cdot K_{pT} \cdot K_{Tn}}{c \Phi}$$

$$\omega_1 = \frac{K_{pT} \cdot K_{Tn} (u_0 + \Delta u_1 - i_1 R)}{c \Phi}$$

$$\text{Где } \Delta_i u_1 = i_1 R$$

$$\omega_2 = \frac{K_{pT} \cdot K_{Tn} (u_0 + \Delta u_2 - i_2 R)}{c \Phi}$$

$$\Delta_i u_2 = i_2 R$$

Принципы ограничения заданного тока якоря в системе подчиненного регулирования

Применяя ПИ-регулятор, можно реализовать стандартную настройку внутреннего контура, быстроедействие которого будет определяться его малой постоянной времени $T_{\mu 1}$. При настройке на оптимум по модулю ОМ передаточная функция внутреннего замкнутого контура имеет вид:

$$W_{13}(p) = \frac{1/k_{o.c1}}{2T_{\mu 1}^2 p^2 + 2T_{\mu 1} p + 1}.$$

Если в контуре не одна, а несколько малых постоянных времени, то $T_{\mu 1}$ это сумма малых постоянных времени контура.

При расчете параметров регулятора внешнего контура внутренний замкнутый контур заменяют апериодическим звеном с постоянной времени

$$W_{13}(p) \approx \frac{1/k_{o.c}}{T_{13} p + 1}.$$

При настройке внутреннего контура на ОМ принимают $T_{13} = 2T_{\mu 1}$



Принцип подчиненного регулирования базируется на компенсации средних и больших постоянных времени объекта, а также коэффициентов передачи объекта управления.

При этом динамические свойства объекта регулирования зависят только от малых постоянных времени и коэффициентов обратной связи, и не зависят от свойств объекта (электродвигателя).

Для практической реализации системы подчиненного регулирования необходимо, чтобы быстродействие внутреннего контура, определяемое настройками регулятора, было выше быстродействия внешнего контура.

В типовых системах подчиненного регулирования электропривода внутренний контур- контур регулирования тока, внешний контур –контур регулирования скорости.



Преимущество систем подчиненного регулирования

- 1. Простота расчета и настройки. Система разбивается на ряд контуров. Каждый контур включает в себя регулятор, за счет придания которому определенных динамических свойств получают стандартные характеристики. Настройка в процессе наладки системы ведется, начиная с внутреннего контура. Качество настройки оценивается по результатам сравнения реакции контура на скачок управляющего воздействия со стандартной переходной характеристикой, что упрощает наладку системы.*
- 2. Удобство ограничения предельных значений промежуточных координат системы. Выходной сигнал регулятора внешнего контура является заданным значением для внутреннего контура, ограничение выходной координаты внутреннего контура достигается за счет ограничения определенным значением выходного сигнала регулятора внешнего контура.*
- 3. Принципы систем подчиненного регулирования реализуются в приводах и постоянного и переменного тока.*



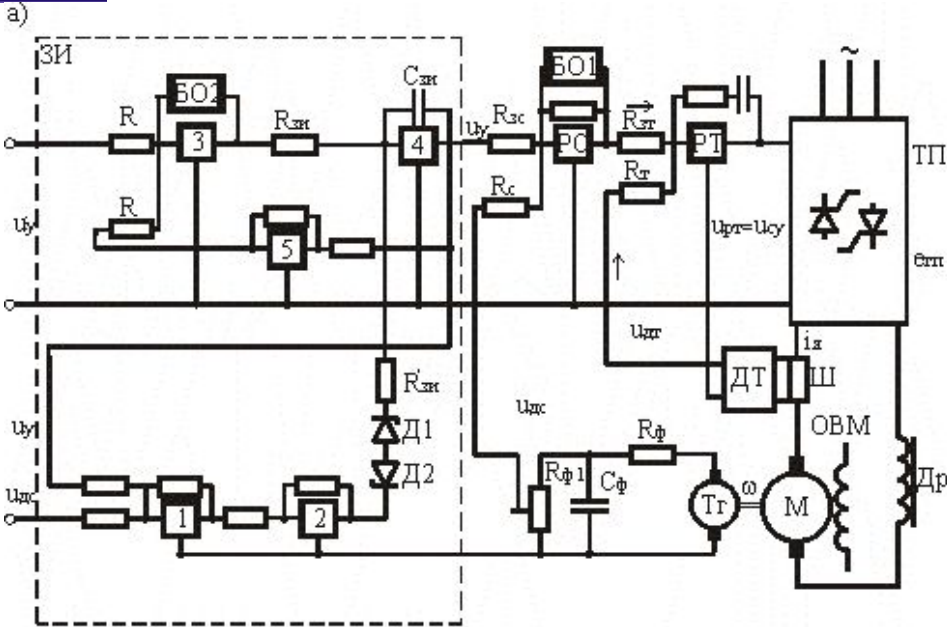
Недостатки

1. Быстродействие каждого внешнего контура ниже быстродействия соответствующего внутреннего контура.

