

## Силовая электроника

### Контрольная работа содержит 2 задачи

Задачи составлены в 100 вариантах.

В соответствие со своим индивидуальным шифром студент должен выбрать исходные данные для своей контрольной работы. В заданиях использованы: последняя цифра шифра – *a* и предпоследняя цифра – *b*.

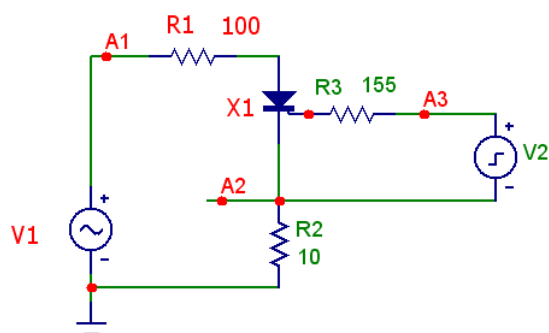
#### Задача 1

В качестве устройства управляемого преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока широко применяются тиристорные преобразователи (ТП).

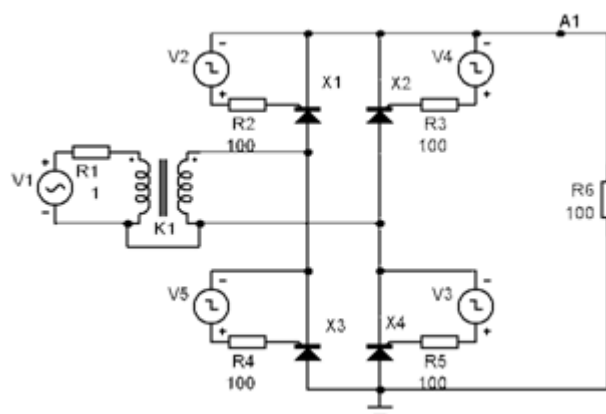
Система управления тиристоров регулирует поток энергии от сети переменного тока к электродвигателю и обратно путем формирования в определенные моменты времени отпирающих импульсов, подаваемых на управляющие переходы тиристоров, а также воздействием на коммутационные аппараты силовой части электропривода.

Для этого система управления включает в себя систему импульсно-фазового управления (СИФУ), формирующую последовательность отпирающих импульсов с требуемыми электрическими параметрами, моменты появления которых определяются напряжением управления, а также некоторыми дополнительными управляющими сигналами.

Схема однофазного, однополупериодного нереверсивного тиристорного преобразователя представлена на рис. 1, *a*.



*a)*



*б)*

Рис. 1

На рис. 1, *б* приведена схема однофазного, двухполупериодного нереверсивного тиристорного преобразователя с активной нагрузкой R6.

Схема управления тиристорами в двухполупериодном преобразователе состоит из генераторов импульсов  $V2, \dots, V5$  и резисторов  $R2, \dots, R5$ .

Осциллограммы напряжений на активной нагрузке в схеме однофазного, двухполупериодного неперекрывающегося тиристорного преобразователя приведены на рис. 2.

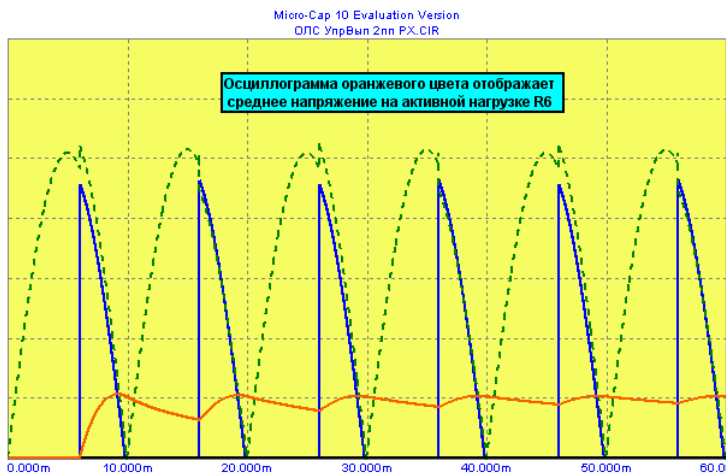


Рис. 2

На рис. 3 приведена схема трехфазного, однополупериодного тиристорного преобразователя с активной нагрузкой  $R$  и осциллограммы на его входах и выходах.

