

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

В.П. Андрейченко, В.Н. Фатеев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к расчетно-графической работе**

**«ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА»**

*(для студентов 4 курса всех форм обучения по специальности
6.092200 – «Электромеханические системы автоматизации и
электропривода»)*

Харьков – ХНАМГ – 2009

Методические указания к выполнению расчетно-графической работы «Электромеханическая система управления металлорежущего станка» (для студентов 4 курса всех форм обучения по специальности 6.092200 – «Электромеханические системы автоматизации и электропривода») / Составители: Андрейченко В.П., Фатеев В.Н. – Харьков: ХНАГХ – 2009. – 28с.

Составители: В.П. Андрейченко, В.Н. Фатеев

Рецензент: доц., к.т.н. Н.И. Шпика

Рекомендовано кафедрой электрического транспорта,
протокол № 2 от 09.09.2008 г.

Цель расчетно-графического задания (РГЗ): курс «Проектирование электромеханических устройств и систем» занимает важное место в подготовке инженера электромеханика, так как электромеханические системы являются основными потребителями электроэнергии в народном хозяйстве, определяют уровень механизации и автоматизации технологических процессов и оказывают существенное влияние на эффективность их функционирования. РГЗ по курсу «Проектирование электромеханических устройств и систем» должно дать студенту целостное представление о методике и последовательности решения множества взаимосвязанных задач, начиная от получения технического задания и кончая выпуском рабочей конструкторской документацией.

I. Содержание расчетно-графического задания

РГЗ выполняется в виде расчетно-пояснительной записки объемом 20÷25 страниц, содержащей следующий материал:

1. Технические данные технологического механизма.
2. Описание автоматизируемого технологического механизма и выбор электромеханической системы по роду тока.
3. Определение функциональной схемы системы и выбор элементов силовой цепи.
4. Расчет параметров системы регулирования.
5. Определение показателей качества системы.

В записке должна быть представлена функциональная схема электропривода, а также структурная схема скорректированной системы и необходимые расчетные зависимости.

II. Методические указания по выполнению отдельных разделов РГЗ

2.1. Технические данные технологического механизма.

В данном разделе пояснительной записки необходимо сформулировать основные задачи, которые следует решать при выполнении РГЗ, а также привести исходные данные для расчета (см. Приложение 1).

2.2. Описание проектируемой электромеханической системы и выбор ее по роду тока

Требования, предъявляемые к электромеханическим системам, определяются технологическими особенностями автоматизируемого механизма, конструктивным исполнением механического оборудования, специфическими условиями эксплуатации электрооборудования в данной отрасли промышленности. Первое, что необходимо сделать на основании этих требований, выбрать систему по роду тока.

В РГЗ разрабатывается электромеханическая система для сложного производственного механизма – продольно-строгального станка. В данном разделе дается краткая характеристика продольно-строгального станка, описывается технология обработки изделия, приводится кинематическая схема и характеризуется назначение применяемых на станке электромеханических систем. Эти вопросы изложены в [1, 2].

Детальной разработке подлежит электромеханическая система автоматического управления главным электроприводом станка, которым является электропривод перемещения стола.

Диаграммы скорости движения стола, тяговых усилий и момента двигателя за один двойной ход стола приведены на рис.1. Здесь $t_1 (с)$ – время, в течение которого стол разгоняется до скорости $v_{ex} (м/с)$. Величина v_{ex} выбирается такой, чтобы в процессе входа резца в изделия не сминался край изделия и не ломался резец; $F_{mp.x.x} (Н)$ – усилие трения стола о направляющие:

$$F_{mp.x.x} = \mu g(m_c + m_d), \quad (1)$$

где $\mu=0,05$ – коэффициент трения стола о направляющие; $m_c, m_d (кг)$ – масса стола и детали; $g (м/с^2)$ – ускорение силы тяжести. $M_{don} (Н·м)$ – максимально допустимый момент, который для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением равен $M_{don} \leq 2,5M_n$; $M_n (Н·м)$ – номинальный момент двигателя; $t_2 (с)$ – время, в течение которого стол движется с постоянной скоростью v_{ex} ; $M_I (Н·м)$ – соответствующий момент, развиваемый двигателем:

