

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра автоматизации производственных процессов

**Моделирование двухконтурного электропривода  
с широтно-импульсным преобразователем**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
для студентов очной и заочной форм обучения  
по дисциплинам «Моделирование систем и процессов» и  
«Моделирование систем управления»  
направления 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и  
производств»,  
направления 27.03.04 «Управление в технических системах»

Курган 2017

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Дисциплина «Моделирование систем управления»

«Моделирование систем и процессов»

Составил: канд. техн. наук, доц. Лебединский Б.П.

Утверждены на заседании кафедры « 31 » августа 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета «12» декабря 2016 г.

## Введение

Электроприводы с двигателями постоянного тока и широтно-импульсными преобразователями (ШИП - ДПТ), питающиеся от сети переменного тока через неуправляемый выпрямитель, в последнее время все чаще применяют в металлорежущих станках, роботах, кузнечно-прессовом оборудовании, а также в других областях машиностроения.

В электроприводах ШИП - ДПТ имеется ряд преимуществ по сравнению с электроприводами, выполненными по схеме тиристорный преобразователь - двигатель (ТП - ДПТ) / 1,2 / . К таким преимуществам относятся: более высокое быстродействие отработки управляющих и возмущающих воздействий; более высокая плавность вращения двигателей; более высокий коэффициент мощности во всем диапазоне угловых скоростей; меньшие габаритные размеры силового трансформатора и дросселя в якорной цепи; снижение потерь и уровня высокочастотных помех в питающей сети.

При питании от источника постоянного тока с неизменным напряжением (например, бортовая сеть или аккумулятор) импульсное регулирование - практически единственно возможный способ регулирования скорости двигателя постоянного тока. Импульсное управление также весьма целесообразно при подаче управляющих сигналов от средств вычислительной техники.

При наличии указанных выше преимуществ электроприводы, выполненные по схеме ШИП - ДПТ, обладают худшими энергетическими показателями (ниже к.п.д.), чем электроприводы ТП - ДПТ. Кроме того, в электроприводах ШИП - ДПТ большие трудности с организацией тормозных режимов (с рекуперацией возникают энергии) и реверса двигателя по цепи якоря. Вследствие этих обстоятельств электроприводы ШИП - ДПТ используются при мощностях  $< (5... 10)$  кВт. Выпускаются электроприводы ЭШИР-1А, ЭШИР-60, ЭШИМ-1 (см. их технические характеристики в приложении 1). В комплекте с электроприводами могут использоваться двигатели серий ДП, ДПУ, 4ДПУ, ДПМ, ДК, ПБВ, 2П, 4П и др., номинальный ток и напряжение которых не превышают указанных в приложении 1 значений для каждого типоразмера. Обязательным требованием к двигателю является встроенный (на одном валу с двигателем) высококачественный тахогенератор.

### 1. Структурная схема и синтез коррекций электропривода

Структурная схема электропривода, построенного по системе ШИП - ДПТ, является двухконтурной с подчиненным регулированием (рисунок 1) /1/. Она включает в себя ДПТ, широтно-импульсный преобразователь -  $K_{шип}$ , П - регулятор тока, ПИ - регулятор скорости и датчики обратной связи по току -  $K_{от}$  и скорости -  $K_{ос}$ . ЗИ - задатчик интенсивности (задает скорость нарастания входного сигнала)

В тиристорных электроприводах, где передаточная функция преобразователя представляется инерционным звеном -  $W(p) = \frac{K_{тп}}{T_{\mu} p + 1}$  обычно

используют ПИ - регулятор тока.

В электроприводах с ШИП преобразователь является практически безынерционным и настройка токового контура может быть выполнена с помощью более простого П - регулятора тока. Его использование позволяет уменьшить инерционность токового контура до требуемой величины. В тиристорных же приводах инерционность определяется значением  $T_{\mu}$ , и попытка увеличить в них быстродействие токового контура ограничивается дискретностью тиристорного преобразователя и величиной чистого запаздывания при включении вентилей. В электроприводах с ШИП такого ограничения нет, и поэтому они обладают в (2...4) раза большим быстродействием, чем тиристорные приводы.