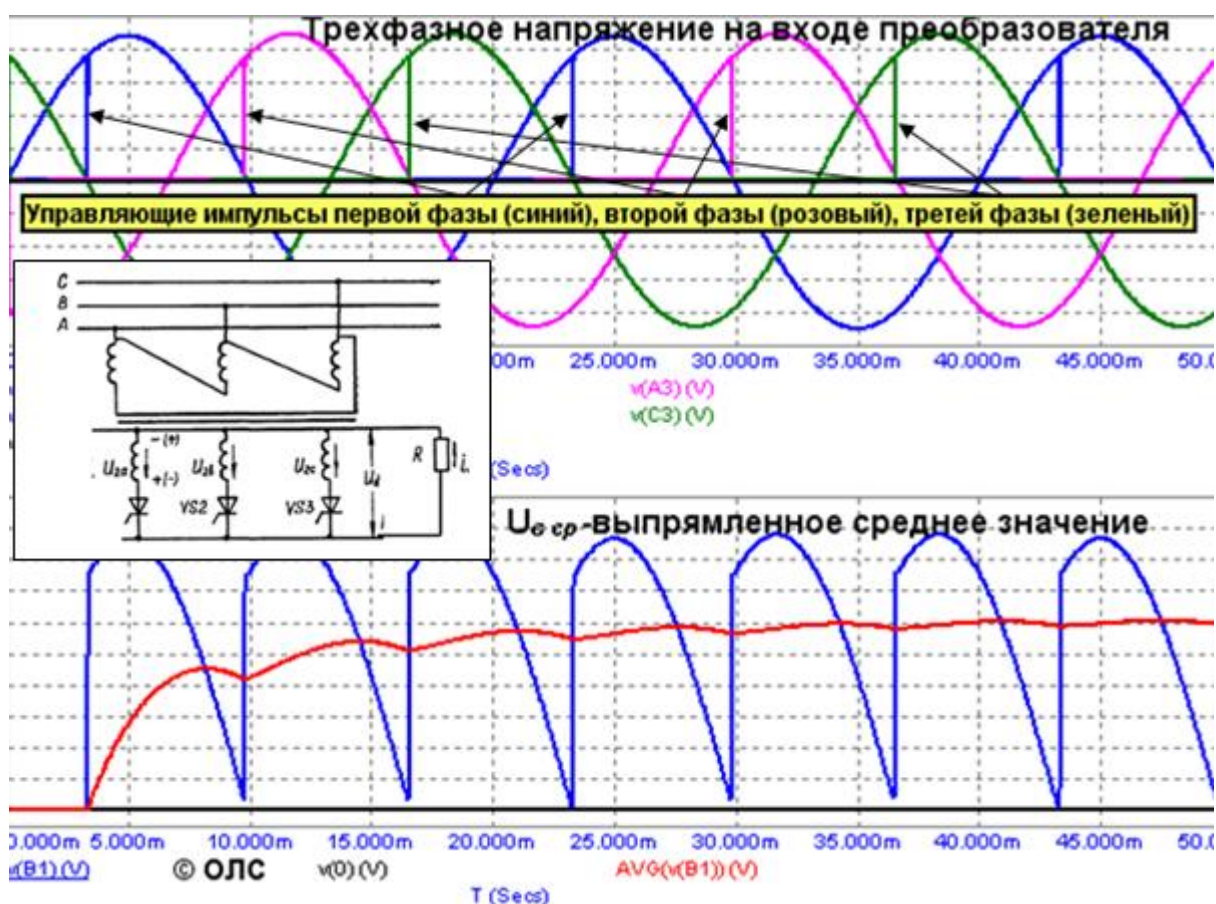
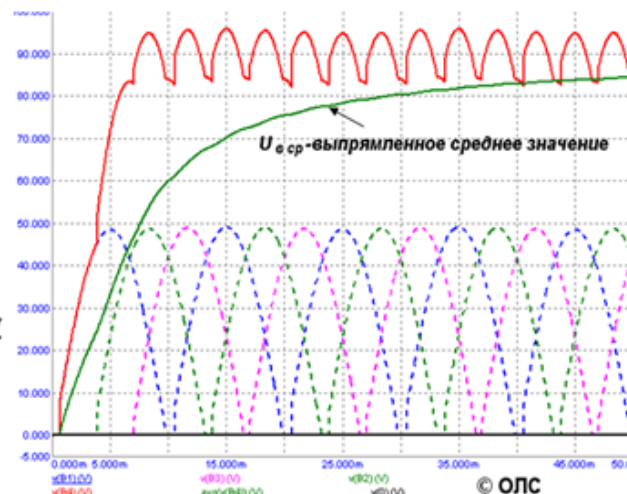


Рис. 3

На схеме преобразователя не показан блок управления тиристорами.