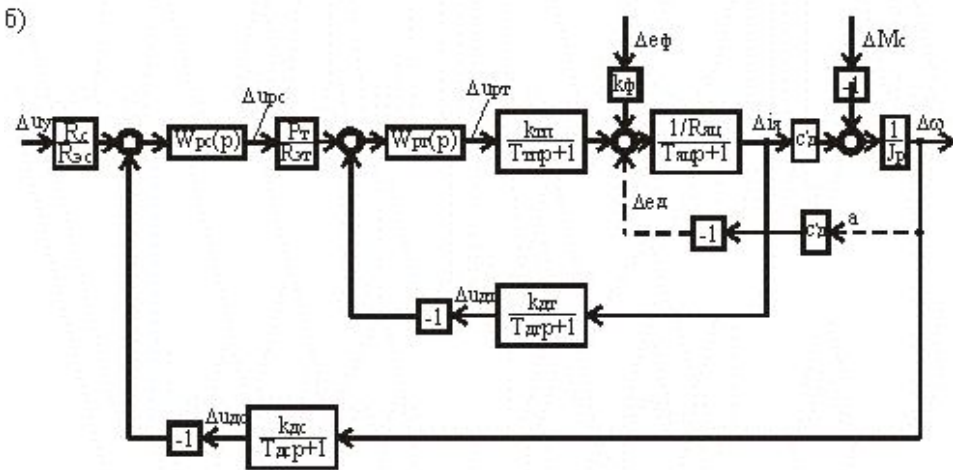
При настройке на OM – в 2 раза, при настройке на CO – в 4 раза.

2. Системы применимы при отсутствии перекрестных связей в объекте регулирования или их влиянием можно пренебречь.

Синтез электропривода с системой подчиненного регулирования



**а) Схема систем управления скоростью двигателя с подчиненным токовым контуром;
б) Структурная схема системы.**





- 1. Токовый контур включает в себя регулятор тока (РТ). На его входные сопротивления R_T и $R_{з.т.}$ подаются сигналы задания I якоря с регулятора внешнего контура скорости $u_{P.C.}$ и датчика тока (ДТ) $u_{Д.Т.}$.**
- 2. ДТ, включенный на шунт Ш, преобразует I якоря в пропорциональное ему U , и обеспечивает гальваническую развязку якорной цепи ЭД и цепей управления.**
- 3. Выходное напряжение РТ подается на систему управления ТП.**
- 4. БО 1 ограничивает U вых. регулятора скорости (РС) на уровне $u_{P.C.огр.}$, что ограничивает I якоря на заданном уровне. Система в любом режиме будет ограничивать I якоря значением I_{max} , которое может быть превышено только за счет переходного процесса в токовом контуре.**



Допущения при синтезе:

- 1. принимаем I якоря непрерывным,***
- 2. входные воздействия достаточно малы,***
- 3. используем линеаризованное описание ЭД,***
- 4. считаем, что U_{PC} и I якоря не ограничиваются,***
- 5. тиристорный преобразователь, ДТ и тахогенератор с фильтром - апериодические звенья первого порядка,***
- 6. при синтезе влиянием внутренней обратной связи по ЭДС ЭД пренебрегаем, что допустимо при выполнении определенных условий и позволяет исключить перекрестные связи в модели ЭД.***

1. Синтез системы начинают с внутреннего контура. Внутренним контуром является контур тока. В контуре тока электромагнитная $T_{\mu 1}$ является компенсируемой, а $T_{мп}$ и $T_{дт}$ некомпенсируемые постоянные времени:

$$T_{\mu 1} = T_{т.п.} + T'_{д.т.}$$

Тогда передаточная функция объекта регулирования, содержащая 2 последовательно включенных апериодических звена имеет вид:

$$W_{орт}(p) = k_{мп} / [(T_{\mu 1}) p + 1] \cdot (1 + T_{\mu 1} \cdot p) R_{я}$$