Преобразуем внутренний контур в структурной схеме (рисунок 1), представив его в виде, изображенном на рисунке 2. Целью такого преобразования является устранение перекрещивающихся обратных связей.

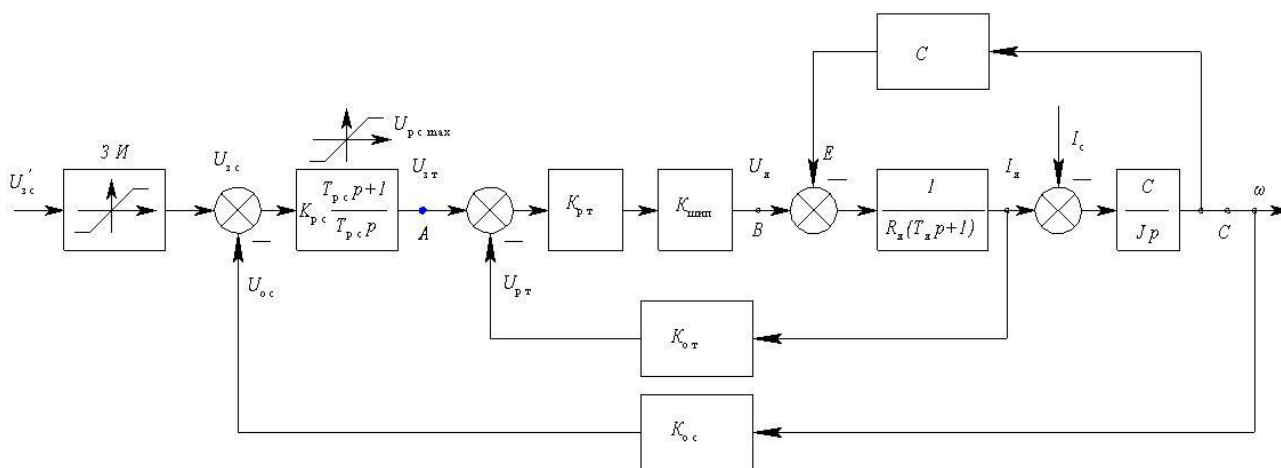


Рисунок 1. Структурная схема электропривода

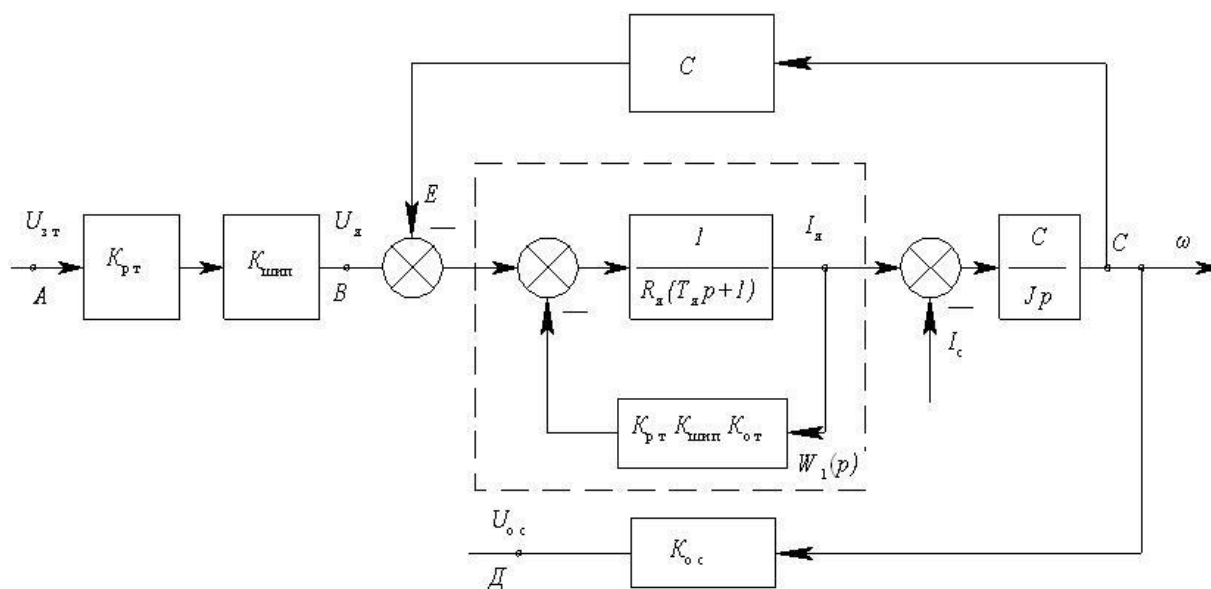


Рисунок 2. Преобразованная структурная схема

Передаточная функция  $W_1(p)$  внутреннего контура

$$W_1(p) = \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}} p + 1 + \frac{K_{\text{рт}} K_{\text{шип}} K_{\text{от}}}{R_{\text{я}}}} \quad (1)$$

где  $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  - электромагнитная постоянная времени якорной цепи.

Электрохимическая постоянная времени двигателя постоянного тока представляется в виде:

$$T_{\text{м}} = \frac{J R_{\text{я}}}{C^2} \quad (2)$$

При введении постоянной времени  $T_{\text{м}}$  будет иметь

$$\frac{C}{J p} = \frac{R_{\text{я}}}{C T_{\text{м}} p} \quad (3)$$

Передаточная функция  $W_2(p)$  между точками  $B$  и  $C$  структурной схемы (рисунок 2) приводится к виду:

$$W_2(p) = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{м}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{м}} A p + 1}, \quad (4)$$