The diagram shows a three-phase thyristor rectifier circuit. The top part consists of three inductive loads labeled A, B, and C, each connected to a phase of a three-phase supply. Below these is a transformer with three secondary windings, labeled  $U_{2a}$ ,  $U_{2b}$ , and  $U_{2c}$ . The secondary terminals are connected to a bridge rectifier consisting of six thyristors: VS1, VS2, VS3, VS4, VS5, and VS6. The thyristors are arranged in three legs, with VS2 and VS1 in the first leg, VS4 and VS3 in the second, and VS6 and VS5 in the third. The load inductor  $L$  is connected between the positive output terminals of the bridge, and a switch  $K1$  is in series with it. A resistor  $R$  is connected in parallel with the inductor. The voltage across the inductor is labeled  $U_d$ . A dashed arrow labeled  $I_{VS3}$  indicates the current through thyristor VS3.



## Методические указания

- Б) Отсчёты регулировочной характеристики нереверсивного однофазного, однополупериодного тиристорного преобразователя записать в форму 1 в строку «Активная нагрузка».

[illegible]

| Активно-индуктивная нагрузка  |   |     |     |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------|---|-----|-----|--|--|--|--|--|--|
| $U_{в\text{ср}}, [\text{mV}]$ | 0 | ... | ... |  |  |  |  |  |  |

В) Для выполнения этого пункта при активно-индуктивной нагрузке следует открыть файл «OLS УпрВыбр 1пп i PX», снять регулировочную характеристику, заполнив форму 1.

На основании формы 1 построить зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{в\text{ср}}=f(\alpha)$  при активной и активно-индуктивной нагрузках (поощряется использование процессора «Excel» при построении зависимости  $U_{в\text{ср}}=f(\alpha)$ ).

Г) Сравнить регулировочные характеристики нереверсивного однофазного, однополупериодного тиристорного преобразователя при активной и активно-индуктивной нагрузках. Сделать выводы.

2. Снять регулировочную характеристику нереверсивного однофазного, двухполупериодного тиристорного преобразователя. Данная характеристика представляет зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{в\text{ср}}=f(\alpha)$  при разных видах нагрузки.

А) Для выполнения этого пункта при активной нагрузке следует открыть файл «OLS УпрВыбр 2пп PX».

Установку углов регулирования следует производить только в двух блоках управления V2 и V4, уменьшая при каждом отсчёте значения P1,...P4 на 1мс.

Б) Отсчёты регулировочной характеристики нереверсивного двухфазного, однополупериодного тиристорного преобразователя записать в форму 2 (строка активная нагрузка).

Форма 2

| № отсчёта                                                                                 | 1 | 2        | 3        | 4   | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---|----------|----------|-----|---|---|---|---|---|----|
| $\alpha [\text{rad}] (\text{мс})$                                                         | 0 | .314(-1) | .628(-2) | ... |   |   |   |   |   |    |
| Активная нагрузка                                                                         |   |          |          |     |   |   |   |   |   |    |
| $U_{в2\text{ср}}, [\text{mV}],$<br>$R6=10\text{ }\Omega, [Ом]$                            | 0 | ~466     | ...      | ... |   |   |   |   |   |    |
| Активно-индуктивная нагрузка                                                              |   |          |          |     |   |   |   |   |   |    |
| $U_{в2\text{ср}}, [\text{mV}],$<br>$R6=10\text{ }\Omega, [Ом],$<br>$L1=0, \text{a}, [Гн]$ | 0 | ...      | ...      |     |   |   |   |   |   |    |

В) Для выполнения этого пункта при активно-индуктивной нагрузке следует открыть файл «OLS УпрВыбр 2пп i PX», снять регулировочную характеристику, заполнив форму 2 строка «Активно-индуктивная нагрузка».

По результатам измерений в форме 2 построить зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{в2\text{ср}}=f(\alpha)$  и  $U_{в2\text{ср}}=f(\alpha, L1)$  при активной и активно-индуктивной нагрузках (поощряется исполь-

зование процессора «Excel» при построении зависимостей  $U_{\text{в2cp}}=f(\alpha)$  и  $U_{\text{в2cp}}=f(\alpha, L1)$ .