$$M_I = F_{mp.x.x} \rho / \eta_n, \quad (2)$$

где ρ (м/рад) – радиус приведения механического передаточного устройства (МПУ) главного электропривода станка ; η_n = к.п.д. (МПУ), равный:

$$\eta_n = \eta_n^n, \quad (3)$$

где n - число ступеней передачи, $\eta_n = 0,96 \div 0,98$ – номинальный к.п.д. зубчатой пары; t_3 (с) – время, в течение которого резец врезается в металл; $F_{тяг} = F_{p\Sigma} + F_{тр}$ – тяговое усилие на столе, где $F_{p\Sigma}(H) = F_p(N_{св} + N_{сг})$ – суммарное усилие резания (см. Приложение 1); $F_{тр}(H) = [F_y + \mu g(m_c + m_q)]$ – усилие трения с учетом вертикальной составляющей усилия резания $F_y(H) = 0,4 F_p N_{св}$; M_2 (Н·м) – соответствующий момент двигателя:

$$M_2(H \cdot м) = F_{тяг} \rho / \eta_n, \quad (4)$$

t_4 (с) – время, в течение которого стол разгоняется до скорости резания v_p (м/с) при моменте двигателя, равном $M_{дон}$; t_5 (с) – время, в течение которого стол движется со скоростью резания v_p . Нагрузка на привод определяется величиной $F_{тяг}$. Момент, развиваемый двигателем, равен M_2 ; t_6 (с) – время, в течение которого скорость снижается до величины $v_{вых}$, что предотвращает скалывание кромки изделия при выходе резца. При этом двигатель работает в тормозном режиме с предельно допустимым моментом $M_{дон}$; t_7 (с) – время выхода резца из металла. Нагрузка на привод определяется величиной $F_{тяг}$, а момент двигателя равен M_2 ; t_8 (с) – время, в течение которого стол движется с постоянной скоростью $v_{вых}$. При этом нагрузка на привод определяется величиной $F_{тр.х.х}$, а момент двигателя равен M_1 ; t_9 (с) – время, в течение которого скорость стола снижается до нуля. Двигатель работает в тормозном режиме с предельно допустимым моментом $M_{дон}$; t_{10} (с) – время, в течение которого стол разгоняется до скорости обратного хода $v_{\bar{o}}$ (м/с). При переходе скорости через нулевое значение усилие $F_{тр.х.х}$ меняет свой знак. Двигатель продолжает работать с $M_{дон}$; t_{11} (с) – время, в течение которого стол движется с установившейся скоростью $v_{\bar{o}}$ при $F = F_{тр.х.х}$ и $M = M_1$; t_{12} (с) – время, в течение которого скорость стола уменьшается до нуля. При этом двигатель работает с предельно допустимым моментом $M_{дон}$. Далее цикл работы повторяется.