где

$$A = 1 + \frac{K_{\text{рт}} K_{\text{шип}} K_{\text{от}}}{R_{\text{я}}}, \quad (5)$$

$K_{\text{д}} = \frac{1}{C}$  - коэффициент передачи двигателя в установившемся режиме;

$C = (U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}) / \omega_{\text{н}}$ ;  $A$  - коэффициент, значение которого зависит от параметров структурной схемы.

Представим передаточную функцию (4) в виде:

$$W_2(p) = \frac{K_{\text{д}}}{(T_{\text{д1}} p + 1)(T_{\text{д2}} p + 1)} = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д1}} T_{\text{д2}} p^2 + (T_{\text{д1}} + T_{\text{д2}}) p + 1}. \quad (6)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях полиномов (4) и (6), получим  $T_{\text{д1}} T_{\text{д2}} = T_{\text{м}} T_{\text{я}}$ ;  $T_{\text{м}} A = T_{\text{д1}} + T_{\text{д2}}$

Из этих выражений будем иметь

$$T_{\text{д1}} = \frac{T_{\text{м}} T_{\text{я}}}{T_{\text{д2}}} \quad (7)$$

$$T_{\text{д2}} = T_{\text{м}} A - T_{\text{д1}} \quad (8)$$

Передаточная функция  $W_3(p)$  между точками  $A$  и  $D$  структурной схемы (рисунок 2) включает в себя двигатель, преобразователь, охваченные обратной связью по току, и датчик обратной связи по скорости. Она имеет вид