Желаемую передаточную функцию разомкнутого контура тока зададим в виде:

$$W_{ркт}(p) = 1/[a \cdot (T_{\mu 1}) p + 1] \cdot (1 + (T_{\mu 1}) \cdot p) k_{д.т}$$

Т.е. потребуем, чтобы замкнутый контур тока обладал свойствами звена 2-го порядка, причем его динамические свойства определялись только коэффициентом настройки a , малой постоянной времени $(T_{\mu 1})$ и $k_{д.т}$

Тогда передаточная функция РТ:

$$W_{рт} = W_{ркт} (p) / W_{орт} (p) = [Tя \cdot p + 1] / Tu \cdot p = K_{рт} + [1/Tu \cdot p]$$

где Tu - постоянная времени интегрирования интегральной части регулятора тока, с:

$$Tu = a \cdot (K_{мп} \cdot K_{дт} / Rя)$$

$K_{рт}$ - коэффициент усиления пропорциональной части регулятора тока.

$$K_{рт} = Tя / Tu$$

РТ является ПИ –регулятором.

При $a=2$ получается настройка на технический оптимум (оптимум по модулю).

При этом перерегулирование при реакции на единичное воздействие не превышает 4,3 %, а время переходного процесса - 4,7 $T_{μ1}$,

Длительность переходного процесса не зависит от постоянной времени объекта и определяется только малой постоянной времени .



Условия пренебрежения влиянием ОС по ЭДС двигателя:

1. Наличие быстродействующего замкнутого контура регулирования тока приводит к тому, что I якоря изменяется в соответствии с изменением напряжения РС независимо от действующего на контур возмущения в виде относительно медленного изменения ЭДС двигателя.

2. Если частота среза контура тока не менее, чем в 10 раз превышает частоту $1/T_{ЭМ}$, т. е. выполняется условие

$$T_{ЭМ} > 10 \cdot 2T_{\mu 1}$$

где $T_{ЭМ}$ – электромеханическая постоянная, отражающая механические инерционные свойства ЭД;

то частотные характеристики в области частоты среза практически не отличаются как при учете ЭДС, так и при пренебрежении этой связью, что является достаточным условием для пренебрежения обратной связью по ЭДС двигателя.

Предпочтительной для электроприводов конвейеров является настройка на ОМ, т.к. при этом пререгулирование тока минимально, а время переходного процесса достаточно велико, и следовательно динамические нагрузки в рабочем органе будут намного меньше, чем при настройке на СО.



2. Синтез контура регулирования скорости



Передаточную функцию контура тока можно заменить приближенной:

$$W_{13}(p) \approx \frac{1}{k_{дт}} \cdot \frac{1}{T_{1\Omega}p + 1},$$

$T_{1\Omega} = T_{\mu 1}$ - эквивалентная постоянная времени контура тока

При этом составляющей, пропорциональной квадрату $(T_{\mu 1})^2$ пренебрегают, т.к. она влияет при частотах, значительно больших частоты среза контура тока.

Т.к объект контура скорости представляет собой интегрирующее звено:

$$W_{\omega\omega}(p) = \frac{c'_d}{Jp} = \frac{R_{я.ц.}}{c'_d} \frac{c'_d{}^2}{JR_{я.ц.}p} = \frac{R_{я.ц.}}{c'_d} \cdot \frac{1}{T_{эм}p},$$

то для настройки на ОМ применяют пропорциональный регулятор с передаточным коэффициентом:

$$k_{p.c}^{om} = \frac{T_{эм}}{2T_{\mu\omega} \frac{R_T}{R_{з.т.}} \frac{R_{я.ц.}}{k_{д.т.}} \frac{k_{д.с.}}{c'_d}},$$

$T_{\mu\omega.} = T_{д.с.} + T_{1\Omega}$ – суммарная малая постоянная времени контура скорости

Статическая ошибка системы по возмущению определяется как :

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\Delta M_c} \right)_{уст} = - \frac{2T_{\mu.\omega}}{T_{ЭМ}} \frac{R_{Я.Ц.}}{c'_D{}^2}.$$

Величина $- R_{Я.Ц.} / c'_D{}^2$

характеризует ошибку разомкнутой системы, и в замкнутой системе с подчиненным токовым контуром ошибка будет тем меньше, чем меньше

$T_{\mu\omega}$ **по сравнению** $T_{ЭМ}$

Если статическая ошибка недопустимо велика, контур можно настроить на СО, применив ПИ-регулятор скорости.

