

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ ИМЕНИ  
ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА»

Институт электроэнергетики и электротехники  
Кафедра «Электрических машин и электропривода»

Отчет

Расчетно-графическая работа №2

По дисциплине: Электропривод

По теме: «Расчет и выбор элементов САУ автоматизированного электропривода по схеме «тиристорный преобразователь – двигатель»»

Специальность: Интеграция и управление Smart технологиями энергосбережения и энергоэффективности в электроэнергетике

Выполнил: ст. гр. ИУТЭ-20-3 Райкен М.М.  
Транскрипт 204502  
Проверил: доцент кафедры Мустафин М.А.

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023год

Алматы 2023

## Задание

В данных РГР проводится расчет регулируемого электропривода постоянного тока по схеме "тиристорный преобразователь – двигатель" (ТП - Д), выполняющего стабилизацию частоты вращения и ограничение пусковых токов. Основной задачей выполнения РГР является развитие навыков самостоятельной творческой работы и ознакомление с основными этапами проектирования. В результате выполнения РГР студенты должны овладеть методами расчета и выбора элементов автоматизированного электропривода, анализа и синтеза систем автоматического управления приводами, навыками использования прикладных программ по моделированию и расчету электромеханических и силовых электронных устройств различных типов на ЭВМ. Для выполнения РГР необходимо:

а) выбрать по каталогу электродвигатель, рассчитать и построить естественную электромеханическую характеристику и характеристику при минимальной скорости;

б) составить принципиальную силовую схему электропривода по схеме ТП – Д (схему преобразователя выбрать согласно заданному варианту), рассчитать и выбрать основные элементы схемы;

в) рассчитать и построить статические электромеханические характеристики разомкнутой системы электропривода;

г) составить функциональную схему системы автоматического управления привода, рассчитать параметры необходимых обратных связей и узел отсечки по току (ток отсечки-1,5  $I_H$ , ток стопорения-2  $I_H$ ).

д) рассчитать и построить статические электромеханические характеристики замкнутой системы электропривода.

е) обосновать систему автоматического регулирования и рассчитать параметры регуляторов.

## Содержание

Задание.....	2
Введение.....	4
1 Выбор электродвигателя и расчет электромеханических характеристик.....	5
2 Расчет и выбор элементов силовой схемы.....	8
3 Двухконтурная система электропривода с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току.....	12
4 Определение параметров обратной связи.....	14
Заключение.....	15
Список литературы.....	16

## Введение

Основными функциональными задачами современного автоматизированного электропривода (АЭП) являются:

- Управление процессами пуска, торможения, реверса (функции управления). Эту функцию могут выполнять разомкнутые системы АЭП. В процессе управления осуществляется грубый контроль за током. Жесткость механических характеристик хуже естественных. К настоящему моменту это самая распространенная группа АЭП.

- Стабилизация заданной величины (ток, скорость, положение, мощность и т.д.) (функция стабилизации). Эту функцию может выполнить только замкнутая система АЭП. Основная регулируемая величина – та, по которой замыкается главная обратная связь.

- Слежение за вводимыми в систему изменяющимися входными сигналами (функция слежения). Эта задача может быть выполнена только в замкнутых системах. Современная следящая система, как правило, трехконтурная.

- Выбор целесообразных режимов работы АЭП (функция адаптации). Задача может быть выполнена в замкнутых системах.

Кроме основных функций, система АЭП выполняет еще и дополнительные:

- защита электродвигателя и оборудования от коротких замыканий, перегрузок по току, напряжению и т.д.;

- блокировка, которая обеспечивает определенную последовательность операций и исключая аварийные режимы;

- сигнализация.

# 1 Выбор электродвигателя и расчет электромеханических характеристик

Варианты задания выбираются по номеру зачетной книжки и начальной букве фамилии студента.