$$W_3(p) = K_{\text{рт}} K_{\text{шип}} W_2(p) K_{\text{ос}} \quad (9)$$

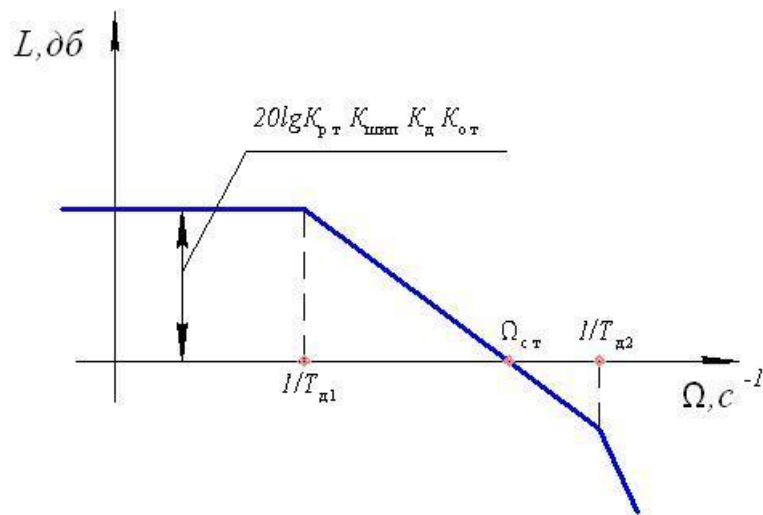


Рисунок 3. ЛАЧХ токового контура

Асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ), построенная для выражения (9), показана на рисунке 3. Она состоит из ЛАЧХ двух апериодических звеньев 1-го порядка соединенных последовательно. Частота среза внутреннего токового контура  $\Omega_{с\tau}$  (рисунок 3) определяется коэффициентами  $K_{pт}$ ,  $K_{шип}$ ,  $K_d$ ,  $K_{oc}$  и постоянной времени  $T_{д1}$

$$\Omega_{с\tau} = \frac{K_{pт} K_{шип} K_d K_{oc}}{T_{д1}} \quad (10)$$

Откуда, задавшись  $\Omega_{с\tau}$  (быстродействием токового контура), можно определить коэффициент передачи регулятора тока:

$$K_{pт} = \frac{\Omega_{с\tau} T_{д1}}{K_{шип} K_d K_{oc}} \quad (11)$$

Структурная схема электропривода с учетом выполненных ранее преобразований показана на рисунке 4.

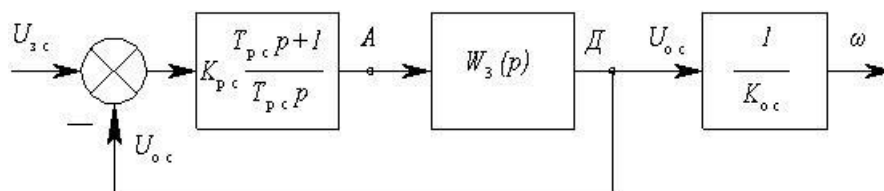


Рисунок 4. Структурная схема электропривода

На рис. 5 изображена результирующая ЛАЧХ разомкнутого внешнего (скоростного) контура. Она состоит из суммы ЛАЧХ токового контура и ПИ-регулятора скорости.

Из выражения (8) определим значение коэффициента А:

$$A = \frac{T_{д2} + T_{д1}}{T_{м}} = 1 + \frac{K_{рТ}K_{шип}K_{от}}{R_{я}}, \quad (12)$$

Из выражения (12) найдем значение  $K_{от}$

$$K_{от} = \frac{(T_{д2} + T_{д1} - T_{м})R_{я}}{T_{м}K_{рТ}K_{шип}} \quad (13)$$