Г) Сравнить регулировочные характеристики нереверсивного однофазного, двухполупериодного тиристорного преобразователя при активной и активно-индуктивной нагрузках. Сделать выводы.

3. Снять регулировочную характеристику трехфазного, однополупериодного тиристорного преобразователя. Данная характеристика представляет зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{\text{в2cp}}=f(\alpha)$  при разных видах нагрузки.

А) Для выполнения этого пункта при активной и активно-индуктивной нагрузках следует открыть файл «OLS УпрВыпр 3ф 1пп»

Установку углов регулирования следует производить в трех блоках управления V2, V4, V6 уменьшая при каждом отсчёте значения P1,...P4 на 1мс.

Б) Отсчёты регулировочной характеристики нереверсивного трехфазного, однополупериодного тиристорного преобразователя записать в форму 3 (2 строка-«установка P1» в блоке V2; 3 строка-«установка P1» в блоке V4; 4 строка-«установка P1» в блоке V6).

Форма 3

| № отсчёта                                                                     | 1     | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| P1-V2 $\alpha$ (мс)                                                           | 6.2   | 5.2   | 4.2   | 3.2  | 2.2  | 1.2  | .2   |
| P1-V4 $\alpha$ (мс)                                                           | 19.5  | 18.5  | 17.5  | 16.5 | 15.5 | 14.5 | 13.5 |
| P1-V6 $\alpha$ (мс)                                                           | 12.88 | 11.88 | 10.88 | 9.88 | 8.88 | 7.88 | 6.88 |
| Активная нагрузка (ключ «Switch1» замкнут)                                    |       |       |       |      |      |      |      |
| $U_{\text{в2cp}}$ , [mV];<br>R13=10 $\bar{6}$ , [Ом]                          | ...   | ...   | ...   |      |      |      |      |
| Активно-индуктивная нагрузка (ключ «Switch1» разомкнут)                       |       |       |       |      |      |      |      |
| $U_{\text{в2cp}}$ , [mV];<br>L1= $\bar{a}$ , [Гн];<br>R13=10 $\bar{6}$ , [Ом] | ...   | ...   |       |      |      |      |      |

По данным формы 3 построить зависимости среднего значения выпрямленного напряжения от угла регулирования  $U_{\text{в2cp}}=f(\alpha)$  и  $U_{\text{в2cp}}=f(\alpha, L1)$  при активной и активно-индуктивной нагрузках.

Сравнить регулировочные характеристики трехфазного, однополупериодного тиристорного преобразователя при активной и активно-индуктивной нагрузках. Сделать выводы.

## Задача 2

Приводом одного валка прокатного стана является двухякорный двигатель, который имеет следующие параметры:

$$-U_{\text{ном}} = 2 \cdot 440 \text{ В};$$

$$-P = 2 \cdot 1000 \text{ кВт};$$

$$-\omega_{\text{дв}} = 33/84 \text{ рад/с};$$

$$-I_{\text{ном}} = 2460 \text{ А};$$

$$-I_{\text{max}} = 2,65 I_{\text{ном}}.$$

Структурная схема регулятора тока двигателя с внутренним контуром напряжения приведена на рис. 1.

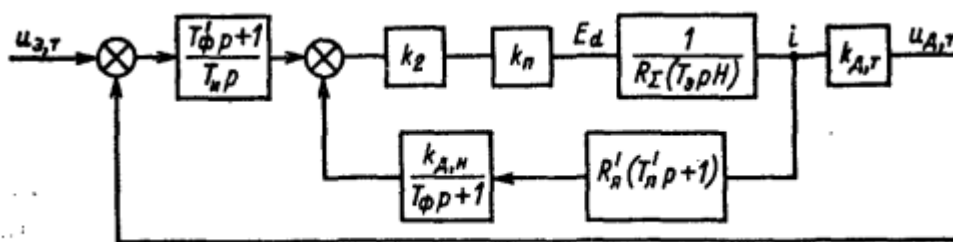


Рис. 1

Сопротивление цепи одного якоря электродвигателя, включающего обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной, равно  $9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ .

Момент инерции двигателя и механизма  $1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Число полюсов одного двигателя  $2p=8$ .

Оба якоря включены последовательно и подключены к тиристорному преобразователю (ТП) с параметрами  $U_{\text{дном}}=930 \text{ В}$ ,  $I_{\text{дном}}=25a0 \text{ А}$ .