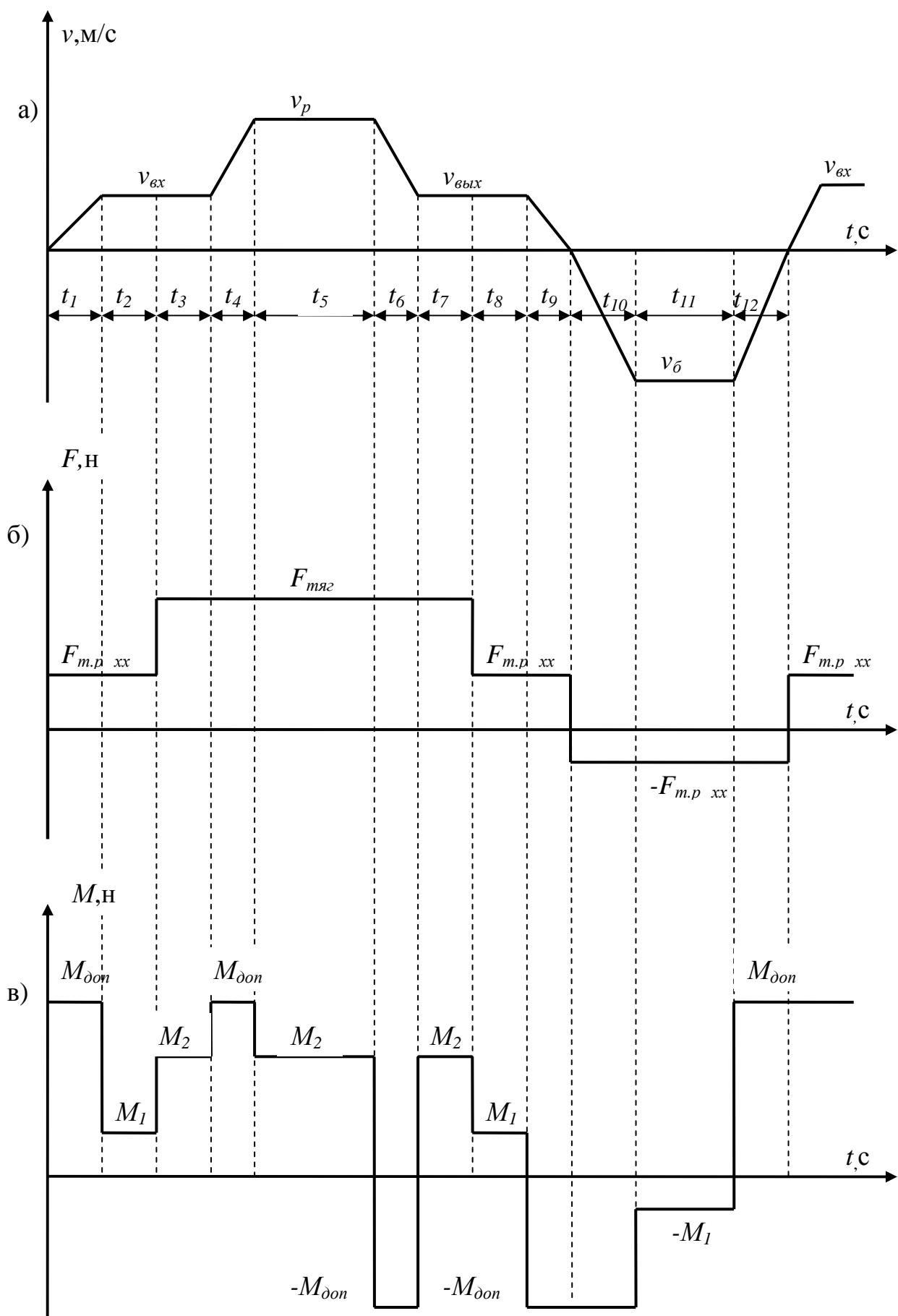


Рис. 1. а) тахограмма движения стола; б) диаграмма усилий;
в) нагрузочная диаграмма двигателя

Выбор наиболее эффективных режимов резания при обработке различных материалов обеспечивается за счет регулирования скорости главного электропривода продольно-строгального станка. Диапазон регулирования скорости определяется как отношение максимальной скорости поступательного движения к его минимальной скорости, т.е. как отношение скорости v_{δ} к скорости $v_{\delta x}$. Наименьшая величина $v_{\delta x}$ равна $0,067 \div 0,1 \text{ м/с}$, а наибольшая величина v_{δ} равна $1,25 \div 2,0 \text{ м/с}$ [1]. Поэтому диапазон регулирования скорости D главного электропривода лежит в пределах

$$D = \frac{v_{\delta}}{v_{\delta x}} = \frac{1,25 \div 2,0}{0,1 \div 0,067} = 12,5 \div 30 \quad (5)$$

Для повышения производительности станка, которая определяется работой главного электропривода не только в установившихся, но и в переходных режимах, скорость привода должна регулироваться электрическим способом. Поскольку $D > 10$, то рекомендуется применять двигатель постоянного тока [2].