Однако для конвейеров статизм предпочтительней большого переулирования, харктерного для СО (47%).



Постоянное ускорение при любом характере изменения M_c в процессе разгона может быть обеспечено, когда пуск осуществляется при контроле скорости с использованием ЗИ.

Роль регулятора скорости при пуске сводится только к ограничению тока якоря.



Синтез системы распределения нагрузок в двухдвигательном электроприводе конвейера

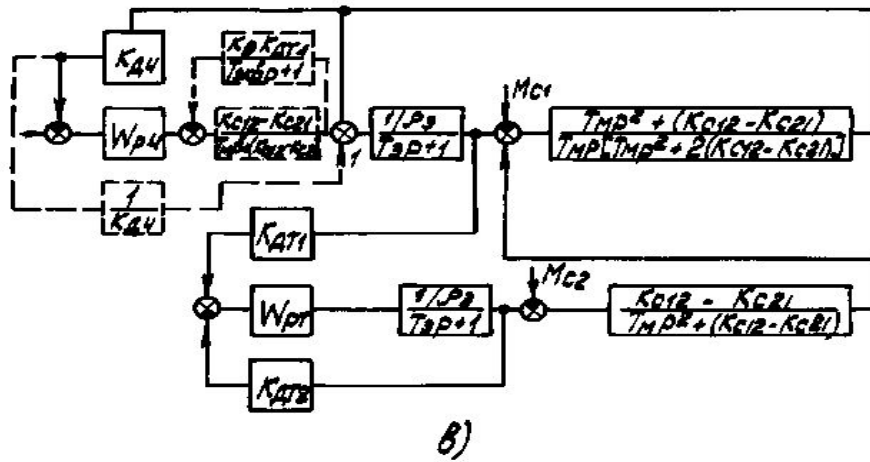
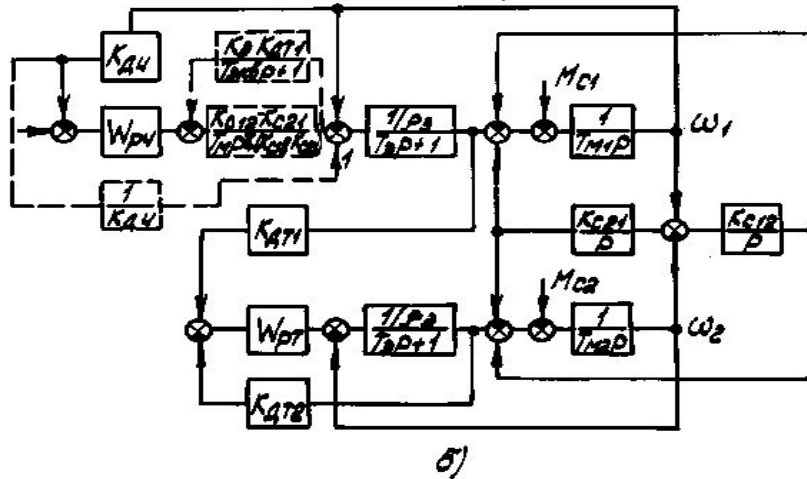
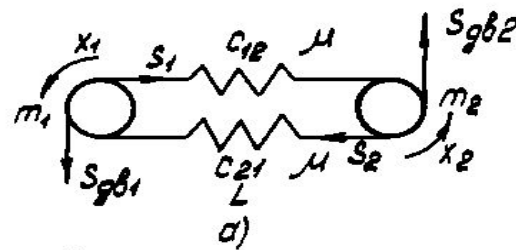


В случае размещения двигателей по концам конвейера, соотношение тяговых усилий приводов не равно отношению их установленных мощностей, что объясняется неравномерной вытяжкой цепи, разницей в загрузке порожней и груженой ветвей, и приводит к высоким динамическим нагрузкам .

Для уменьшения динамических усилий в цепи нагрузки между приводами целесообразно распределять так, чтобы каждый двигатель был нагружен на свою ветвь.

Произведем синтез системы регулирования частоты вращения и распределения нагрузок между приводами конвейера. Расчетная схема двухприводного конвейера с цепным органом представлена на рис .