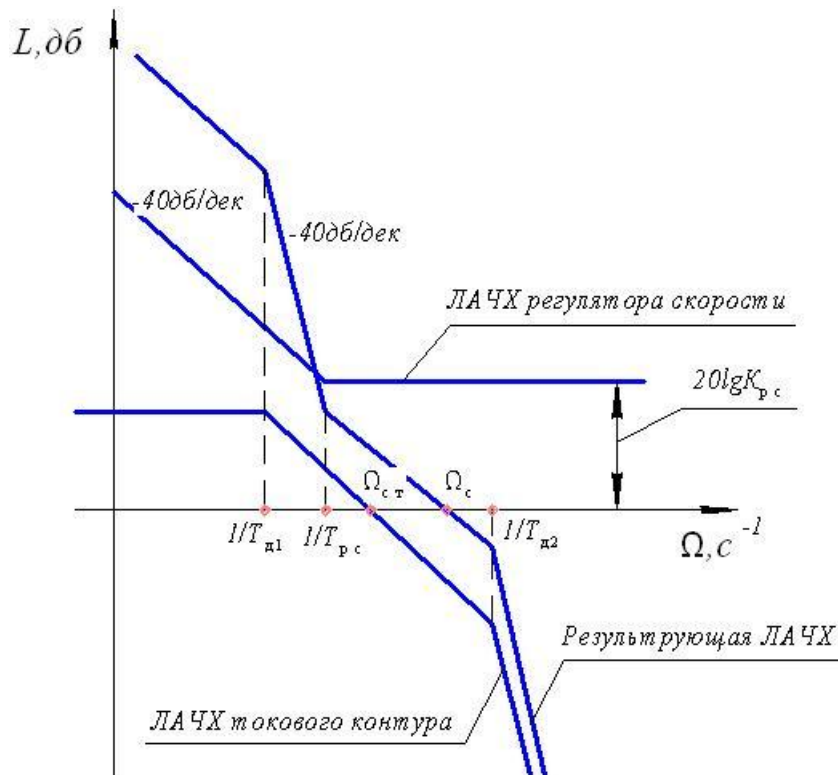


Рисунок 5. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики

## 2. Подготовка исходных данных для расчета

В процессе подготовки к выполнению расчетов в программном продукте VISSIM задаются паспортные данные электродвигателя:

- номинальное напряжение  $U_{н}$ , В ;
- номинальный ток якоря  $I_{ян}$ , А ;
- номинальная скорость вращения  $\omega_{н}$ , рад/с;
- суммарный момент инерции  $I_{\Sigma} = I_{д} + I_{мех\ сист}$ , кг· м<sup>2</sup>;
- номинальная мощность  $P_{н}$ , Вт ;
- сопротивление якорной цепи  $R_{я}$ , Ом ;
- индуктивность якорной цепи  $L_{я}$ , Гн

В том случае, если  $R_{я}$  и  $L_{я}$  отсутствует в паспортных данных, то их определяют по приближенным формулам:

$$R_{я} \approx 0,5 \frac{U_{н}}{I_{ян}} \left( 1 - \frac{P_{н}}{I_{ян} U_{н}} \right) \quad (14)$$

$$L_{я} \approx \gamma \frac{U_{н}}{p\omega_{н}I_{ян}} \quad (15)$$

где  $\gamma = 0,25$  для компенсированного двигателя;  $p$  - число пар полюсов.

Динамические характеристики электропривода принято оценивать его полосой пропускания (частотой среза ЛАЧХ разомкнутого контура). Для электропривода ЭШИР-1  $f_c \leq 120$  Гц ( $\Omega_c \leq 955$  рад/с). Завод-изготовитель рекомендует выбирать  $\Omega_c$  в интервале (600...755) рад/с, а частоту среза токового контура  $\Omega_{с\tau} = (100...300)$  рад/с.

Коэффициент обратной связи по скорости определяется коэффициентом передачи тахогенератора и коэффициентом передачи согласующей цепи обратной связи.

Его величину определяют по требуемой максимальной скорости

$$K_{ос} = \frac{U_{зс\max}}{\omega_{\max}} \quad (16)$$

где  $U_{зс\max} = 10$  В; Принять  $\omega_{\max} = 1,5\omega_{н}$

Коэффициент передачи широтно-импульсного преобразователя определяют по формуле

$$K_{шип} = \frac{U_{я\max}}{U_{рт\max}} \quad (17)$$

где  $U_{рт\max} = 10$  В;  $U_{я\max}$  - максимальное напряжение, подаваемое на якорь электродвигателя ( $U_{я\max} \approx C\omega_{\max}$ ). Для расчетов можно принять, что максимальной скоростью является номинальная скорость электродвигателя.