Таблица 1 – «Исходные данные»

Р, кВт	n, об/мин	Диапазон регулирования скорости D	$\Delta\omega, \%$	Схема преобразователя	Ток якоря, А	КПД, $\eta$	$U_H, В$
1,5	1000	10	6	3-х ф. мостовая	8,7	0,92	220

Таблица 2 – «Коэффициенты»

Наименование схемы	$K_H$	$K_{H \max}$	$K_{T2}$	$K_{T1}$	$K_M$	$K_u$	$K_a$	$K_R$	$K_i$
Трехфазная мостовая	0,427	1,05	0,815	0,817	1,045	1,05	1	1,05	1,1

Выбор электродвигателя постоянного тока производится по каталогу в соответствии с заданием. Для построения естественной электромеханической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения по уравнению

$$\omega(I_{\text{я}}) = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi_H} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi_H} I_{\text{я}}$$

2.1. Определим номинальную частоту вращения двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi * n}{30} = \frac{3,14 * 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с};$$

2.2. Минимальная заданная скорость:

$$\omega_{\min} = \frac{\omega_H}{D} = \frac{104,7}{10} = 10,47 \text{ рад/с};$$

2.3. Определим номинальный момент двигателя:

$$M_n = \frac{P * 10^3}{\omega_H} = \frac{1500}{104,7} = 14,33 \text{ Нм};$$

2.4. Определим сопротивление якоря:

$$R_{\text{я}} = 0, \frac{5 * (1 - 0,92) * 220}{8,7} = 1,011 \text{ Ом}$$

2.5. Определяем параметр:

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_H * R_{\text{я}}}{\omega_H} = \frac{220 - 8,7 * 1,011}{104,7} = 2,017 \text{ В*с};$$

2.6. Определяем скорость идеального ХХ:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H} = \frac{220}{2,017} = 109,07 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

2.7. Необходимое снижение величины напряжения на статоре двигателя:

$$U_{Я\text{min}} = k\Phi_H \dot{\omega}_{\text{min}} + I_H * R_{Я} = 2,017 * 10,47 + 8,7 * 1,011 = 29,92 \text{ В};$$

2.8. Характеристика строится по точкам номинальной нагрузки  $I_{Я} = I_{ЯН}$ ,  $\omega = \omega_{\text{min}}$  и режима холостого хода с координатами

$$I_{Я} = 0, \omega_{\text{min}} = \frac{U_{Я\text{min}}}{k\Phi_H} = \frac{29,92}{2,017} = 14,83 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

2.9. Строим электромеханическую характеристику:

Строим естественную электромеханическую характеристику двигателя постоянного тока независимого возбуждения по уравнениям:

$$\omega(I_{Я}) = \frac{U_{Я} - I_{Я} * R_{Я}}{k\Phi_H} = \frac{220 - 1,011 * 8,7}{2,017}$$

$$\omega_{\text{min}}(I_{Я}) = \frac{U_{Я\text{min}} - I_{Я} * R_{Я}}{k\Phi_H} = \frac{29,92 - 1,011 * 8,7}{2,017}$$

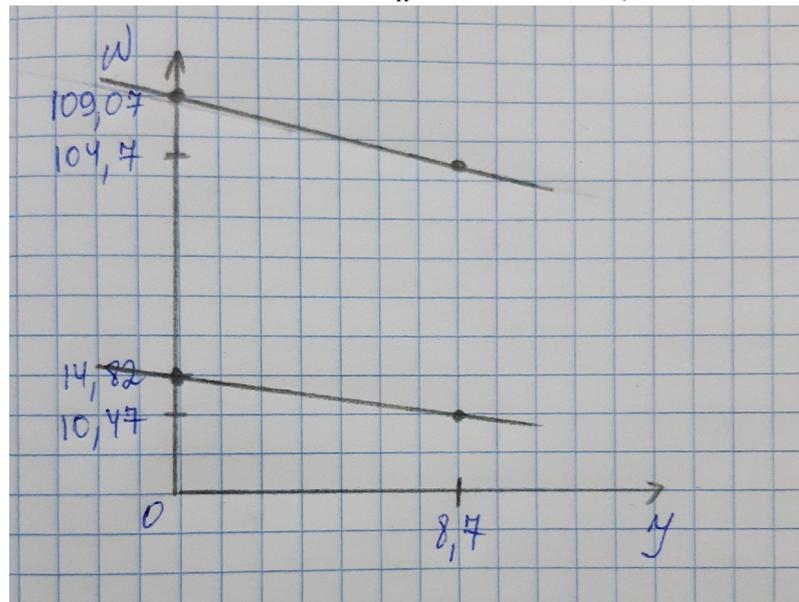


Рисунок 1 – «Электромеханическая характеристика»

2.10 Строим механическую характеристику по точкам:

$$\omega(M) = \frac{U_{Я} - I_{Я} * R_{Я}}{k\Phi_H} = \frac{220 - 1,011 * 8,7}{2,017}$$

$$\omega_{\text{min}}(M) = \frac{U_{Я\text{min}} - I_{Я} * R_{Я}}{k\Phi_H} = \frac{29,92 - 1,011 * 8,7}{2,017}$$