Влияние распределенности цепного тягового органа учитывается по принципу Рэля присоединением к массам приводов части массы цепи.



Расчетная и структурная схемы системы распределения нагрузок:

- а) расчетная схема;
- б) структурная схема;
- в) преобразованная и скорректированная структурная схема



где C_{12}, C_{21} - линейные жесткости соответственно верхней и нижней ветвей;

$S_{дв1}, S_{дв2}$ - тяговые усилия соответственно первого и второго двигателей;

S_1, S_2 - усилия в верхней и нижней ветвях.

$K_{дт1}$ - коэффициент передачи датчика тока ведущего привода;

$K_{дт2}$ - коэффициент передачи датчика тока ведомого привода;

$W_{рч}$ - передаточная функция регулятора частоты вращения;

$W_{рт}$ - передаточная функция регулятора отношения токов.

Влияние распределенности цепного тягового органа учитывается по принципу Рэля присоединением к массам приводов части массы цепи.

Система уравнений двухдвигательного электропривода постоянного тока забойного конвейера имеет вид:

$$M_1^* - \frac{K_{c21}(\omega_1^* - \omega_2^*)}{p} = T_{M1} p \omega_1^*$$

$$M_2^* - M_{c1}^* + \frac{K_{c21}(\omega_1^* - \omega_2^*)}{p} = T_{M2} p \omega_2^*$$

$$M_2^* - M_{c2}^* - \frac{K_{c21}(\omega_2^* - \omega_1^*)}{p} = T_{M2} p \omega_2^*$$

$$M_1^* + \frac{K_{c21}(\omega_2^* - \omega_1^*)}{p} = T_{M1} p \omega_1^*$$

$$U_1^* = \rho_{\varepsilon 1} (T_{\varepsilon 1} p + 1) i_1^* + \omega_1^*$$

$$U_2^* = \rho_{\varepsilon 2} (T_{\varepsilon 2} p + 1) i_2^* + \omega_2^*,$$

где

$$T_{M1} = J_1 \frac{\omega_{H1}^*}{M_{H1}} + \frac{\mu_1 L_{\text{ц}} V_H^2}{3\omega_{H1}^* M_{H1}}; \quad T_{M2} = J_2 \frac{\omega_{H1}^*}{M_{H1}} + \frac{\mu_2 L_{\text{ц}} V_H^2}{3\omega_{H1}^* M_{H1}};$$

$$K_{c12} = \frac{C_{12} \omega_{H1} R^2}{i_p^2 M_{H1}}; \quad K_{c21} = \frac{C_{21} \omega_{H1} R^2}{i_p^2 M_{H1}};$$

$$\rho_{\varepsilon 1} = \frac{R_{\text{я1}} I_{H1}}{E_{H1}}; \quad \rho_{\varepsilon 2} = \frac{R_{\text{я2}} I_{H1}}{E_{H1}}$$

В качестве базовых единиц приняты номинальные параметры первого двигателя.



В системе распределения нагрузок ведущим приводом является первый привод, нагруженный на рабочую ветвь. Этот привод замыкается обратной связью по частоте вращения и току. Задача второго, ведомого привода состоит в поддержании заданного соотношения токов. Для этого вводятся обратные связи по току ведущего и ведомого приводов.

Так как ведомый привод замкнут по току нагрузки, то пренебрегаем обратной связью по ЭДС в этом контуре. Для компенсации влияния ЭДС ведущего двигателя на контур регулирования частоты вращения введем дополнительную обратную связь с корректирующим звеном $W = 1/Kдч$ в точку 1, рис.б.

Передаточная функция системы электропривода по возмущающему воздействию в верхней ветви относительно частоты вращения ведущего привода равна:

$$W(p) = \frac{W_p \rho_{\omega}^{-1} (T_m p^2 + \Delta K_c + K_{дт1} W_{крт} \Delta K_c)}{T_m p (T_{\omega} p + 1) (T_m p^2 + 2\Delta K_c) + K_d W_p \rho_{\omega}^{-1} (T_m p^2 + \Delta K_c + K_{дт1} W_{крт} \Delta K_c)}$$

где $\Delta K_c = K_{c12} - K_{c21}$;

$W_{крт}$ - замкнутый контур регулирования отношения токов

Передаточная функция замкнутого контура регулирования отношения токов по управляющему воздействию имеет вид:

$$W_{крт} = \frac{W_{рТ} \rho_{\omega}^{-1} K_{дт1}}{T_{\omega} p + 1 + K_{дт2} W_{рТ} \rho_{\omega}^{-1}}$$