В ТАУ достаточно широко используется синтез корректирующих устройств по показателю колебательности  $M$ . Для результирующей ЛАЧХ разомкнутого электропривода (рисунок 5) показатель колебательности не превышает допустимого значения, если удовлетворяются соотношения

$$T_{д2} = \frac{1}{\Omega_c} \frac{M}{M+1} \quad (18)$$

$$T_{рс} = \frac{1}{\Omega_c} \frac{M}{M-1} \quad (19)$$

В хорошо демпфированных системах с малым перерегулированием ( $G < 30\%$ ) показатель колебательности принимают  $M = (1,1...1,3)$ . Задаваясь величиной  $M$  (чем меньше  $M$ , тем меньше  $G$ ) и  $\Omega_c$ , по выражениям (18), (19) определяют  $T_{д2}$  и  $T_{рс}$  (см. рисунок 5). По выражению (7) вычисляют  $T_{д1}$ , а затем по выражениям (11), (13) -  $K_{рт}$  и  $K_{от}$ .

Коэффициент передачи регулятора скорости  $K_{рс}$  в соответствии с рисунок 5 определяется по формуле

$$K_{рс} = \frac{\Omega_c}{\Omega_{с\tau}} \quad (20)$$



На входе электропривода может быть установлен задатчик интенсивности (ЗИ) для задания темпа изменения скорости в процессе разгона и торможения. Обычно в задатчике интенсивности реализуют линейный закон нарастания задающего сигнала (рисунок 6) за время, примерно равное требуемой длительности переходного процесса.

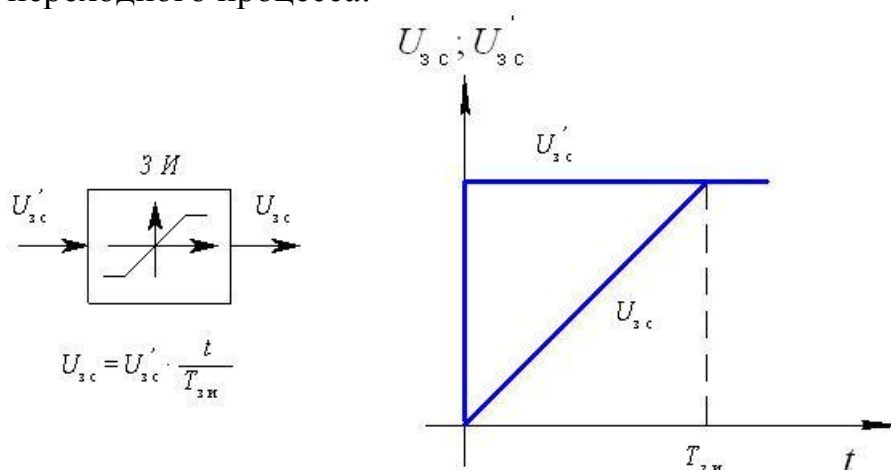


Рисунок 6. Задатчик интенсивности

Ограничение тока двигателя при пусках, и торможениях в системах подчиненного регулирования может достигаться не ограничением выходного сигнала регулятора скорости (ограничение сохраняется как средство защиты), а применением задатчика интенсивности, посредством которого сигнал задания скорости изменяется не скачком, а линейно во времени до требуемого уровня. Ток якоря при этом устанавливается и спадает в конце пуска или торможения по оптимальному закону, а угловая скорость привода при  $M_c = const$  изменяется по линейному закону, следуя за сигналом задатчика интенсивности (рисунок 7). Основным достоинством применения задатчика интенсивности является независимость значения ускорения привода от статического момента. Таким образом, ЗИ позволяет формировать переходные процессы в электроприводе, близкие к оптимальным (в смысле быстрейшего действия).