Силовой трансформатор имеет действующее значение вторичного линейного напряжения  $U_2=9a0 \text{ В}$ , напряжение короткого замыкания  $u_k=7,6 \%$ , мощность потерь  $P_n=19,7 \text{ кВт}$ . Опорное напряжение системы импульсно-фазового управления (СИФУ)—косинусоидальное,  $U_{\text{оп max}}=10 \text{ В}$ .

Силовой трансформатор питается от сетевого трансформатора мощностью  $P_c=3 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{А}$ , имеющего напряжение короткого замыкания с учётом реактивности питающей цепи  $u_{kc}=16 \%$ .

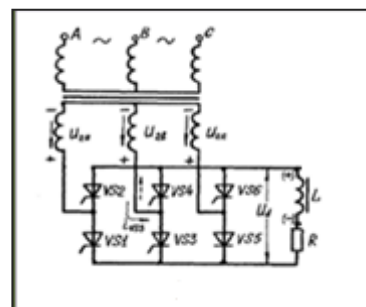
Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи якоря установлены два последовательно включённых сглаживающих реактора, имеющих суммарную индуктивность  $0,64 \text{ мГн}$  и мощность потерь  $2P_p=5 \text{ кВт}$ .

$a$ -последняя цифра шифра.

$b$ -предпоследняя цифра шифра.

При расчётах в методических указаниях принято

$a=0$ ,  $b=2$ .



## Методические указания

### А) Определить параметры блока управления двигателя.

1. Максимальное значение ЭДС ТП по формуле

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{2\pi}{m}, \quad (1)$$

где  $m$ —количество пульсаций выпрямления, при трехфазном питании  $m=6$ ;

$$U_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_2.$$

2. Полное значение  $u_{\Sigma}$  напряжения короткого замыкания по формуле

$$u_{\Sigma} = u_k + u_{kc} \frac{E_{d0} I_{dном}}{P_c}$$

3. Сопротивление фазы трансформатора по формуле

$$r_{\phi} = \frac{P_n}{3I_{\phi}^2} = \frac{P_n}{2I_{dном}^2}$$

4. Сопротивление сглаживающего реактора по формуле

$$r_p = \frac{2P_p}{I_{dном}^2} = \frac{5 \cdot 10^3}{2500^2}$$

Падение напряжения в ошинковке при токе  $I_{ном}$  примем равным  $0,01 U_{ном}$ .

Предполагая, что обратная связь по напряжению снимается непосредственно с выводов двигателя, получаем

$$R_{\Sigma} = 2R_{\Sigma}$$

5. Полное сопротивление цепи нагрузки по формуле

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma} + R_p + R_{ош.} + 2r_{\phi} + R_{эке}$$

где  $R_{ош.}$ —сопротивление ошинковки.

Относительное сопротивление цепи нагрузки

$$y = \frac{R_{\Sigma}}{E_{d0}} I_{ном}$$

6. Индуктивность фазы трансформатора по формуле

$$L_{\phi} = \frac{\pi u_k E_{d0}}{m \omega_0 I_{dном}}$$

7. Индуктивность цепи якоря по формуле

$$L_{\Sigma} = \frac{\pi U_{ном}}{20p \omega_{ном} I_{ном}}$$

8. Постоянная времени цепи якоря по формуле

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$$

9. Постоянная времени двигателя при  $L_{\Sigma} = L_{\Sigma}$

$$T_{\Sigma} = T_{\Sigma}$$

10. Определение  $k_e \cdot \Phi_{ном} = \frac{E_{ном}}{\omega_{ном}}$ .

$$E_{ном} = U_{ном} - R_{\Sigma} \cdot I_{ном}$$

### Б) Определить номиналы элементов регулятора тока применительно к схеме рис. 2.

На рис. 2 слева приведена электрическая схема регулятора тока двигателя с внутренним контуром напряжения, справа—осциллограммы.