2.3. Определение функциональной схемы электромеханической системы и выбор ее основных элементов.

Функциональную схему системы управления электроприводом при заданном диапазоне регулирования скорости выбирают из условий обеспечения требуемой точности регулирования скорости.

В [3] отмечается, что статизм механических характеристик главного электропривода продольно-строгального станка S_x во всем диапазоне регулирования скорости не должен превышать 5% при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной. С учетом того, что электропривод должен обеспечивать достаточно широкий диапазон регулирования скорости, указанное требование к точности регулирования скорости может быть выполнено только лишь в результате применения замкнутой системы «управляемый преобразователь – двигатель» (П-Д) с главной обратной связью

по скорости [5]. В настоящее время основным видом преобразователей для систем П-Д являются тиристорные преобразователи (ТП). На рис. 2 приведена функциональная схема замкнутой системы ТП-Д, построенной по принципу подчиненного регулирования (СПР). В ней требуемые диапазон, точность и качество регулирования скорости обеспечиваются с помощью соответствующего выбора структуры и настроек регулятора тока AS и скорости AV. Сигнал обратной связи по току $U_{дт}$ снимается с выхода датчика тока US. Сигнал обратной связи по скорости $U_{дс}$ снимается с выхода тахогенератора BR.

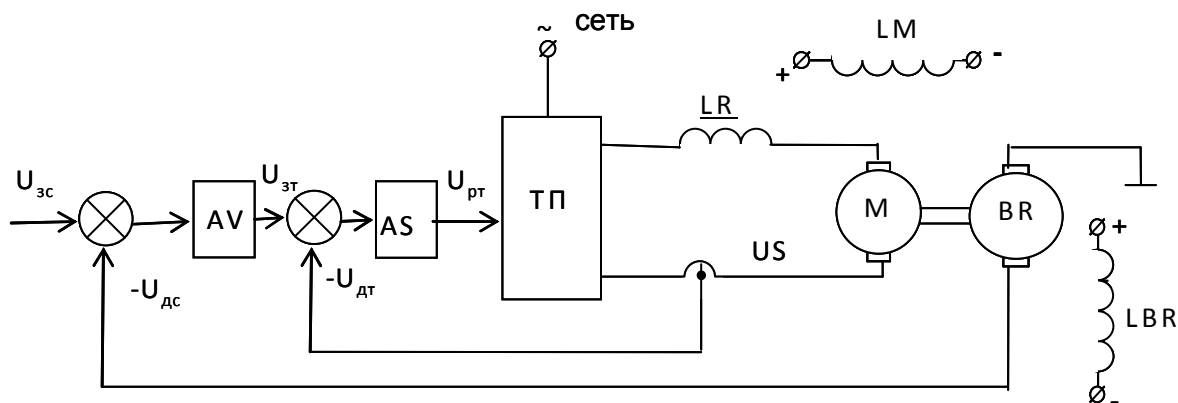


Рис. 2 – Функциональная схема системы подчиненного регулирования.

В пояснительной записке необходимо дать краткую характеристику системы, сформулировать цель управления, пояснить применяемый принцип управления и указать функциональное назначение каждого элемента системы [5].

Характерными для главного электропривода продольно-строгального станка являются длительный и повторно-кратковременный режимы работы. Оба режима протекают при переменной нагрузке. В установившемся режиме работы мощность двигателя расходуется на преодоление приведенного момента сопротивления на его валу. Во время переходного процесса двигатель должен развивать дополнительную мощность, необходимую для преодоления сил инерции движущихся элементов кинематической системы. Предварительное определение мощности двигателя проводится для установившегося режима по максимальным величинам усилия и скорости резания (интервал t_5 на рис.1).

В этом случае мощность на валу двигателя P_{δ} (Вт) составит:

$$P_{\delta} = F_{\text{тяг}} v_p / \eta_n \quad (6)$$

Номинальная мощность двигателя во всем диапазоне изменения скорости стола $P_{n, \text{расч}}$ (Вт) будет равна:

$$P_{n, \text{расч}} = \kappa_3 P_{\delta} v_{\delta} / v_p, \quad (7)$$

где $\kappa_3 = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий переходные режимы работы двигателя.