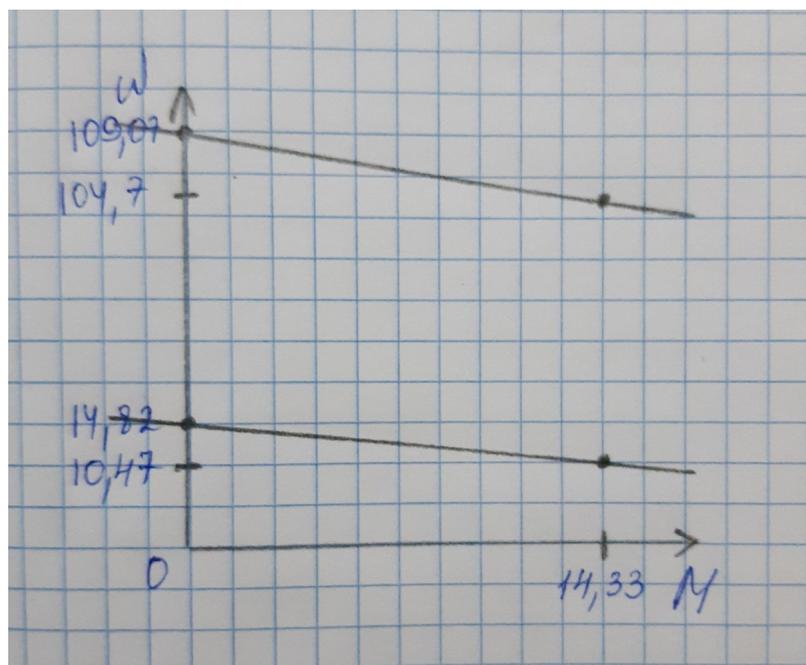


Рисунок 2 – «Механическая характеристика»

## 2 Расчет и выбор элементов силовой схемы

### 2.1. Расчет мощности и выбор силового трансформатора и вентилей преобразователя

Подводимое к схеме выпрямления напряжение

$$U_{2\phi} = K_H * K_u * K_a * K_R * U_n = 0,427 * 1,05 * 1 * 1,05 * 220 = 104 \text{ В};$$

Расчет действующее значение тока во вторичной обмотке определяется исходя из величины номинального тока двигателя  $I_n$  по формуле

$$I_2 = K_i * K_{T2} * I_n = 1,1 * 0,815 * 43 = 7,8 \text{ А};$$

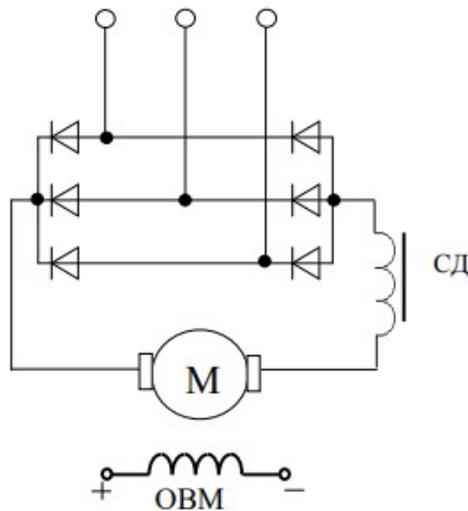


Рисунок 3 – «Трехфазная мостовая схема»

Расчет типовой мощности трансформатора производится с учетом нагрева первичной и вторичной обмоток трансформатора при помощи коэффициента КМ. Таким образом, типовая мощность трансформатора для преобразователя, питающего якорь двигателя, может быть рассчитана по формуле

$$S_T = K_u * K_a * K_R * K_i * K_M * U_n I_n = 1,05 * 1 * 1,05 * 1,1 * 1,045 * 220 * 8,7 = 2,425 \text{ кВА};$$

Трансформатор выбирается по типовой мощности и необходимому вторичному напряжению и проверяется по нагреву первичным током