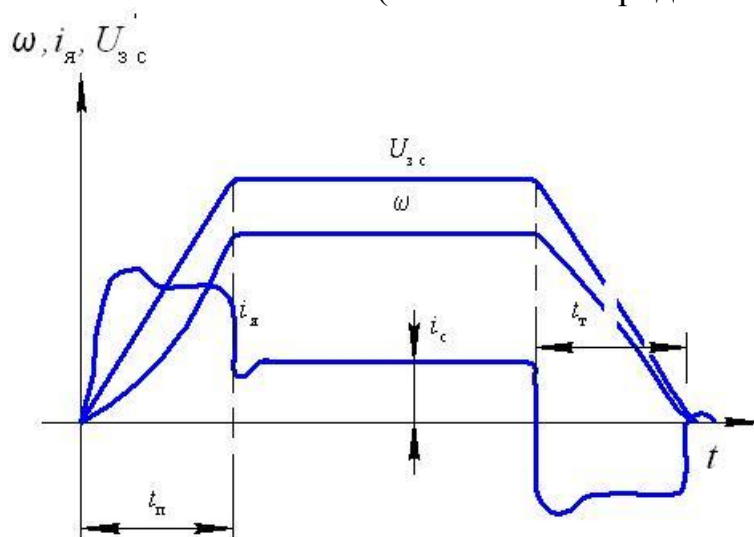


Рисунок 7. Формирование переходных процессов при пуске и торможении электропривода

Постоянная времени задатчика интенсивности  $T_{зи}$  приближенно может быть определена из следующих соображений. Уравнение движения электропривода

$$J\varepsilon = M - M_c = C(i_{я} - i_c) \quad (22)$$

где  $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$  - ускорение.

Отсюда

$$\varepsilon = \frac{C(i_{я} - i_c)}{J} = \frac{R_{я}(i_{я} - i_c)}{CT_M} \quad (23)$$

Если  $\varepsilon = const$ , что имеет место на участке разгона и торможения (рисунок 7), то это приводит к тому, что

$$i_{дин} = i_{я} - i_c = const.$$

Из выражения (23), задавшись  $i_{я max}$  и  $i_c = \frac{M_c}{C}$ , можно определить величину ускорения  $\varepsilon_{max}$ , которую будет обеспечивать электропривод в переходных режимах. В то же время такой же темп изменения (или меньше) должен обеспечивать задатчик интенсивности

$$U_{зи} = t/T_{зи}; \quad \omega = \varepsilon t$$

Отсюда

$$\frac{1}{(T_{зи})_{max}} \leq \varepsilon_{max} \quad (24)$$

Из этого выражения определяется  $(T_{зи})_{max}$ . Отметим, что если  $T_{зи} < 1/\varepsilon_{max}$ , то привод не сможет обеспечить требуемый темп изменения скорости.

### 3. Порядок выполнения работы

1. При подготовке к выполнению работы:

1.1 Вывести формулы (1) и (4)

1.2 Доказать справедливость формулы (10) (использовать результаты пункта 6 контрольных вопросов).

1.3 Для заданного двигателя выполнить расчет параметров электропривода и по численным данным построить с соблюдением масштаба ЛАЧХ разомкнутого электропривода.

1.4 Построить ЛАЧХ замкнутого электропривода.

2. В программном продукте VISSIM собрать модель электропривода (рисунок 1) без задатчика интенсивности.

Параметры электропривода задавать в сформированном «блоке задания данных».

На вход электропривода подать единичный скачок величиной  $U_{зс} = 1$  В. Снять переходные процессы  $\omega(t)$  и  $i_{я}(t)$ . Определить время пуска -  $t_{п}$ , величину перерегулирования -  $G$  и максимальное значение пускового тока -  $i_{я max}$ .