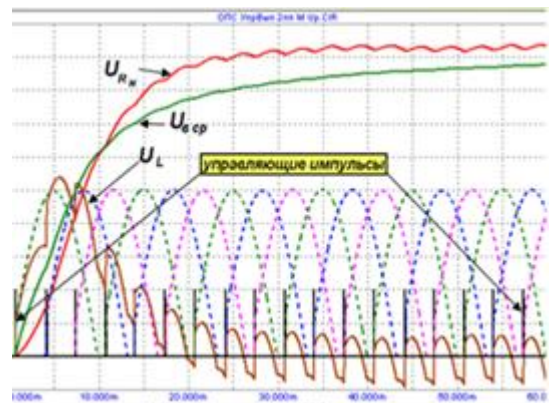
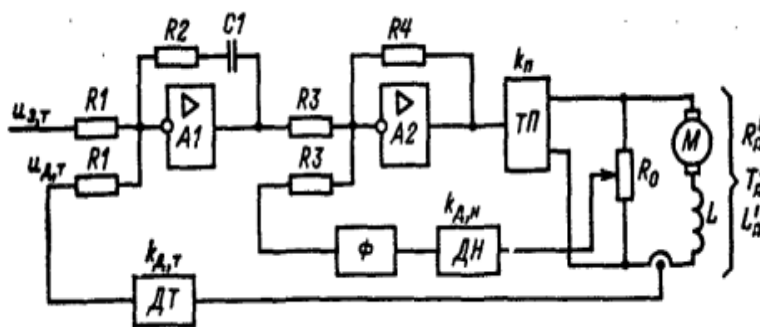


Рис. 2

1. Статический коэффициент усиления ТП по напряжению определяется для регулировочных характеристик (1) и для синусоидального опорного напряжения равен

$$k_n = \frac{E_{до}}{U_{он max}}$$

Была получена оценка критического коэффициента усиления контура напряжения по частоте среза равная  $k_{н кр} \leq 55$ .

Для получения достаточного запаса устойчивости следует принять  $k_n = 25$ . Тогда коэффициент усиления блока А2

$$k_2 = \frac{k_n}{k_n k_{дн}} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{R_3},$$

где  $k_{дн}$  — коэффициент передачи датчика напряжения,  $k_{дн} = \frac{U_{он max}}{E_{до}}$ .

Тогда при  $R_3 = 5$  кОм получаем  $R_4 = k_2 \cdot 5 = 330$  кОм.

Постоянная времени  $\Phi$  фильтра  $T_{\Sigma} = 23$  мс, коэффициент передачи звена равен единице.

Б) Расчёт номиналов элементов блока А1

Относительное сопротивление якорной цепи

$$y = \frac{R_{\Sigma}}{R_{ном}} = \frac{R_{\Sigma}}{R_3} y$$

$$R_1 C_1 = \frac{4}{y E_{до} k_{дн} \cdot 250}$$

Приняв  $C_1 = 1$  мкФ, определяем номинал  $R_1$ .

Номинал резистора  $R_2$  определяется из условия

$$R_2 C_1 = T_{\Sigma} / k_n$$

Из последнего соотношения следует номинал  $R_2$ .

### Расчёт параметров блоков

А) Расчёт параметров блока управления двигателя.

1. Максимальное значение ЭДС ТП по формуле

$$E_{до} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{2\pi}{m},$$

где  $m$  — количество пульсаций выпрямления, при трехфазном питании  $m = 6$ ;

$$U_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_2.$$

$$E_{d0} = \frac{6 \cdot 900 \cdot \sqrt{2}}{\pi \sqrt{3}} \sin \frac{2\pi}{6} = 1215 \text{ В.}$$

2. Полное значение  $u_{\Sigma}$  напряжения короткого замыкания по формуле

$$u_{\Sigma} = u_{\kappa} + u_{\kappa c} \frac{E_{d0} I_{d\kappa OM}}{P_c} = 0,072 + \frac{0,12 \cdot 1215 \cdot 2500}{3 \cdot 10^7} = 0,084.$$

3. Сопротивление фазы трансформатора

$$r_{\phi} = \frac{P_n}{3 I_{\phi}^2} = \frac{P_n}{2 I_{d\kappa OM}^2} = \frac{19,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 2500^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

4. Сопротивление сглаживающего реактора

$$r_p = \frac{2 P_p}{I_{d\kappa OM}^2} = \frac{5 \cdot 10^3}{2500^2} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Падение напряжения в ошинковке при токе  $I_{\text{НОМ}}$  примем равным  $0,01 U_{\text{НОМ}}$ .

Предполагая, что обратная связь по напряжению снимается непосредственно с выводов двигателя, получаем

$$R_{\dot{\lambda}} = 2 R_{\lambda} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

5. Полное сопротивление цепи нагрузки

$$R_{\Sigma} = R_{\dot{\lambda}} + R_p + R_{\text{ош.}} + 2 r_{\phi} + R_{\text{экс}} = 18 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 10^{-3} + \frac{0,01 \cdot 2 \cdot 440}{2460} + 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + \frac{0,5 \cdot 0,048 \cdot 1215}{2500} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,}$$

где  $R_{\text{ош.}}$  -- сопротивление ошинковки.