Таблица 3 Технические данные силовых трансформаторов серии ТТ

Тип	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение U, В		Потери короткого замыкания, Вт	Напряжение короткого замыкания, % от ном.
		первичное	вторичное U <sub>2</sub>		
ТТ-1,0	1,0	380/220	104, 208	40	6
ТТ-1,6	1,6	380/220	104, 208	56	5
ТТ-2,5	2,5	380/220	104, 208	88	5
ТТ-6	6,0	380/220	208, 104	210	5
ТТ-8	8,0	380/220	104, 260, 208	280	5
ТТ-11	11,0	380/220	104, 400, 208	385	5
ТТ-14	14,0	380/220	104, 208	490	5
ТТ-19	19,0	380/220	104, 260, 208	665	5
ТТ-25	25,0	380/220	104, 400, 208	875	5
ТТ-35	35	380/220	104, 400, 208	1025	5

При выборе: Схема соединения обмоток Y/Y<sub>0</sub>

$$I_1 = K_i * K_{T1} * I_n = 1,1 * 0,817 * 8,7 = 7,82 \text{ A};$$

### Выбираем трансформатор ТТ-2,5

$$U_{1\Phi H} = 220 \text{ В}, U_{2\Phi H} = 104 \text{ В}, U_K = 5\%, \Delta P_{K3} = 88 \text{ Вт}.$$

$$K_T = \frac{U_{1\Phi H}}{U_{2\Phi H}} = \frac{220}{104} = 2,11$$

$$I_{1\Phi H} = \frac{S_T}{3 * U_H} = \frac{2,5 * 10^3}{3 * 220} = 3,78 \text{ А}$$

$$R_T = \frac{U_K * U_{1\Phi H}}{100 * I_{1\Phi H} * K_T^2} = \frac{5 * 220}{100 * 3,78 * 2,11^2} = 0,65 \text{ Ом}$$

$$X_T = \frac{\Delta P_{K3}}{m * I_{1\Phi H}^2 * K_T^2} = \frac{88}{6 * 3,78^2 * 2,11^2} = 0,23 \text{ Ом}$$

## 2.2. Расчет индуктивности сглаживающих реакторов (дресселей)

Индуктивность якорной цепи двигателя по эмпирической формуле

$$L_{я} = C_x \frac{U_H}{I_H * \omega_H * p} = 0, \frac{25 * 220}{8,7 * 104,7 * 4} = 0,006 \text{ Гн}$$

Индуктивность трансформатора определяется, как

$$L_T = \frac{X_T}{2 * \pi * f} = \frac{0,23}{2 * 3,14 * 50} = 0,732 * 10^{-3} \text{ Гн}$$

Необходимая индуктивность цепи

$$L_{яц} = L_{op} + L_{я} + L_T = \frac{e_e^i * E_{2cp}}{I_e^i * \omega_{оп} * I_{ном}} = \frac{0,24 * 220}{0,02 * 1884 * 8,7} = 0,161 \text{ Гн}$$

$$L_{op} = L_{яц} - L_{я} - L_T = 0,161 - 0,006 - 0,732 * 10^{-3} = 0,154 \text{ Гн}$$

Где  $\omega_{0П} = 2 * \pi * f * m = 2 * 3,14 * 50 * 6 = 1884$  рад/с - угловая частота пульсаций;

$e_e^i = 0,24$  - относительная величина ЭДС пульсаций для мостовой схемы.

### 2.3. Определение параметров привода и построение электромеханических характеристик

Значение коммутационного сопротивления:

$$R_K = \frac{X_T * m}{2 * \pi} = \frac{0,23 * 6}{6,28} = 0,22 \text{ Ом}$$

Эквивалентное внутреннее сопротивление преобразователя

$$R_{np} = 2 R_T + n * R_{dT} + R_K = 2 * 0,65 + 0,22 = 1,52 \text{ Ом}$$

Для мостовых схем  $R_T$  вдвое больше (сопротивление двух фазных обмоток). Величина  $n$  указывает число последовательно соединенных тиристоров (для мостовых схем удвоенное).