Приложение нагрузки  $M_c = M_H$  задавать после выхода двигателя на

установившееся значение скорости.

3. Определить влияние на переходные процессы коэффициента передачи регулятора скорости  $k_{pc}$ . Сначала его величину увеличить на 50% относительно расчетного значения, а затем уменьшить на ту же величину.

4. Определить влияние  $T_{pc}$  на переходные процессы  $\omega(t)$  и  $i_{я}(t)$ .

5. Подключить задатчик интенсивности и изменяя  $T_{зи}$  снять переходные процессы пуска, торможения и реверса.

Установить величину  $T_{зи}$  такой, чтобы  $i_{я\max} \leq 4i_{ян}$ . Сделать выводы анализа переходных процессов.

6. Определить ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого электропривода и сравнить их с расчетными значениями.

#### 4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.

2. Изобразить структурную схему электропривода.

3. Привести расчетные формулы и результаты расчетов параметров электропривода.

4. Изобразить ЛАЧХ замкнутого и разомкнутого электропривода.

5. Привести вид переходных процессов, полученных в пунктах 2, 3, 4, 5 и определить для них  $t_{п}$ ,  $G$  и  $i_{я\max}$ . Сделать соответствующие выводы.

6. В конце отчета сделать заключение и выводы по работе.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы широтно-импульсных преобразователей.

2. При каких условиях передаточная функция (4) может быть представлена в виде (6)?

3. Покажите (с помощью численных расчетов), что постоянная времени замкнутого контура значительно меньше, чем  $T_m$ .

4. Для чего используется в электроприводах задатчик интенсивности?

5. Поясните, как будет изменяться  $i_{я}$ ,  $\omega$ ,  $U_{pc}$ ,  $U_{рт}$  при подаче входного и возмущающего воздействия в виде скачка.

6. Покажите, что для инерционного звена  $W(p) = \frac{K}{T_p + 1}$  частота среза ЛАЧХ определяется выражением

$$\Omega_c = K/T$$

## Список литературы

1. Быстродействующие электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями /М.Е. Гольц, А.Б.Гудзенко, В.М.Остреров и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
2. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода: Учебное пособие. - 2-е изд. – Минск, Техноперспектива, 2007. -585с.
3. Онищенко Г. В. Электрический привод , 2-е изд.- М.: Издательский центр «Академия», 2008-288 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. - М: Энергоиздат, 1998.

Приложение А

Характеристика	ЭШИР-1Ф	ЭШИР-60	ЭТЭК	ЭШИМ-1				
				кассетное исполнение		блочное исполнение		
Исходное напряжение, В	140	60	150	60		150 и 220		180
Длительный ток, А	16	6	16	4	8	16	25	40
Максимальный ток, А	50	25	40	10	20	40	63	100
Диапазон регулирования скорости	10 <sup>4</sup>							
Полоса пропускания, Гц	120			100				
Управляющий сигнал, В	±10							
Входное сопротивление, кОм	2			2,7		20		
Вход сигнала «разрешение работы»	есть							
Выход сигнала «готовность к работе»	нет			есть				
Выход сигнала «управление тормозом»	нет			есть				
Количество координат	1	2	3	1-6		1-3		
Гальваническая развязка цепей управления по координатам	-	есть		нет		есть		

Борис Петрович Лебединский

**Моделирование двухконтурного электропривода  
с широтно-импульсным преобразователем**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
для студентов очной и заочной форм обучения  
по дисциплинам «Моделирование систем и процессов» и  
«Моделирование систем управления»  
направления 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и  
производств»,  
направления 27.03.04 «Управление в технических системах»

Авторская редакция

---

Подписано к печати 26.01.18	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,0	Уч. изд. л. 1,0
Заказ №11	Тираж 25	Не для продажи

---

Библиотечно-издательский центр КГУ.  
640020, г. Курган, ул. Советская 63, стр.4  
Курганский государственный университет.