По величине $P_{n, \text{расч}}$ в [5] выбирается ближайший больший по мощности двигатель постоянного тока единой серии П. В случае необходимости можно применять двухдвигательный электропривод. При этом оба двигателя должны иметь одинаковые номинальные данные.

По номинальной скорости n_n (об/мин) определяется номинальная угловая скорость двигателя ω_n (рад/с)

$$\omega_n = 2\pi n_n / 60. \quad (8)$$

По величине ω_n и соответствующей ей максимальной скорости перемещения стола v_{δ} определяется радиус приведения механического передаточного устройства ρ (м/рад) главного электропривода

$$\rho = v_{\delta} / \omega_n. \quad (9)$$

Для проверки выбранного двигателя по нагреву необходимо рассчитать параметры нагрузочной диаграммы, т.е. величины моментов, развиваемых двигателем на отдельных интервалах цикла и длительность каждого временного интервала (см. рис.1).

Номинальный момент двигателя равен

$$M_n = P_n / \omega_n, \quad (10)$$

Величина допустимого момента выбирается в пределах $M_{\text{дон}} \leq 2,5 M_n$. Величины M_1 и M_2 рассчитываются соответственно по формулам (2) и (4).

Величина пути, проходимого столом на 2, 3, 7 и 8 интервалах, определяется условиями выполнения соответствующих технологических операций. Рекомендуется принимать ее в пределах $l_m = 0,01 \div 0,03$ м. Тогда длительность 2 и 3 временных интервалов равна

$$t_{2,3} = l_m / v_{\text{ex}}. \quad (11)$$

Длительность 7 и 8 интервалов равна

$$t_{7,8} = l_m / v_{\text{вых}}. \quad (12)$$

Длительность 1, 4, 6, 9, 10 и 12 интервалов диаграммы, в течение которых двигатель работает в переходных режимах, можно рассчитать, воспользовавшись уравнением движения электропривода

$$M - M_c = J d\omega / dt, \quad (13)$$

где M_c (Н·м) – суммарный приведенный момент сопротивления, величина которого зависит от того, на каком временном интервале тахограммы работает двигатель; J (кг·м²) – суммарный приведенный момент инерции механической части электропривода. В нашем случае

$$J = \kappa_n J_0 + m \rho^2, \quad (14)$$

где $\kappa_n = 1, 1 \div 1, 2$ – учитывает моменты инерции элементов механического передаточного устройства; J_0 (кг·м²) – момент инерции двигателя; $m = m_c + m_0$ – масса поступательно движущихся частей.

В процессах разгона и торможения двигатель работает с постоянным моментом, равным $M_{\text{дон}}$. Величина момента сопротивления M_c на любом из участков диаграммы также не зависит от времени. Поэтому длительность t_j (с) любого переходного режима равна

$$t_j = \frac{J \Delta \omega}{\pm M - M_c} = \frac{J (V_{j+1} - V_j)}{(\pm M - M_c) \rho}, \quad (15)$$

где v_{j+1} , v_j – начальная и конечная скорости переходного режима стола. Здесь знак «+» перед M соответствует разгону, а знак «-» – торможению двигателя.

Величина пути $l_j(m)$, проходимого столом на интервалах 1, 4, 6, 9, 10 и 12 равна

$$l_j = 0,5 / v_{j+1} + v_j / \Delta t_j, \quad (16)$$

Полный путь перемещения стола $l(m)$ будет равен:

$$l = \kappa_c l_c + l_1 + l_2 + l_8 + l_9, \quad (17)$$

где $\kappa_c = 0,8-0,9$ – учитывает длину детали, l_c (м) – длина стола.