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{Я} = \frac{L_{яц}}{R_{\Sigma}} = \frac{0,161}{2,531} = 0,06$$

Где  $R_{\Sigma} = R_{Я} + R_{np} = 1,011 + 1,52 = 2,531 \text{ Ом}$

Далее производится расчет статических электромеханических характеристик привода в разомкнутой системе. ЭДС преобразователя при номинальной скорости и номинальной нагрузке

$$E_H = k\Phi_H \omega_H + \Delta U + I_H * R_{\Sigma} = 2,017 * 104,7 + 8,7 * 2,531 = 233,199 \text{ В}$$

Где  $\Delta U = \Delta U_B + \Delta U_{щ} \approx 0$  падение напряжения в переходах тиристоров и щеточных контактах двигателя

Статическая характеристика строится при изменении тока по формуле:

$$\omega_1(I) = \frac{E_H - \Delta U - I * R_{\Sigma}}{k\Phi_H} = \frac{233,199 - I * 2,531}{2,017}$$

ЭДС преобразователя при минимальной скорости и номинальной нагрузке

$$E_{n.min} = \frac{k\Phi_H * \omega_H}{D} + \Delta U + I * R_{\Sigma} = \frac{2,017 * 104,7}{10} + 8,7 * 2,531 = 43,14 \text{ В}$$

Нижняя статическая характеристика строится по формуле

$$\omega_2(I) = \frac{E_{n.min} - \Delta U - I * R_{\Sigma}}{k\Phi_H} = \frac{43,14 - I * 2,531}{2,017}$$

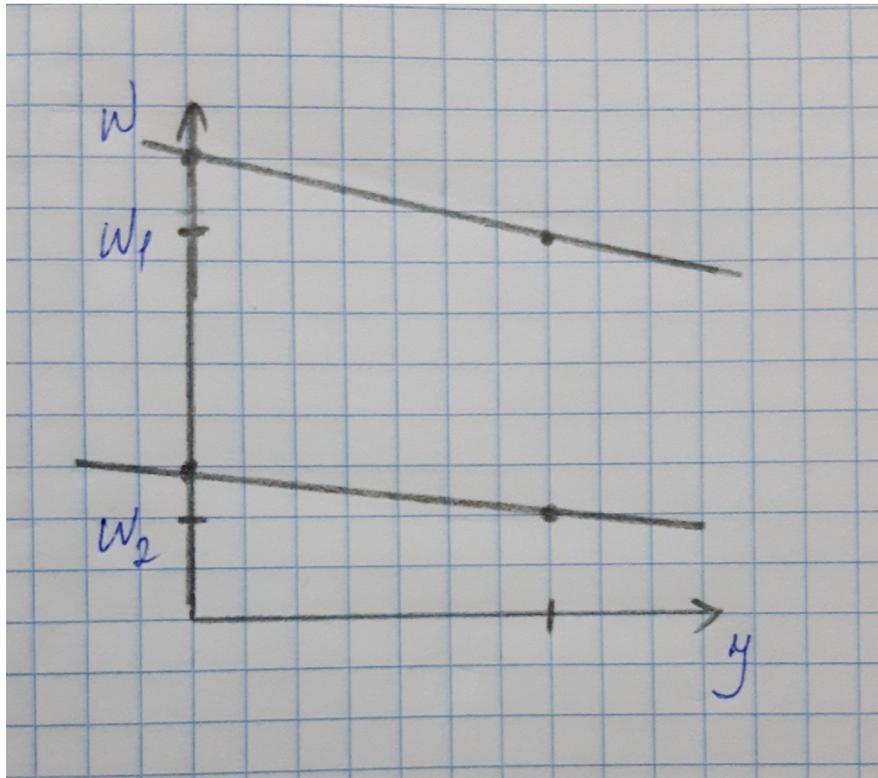


Рисунок 4 – «Нижняя статическая характеристика»

### 3 Двухконтурная система электропривода с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току

Как видно из предыдущих расчетов, жесткость механических характеристик электропривода с вентильным преобразователем относительно мал. В связи с этим с целью расширения диапазона регулирования скорости в системах вентильного электропривода постоянного тока могут использоваться обратные связи, а именно положительная по току якоря, либо отрицательные по скорости и по напряжению. С целью ограничения тока в вентильном преобразователе и якоре двигателя может использоваться задержанная отрицательная обратная связь по току (токовая отсечка). В этом случае электропривод имеет экскаваторную характеристику.

Система АЭП с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой (задержанной обратной связью) по току представлена на рисунке 5.