Регулятор в контуре регулирования отношения токов выбирается из условия обеспечения апериодического переходного процесса. Эквивалентная передаточная функция замкнутого контура регулирования токов равна:

$$W_{\text{крт}} = \frac{K_{\text{э}}}{T_{\text{экв}}p + 1}$$

где $T_{\text{экв}}$ - эквивалентная постоянная времени. Принимаем

$$K_{\text{э}} = \frac{K_{\text{дт1}}}{K_{\text{дт2}}}$$

Передаточная функция регулятора отношения токов:

$$W_{\text{рт}} = \frac{T_{\text{э}}\rho_{\text{э}}}{T_{\text{экв}}K_{\text{дт1}}} \cdot \frac{T_{\text{э}}p + 1}{T_{\text{э}}p}$$

Для подавления высокочастотных пульсаций в токе целесообразно выполнение условия $T_{\text{экв}} \gg T_{\text{э}}$.

Необходимое отношение токов нагрузки задается коэффициентами $K_{\text{дт1}}$ и $K_{\text{дт2}}$.

Как следует из передаточной функции контур регулирования частоты вращения для компенсации влияния переходных процессов в нижней ветви на динамические нагрузки в верхней ветви необходимо включить корректирующее звено с местной обратной связью (показана пунктиром на рис.б).

$$W(p) = \frac{(T_{\text{эКВ}}p + 1)\Delta K_c}{(T_{\text{эКВ}}p + 1) \cdot (T_{\text{м}}p^2 + \Delta K_c) + K_{\text{э}}K_{\text{дт}}\Delta K_c}$$

Практически жесткости верхней и нижней ветвей существенно различаются из-за неравномерной вытяжки цепи, при этом $K_{с12} > K_{с21}$.

Приведем передаточную функцию к следующему виду:

$$W(D) = \frac{(T_M^* D^2 + \Delta K_c) \cdot (D+1)}{T_M^{*2} \left(D^4 + D^3 + \frac{2\Delta K_c^*}{T_M^*} D^2 + \frac{2\Delta K_c^*}{T_M^*} D + \Delta K_c^* K_d \rho_3^{-1} W_p \right)}$$

где $D = T_p$

$$T_M^* = \frac{T_M}{T_3}$$

$$\Delta K_c^* = \Delta K_c T_3$$

Приведение передаточной функции позволяет получить простые аналитические зависимости для вычисления параметров регулятора частоты вращения в системе четвертого порядка в общем виде. Удовлетворительное качество переходных процессов скорости цепи достигается при использовании ПД регулятора второго порядка с передаточной функцией:

$$W_p = K_d (T_d^2 p^2 + 2\eta T_d p + 1)$$

где K_d - коэффициент усиления регулятора;

T_d - постоянная времени регулятора;

η - коэффициент затухания; $\eta < 1$.

Формулы для расчета оптимальных параметров регулятора частоты вращения обеспечивающих максимальное быстродействие при заданном затухании имеют вид:

$$T_d^* = \frac{\sqrt{(2K_n + 1) - 8\Delta K_c^* T_M^{*-1}}}{K_n}$$
$$\xi = \frac{K_n - 8\Delta K_c^* T_M^{*-1}}{\sqrt{K_n(2K_n + 1) - 8\Delta K_c^* T_M^{*-1}}}$$
$$K_d = \frac{K_n \rho_\omega T_M^{*2}}{16K_n \Delta K_c^*}$$

Система физически реализуема при : $K_n > 8\Delta K_c^* T_M^{*-1}$

Пределы изменения $T_M^* = 4 \div 20$; $\Delta K_c^* = 0.005 \div 0.1$

При затухании 98%, $K_n = 0.89$, поэтому условие выполняется для всех реально возможных сочетаний параметров привода и конвейера. Реализация РС осуществлена на основе активных фильтров второго порядка, обеспечивающих работоспособность дифференцирующих регуляторов до частоты 20 Гц в условиях промышленных помех.



**КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



Спасибо за внимание!

***Зав кафедрой автоматизации
производственных процессов
д.т.н., проф. Брейдо Иосиф Вульфович
Тел. +77212(565184)
+77771343827
E-mail: jbreido@kstu.kz
jbreido@mail.ru***