Относительное сопротивление цепи нагрузки

$$y = \frac{R_{\Sigma}}{E_{d0}} I_{\text{НОМ}} = \frac{46 \cdot 10^{-3} \cdot 2460}{1215} = 0,093.$$

6. Индуктивность фазы трансформатора

$$L_{\phi} = \frac{\pi u_{\kappa} E_{d0}}{m \omega_0 I_{d\kappa OM}} = \frac{\pi \cdot 0,084 \cdot 1215}{6 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2500} = 0,068 \text{ мГн.}$$

7. Индуктивность цепи якоря

$$L_{\lambda} = \frac{\pi U_{\kappa OM}}{20 p \omega_{\kappa OM} I_{\kappa OM}} = \frac{\pi \cdot 440}{20 \cdot 4 \cdot 33 \cdot 2460} = 0,21 \text{ мГн.}$$

8. Постоянная времени цепи якоря

$$T_{\lambda} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{(2 \cdot 0,21 + 0,64 + 2 \cdot 0,068) \cdot 10}{46 \cdot 10^{-3}} = 26 \text{ мс.}$$

9. Постоянная времени двигателя при  $L_{\dot{\lambda}} = L_{\lambda}$

$$T_{\dot{\lambda}} = T_{\lambda} = \frac{0,21 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{18 \cdot 10^{-3}} = 23 \text{ мс.}$$

10. Определение  $k_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}} = \frac{E_{\kappa OM}}{\omega_{\kappa OM}}$ .

$$E_{\kappa OM} = U_{\kappa OM} - R_{\dot{\lambda}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 440 - 9 \cdot 10^{-3} \cdot 2460 = 418 \text{ В.}$$

$$k_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}} = 418 / 33 = 12,67 \text{ Вс.}$$

## Б) Расчёт элементов регулятора тока применительно к схеме рис. 2.

1. Статический коэффициент усиления ТП по напряжению определяется для регулировочных характеристик (1) и для синусоидального опорного напряжения равен

$$k_n = \frac{E_{d0}}{U_{\text{оп max}}} = \frac{1215}{10} = 121,5.$$

Была получена оценка критического коэффициента усиления контура напряжения по частоте среза равная  $k_{н кр} \leq 55$ .

Для получения достаточного запаса устойчивости следует принять  $k_n = 25$ . Тогда коэффициент усиления блока А2

$$k_2 = \frac{k_n}{k_n k_{\partial n}} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{R_{\alpha}},$$

где  $k_{\partial n}$  — коэффициент передачи датчика напряжения,  $k_{\partial n} = \frac{U_{on\ max}}{E_{до}} \approx 8 \cdot 10^{-3}$ .

$$\text{Расчёт по формуле } k_2 = \frac{25}{121,5 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{46 \cdot 10^{-3}}{18 \cdot 10^{-3}} = 66.$$

Тогда при  $R_3 = 5$  кОм получаем  $R_4 = 66 \cdot 5 = 330$  кОм.

Постоянная времени  $\Phi$  фильтра  $T_{\alpha} = 23$  мс, коэффициент передачи звена равен единице.

Б) Расчёт номиналов элементов блока А1

Относительное сопротивление якорной цепи

$$y = \frac{R_{\alpha}}{R_{\text{яом}}} = \frac{R_{\alpha}}{R_{\Sigma}} y = \frac{18}{46} \cdot 0,093 \approx 0,036.$$

$$R_1 C_1 = \frac{4}{y E_{до} k_{\partial n} \cdot 250} = 45 \text{ мс.}$$

При  $C_1 = 1$  мкФ  $R_1 = 45$  кОм.

Номинал резистора  $R_2$  определяется из условия

$$R_2 C_1 = T_3 / k_n = 26 / 25 \approx 1 \text{ мс.}$$

Из последнего соотношения следует  $R_2 = 1$  кОм.

В результате проведенных расчётов была получена электрическая схема с номиналами элементов регулятора тока двигателя с внутренним контуром напряжения.

Данная схема содержит нереверсивный тиристорный преобразователь и предназначена для управления силовым приводом одного валка прокатного стана.