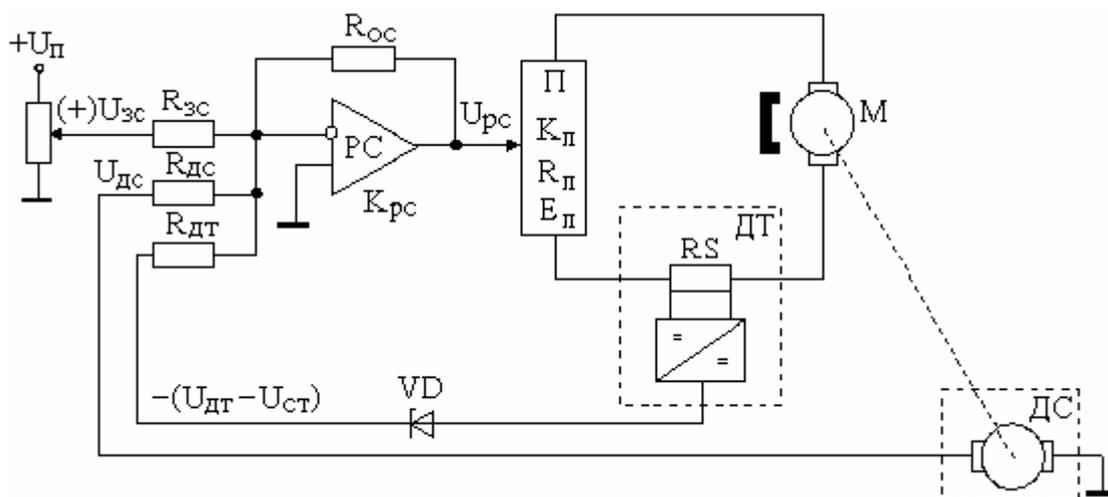


Рисунок 5 – «Система АЭП с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току»

В зависимости от величины тока якоря, возможны два режима работы привода:

$$а) I < I_{отс}, |U_{дт}| < U_{ст\text{ }VD}.$$

В рабочем диапазоне тока работает только одна отрицательная обратная связь по скорости (сигнал ОС по току не поступает на усилитель). Тогда напряжение управления (при  $R_{эс} = R_{дс}$ ) равно

$$U_y = (U_{эс} - U_{дс}) \cdot K_{рс} \quad (22)$$

ЭДС преобразователя уравнивается ЭДС двигателя и падением напряжения на эквивалентном сопротивлении

$$E_{п} = U_y \cdot K_{п} = E + I \cdot R_{э} \quad (23)$$

где  $E = k \cdot \Phi_n \cdot \omega$  - ЭДС якоря ДПТ;

$K_{\Pi}$  – коэффициент усиления преобразователя.

Напряжение датчика скорости пропорционально частоте вращения якоря двигателя:

$$U_{ДС} = K_{ДС} \cdot \omega \quad (24)$$

Совместное решение уравнений (22), (23) и (24) дает выражение (25) для первого участка электромеханической характеристики привода с отрицательной обратной связью по скорости:

$$\begin{aligned} (U_{ЗС} - K_{ДС} \cdot \omega) \cdot K_{РС} \cdot K_{\Pi} &= k \cdot \Phi_{Н} \cdot \omega + I \cdot R_{Э}; \\ U_{ЗС} \cdot K_{РС} \cdot K_{\Pi} + K_{ДС} \cdot \omega \cdot K_{РС} \cdot K_{\Pi} &= k \cdot \Phi_{Н} \cdot \omega + I \cdot R_{Э}; \\ \omega &= \frac{U_{ЗС} K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}}{1 + K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}} - \frac{I R_{Э} K_{\delta}}{1 + K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}} \end{aligned} \quad (25)$$

где  $K_{\delta} = 1/k\Phi_{Н}$  – коэффициент передачи двигателя.

б)  $I > I_{отс}$ ,  $|U_{ДТ}| > U_{СТ\text{вд}}$ .

В этом диапазоне тока одновременно на входе регулятора скорости действуют два сигнала ОС:

- сигнал по скорости, который стремится сделать скоростную характеристику более жесткой;
- сигнал по току, который стремится сделать скоростную характеристику более мягкой.

Для получения требуемой характеристики должна преобладать ОС по току. Сигнал управления становится равен

$$U_y = (U_{ЗС} - U_{ДС} - U_{ДТ} + U_{СТ}) \cdot K_{РС} \quad (26)$$

где  $U_{ДТ} = \beta \cdot I \cdot R_{Э}$  сигнал датчика тока;

$U_{СТ}$  – напряжение пробоя стабилитрона.

Решая совместно уравнения (23), (24) и (26), получим выражение (27) для второго участка электромеханической характеристики привода при наличии обратных связей по скорости и по току:

$$\begin{aligned} [U_{ЗС} - \omega \cdot K_{ДС} - \beta \cdot I \cdot (R_a + R_{\Pi}) + U_{СТ}] \cdot K_{РС} \cdot K_{\Pi} &= c_e \cdot \Phi_{Н} \cdot \omega + I \cdot (R_a + R_{\Pi}); \\ \omega &= \frac{U_{ЗС} K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta} + U_{СТ} K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}}{1 + K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}} - \frac{I R_{Э} (1 + \beta K_{РС} K_{\Pi}) K_{\delta}}{1 + K_{РС} K_{\Pi} K_{\delta}} \end{aligned} \quad (27)$$

#### 4 Определение параметров обратной связи

Перепад скорости в разомкнутой системе при номинальной нагрузке

$$\Delta \omega_p \approx \frac{I_H \cdot R_{\Sigma}}{C} = \frac{8,7 \cdot 2,531}{2,017} = \approx 10,917 \text{ с}^{-1}$$

где  $C = \kappa \Phi_H = 2,017$

Заданный перепад скорости в замкнутой системе

$$\Delta \omega_3 \approx \frac{\omega_H \cdot \delta_3}{D \cdot (1 - \delta_3)} = \frac{104,7}{10} \cdot \frac{0,06}{1 - 0,06} = \approx 0,668 \text{ с}^{-1}$$

где  $\delta_3 \approx \frac{\Delta \omega \%}{D} = \frac{6}{100} = \approx 0,06 \%$  - статистическая ошибка в относительных единицах.

Перепад скорости в замкнутой системе равен

$$\Delta \omega_3 = \frac{I_H R_{\Sigma}}{\kappa \Phi_H + K_{pc} K_n K_{\partial c}} = \frac{I_H R_{\Sigma} K_{\partial}}{1 + K_{pc} K_n K_{\partial c} K_{\partial}}$$

где  $K_{\partial} = 1/\kappa \Phi_H = 1/2,017 = 0,496$  – коэффициент передачи двигателя

Тогда необходимый коэффициент отрицательной обратной связи по скорости

$$\gamma_{\text{необх}} = K_{pc} K_{\partial c} = \frac{\Delta \omega_p - \Delta \omega_3}{\Delta \omega_3 \cdot K_n K_{\partial}}$$

$$\gamma_{\text{необх}} = \frac{10,917 - 0,668}{0,668 \cdot 23,319 \cdot 0,496} = 1,326$$

$$\text{где } K_n = \frac{E_H}{U_{y.H}} = \frac{233,199}{10} = 23,319$$

Значение коэффициента усиления  $K_n$  берется из регулировочных характеристик преобразователя при  $E_{n \text{ min}}$ . По необходимому коэффициенту обратной связи выбирается тахогенератор с фактическим значением

$$K_{\partial c} = \frac{U_{H.тг}}{\omega_{H.тг}} = \frac{10}{104,7} = 0,095$$

и рассчитывается коэффициент усиления регулятора скорости

$$K_{pc} = \frac{\gamma_{\text{необх}}}{K_{\partial c}} = \frac{1,326}{0,095} = 13,96$$

## Заключение

Когда мы строили механические характеристики они не достаточно жесткие для того чтобы обеспечить высокую точность, широкий диапазон регулирования. Анализ показывает, что жесткость механических характеристик электропривода с вентильным преобразователем относительно мала. В связи с этим, с целью расширения диапазона регулирования скорости в системах вентильного электропривода постоянного тока, могут использоваться обратные связи, а именно положительная по току якоря, либо отрицательные по скорости и по напряжению. РС – регулятор скорости с коэффициентом усиления КРС, ДС - датчик скорости с передаточным коэффициентом КДС. На сумматоре алгебраически складываются напряжения задания по скорости  $U_{ЗС}$  и напряжения от датчика скорости  $U_{ДС}$ .

## Список литературы

1. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода [Текст]: учебник / В.В. Москаленко.- М.: ИНФРА-М, 2011.- 208с.
2. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.:»Машиностроение», 2013.-176с.
3. Мустафин М.А., Алмуратова Н.К. Электропривод. Методические указания к выполнению курсовой работы.- Алматы: АУЭС, 2017.-34с.
4. П.И.Сагитов, Р.М.Шидерова, Н.К.Алмуратова Электропривод. Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности «Электроэнергетика».-Алматы: - АУЭС, 2014-34с.