По величине l и величинам путей, проходимым столом на различных интервалах прямого хода, находим величину пути на пятом интервале $l_5(m)$

$$l_5 = l - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8 + l_9). \quad (18)$$

Аналогично для 11 интервала на обратном ходе

$$l_{11}=l-(l_{10}+l_{12}). \quad (19)$$

Длительность пятого и одиннадцатого интервалов составляет

$$t_5=l_5/v_p, \quad (20)$$

$$t_{11}=l_{11}/v_6, \quad (21)$$

Проверка двигателя на нагрев производится по методу эквивалентного момента [7]. Эквивалентный момент $M_{\text{э}}$ (Н·м) по рассчитанной нагрузочной диаграмме определяется как среднеквадратическая величина по формуле

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}, \quad (22)$$

где n – число интервалов нагрузочной диаграммы, $n=12$; M_i – величина момента на i -том интервале; t_i – длительность i -того интервала.

Если условие $M_{\text{э}} \leq M_n$ не выполняется, необходимо принять двигатель большей мощности и повторить расчет.

Применение ТП в электроприводах постоянного тока позволяет повысить быстродействие привода, улучшить его технико-экономические, энергетические и весовые показатели. В частности, к.п.д. тиристорного электропривода на 5-7% выше к.п.д. системы генератор-двигатель, а диапазон регулирования скорости достигает 1000:1 и более. Вместе с тем ТП имеют повышенную чувствительность к перегрузкам, а пульсирующий характер выпрямленного тока увеличивает потери в двигателе и уменьшает его коммутационную способность.

В главном электроприводе продольно-строгального станка используется реверсивный тиристорный преобразователь. Его выбор производится по номинальным значениям тока и напряжения двигателя. При двухдвигательном приводе следует выбирать ТП с номинальным выпрямленным напряжением 460В. Технические данные ТП приведены в [6, 7]. В пояснительной записке необходимо привести функциональную схему ТП и охарактеризовать назначение ее основных элементов.

В тиристорном электроприводе сглаживающие реакторы выполняют несколько

функций: в частности, уменьшают зону прерывистых токов, сглаживают пульсации выпрямленного тока, ограничивают ток короткого замыкания.

Влияние пульсаций выпрямленного тока на коммутацию двигателей проявляется в сужении зоны темной коммутации по сравнению с питанием от генератора постоянного тока и в появлении искрения под щетками. Обеспечение удовлетворительной коммутации особенно важно для реверсивных электроприводов, работающих с частыми пусками, реверсами и торможениями. Для этого цепь выпрямленного тока должна иметь индуктивность L_{∂} (Гн), значение которой определяется по формуле [7]:

$$L_{\partial} = \frac{U_{dm} 100}{\omega p \% I_{мпн}}, \quad (23)$$

где U_{dm} (В) – амплитудное значение первой гармоники выпрямленного напряжения, составляющие 20% от номинального напряжения ТП $U_{мпн}$ – $U_{dm} = 0,2 U_{мпн}$; ω (1/с) – круговая частота сети; $p\%$ – допустимая амплитуда первой гармоники тока в процентах. Для электроприводов мощностью меньше 500кВт $p = 2 \div 5\%$; $I_{мпн}$ (А) – номинальный выпрямленный ток преобразователя.

Зная величину L_{∂} , можно определить величину индуктивности $L_{\partial p}$ (Гн) добавочного реактора LR (см. рис. 2)

$$L_{\partial p} = L_{\partial} - L_{я}, \quad (24)$$

где $L_{я}$ (Гн) – индуктивность якоря двигателя.

Величина $L_{я}$ определяется по формуле:

$$L_{я} = \kappa \frac{30 U_{\partial н}}{\pi I_{\partial н} n_n p} \quad (25)$$

Здесь $\kappa = 0,5-0,6$ для некомпенсированных машин; $\kappa = 0,1$ для компенсированных машин; $U_{\partial н}$ (В), $I_{\partial н}$ (А), n_n – номинальное напряжение, ток и скорость двигателя; p – число пар полюсов двигателя.

В качестве датчика скорости ВР применяется тахогенератор постоянного тока. Его выбор следует осуществлять по максимальной скорости вращения двигателя. Технические данные тахогенераторов приведены в [8].

2.4. Расчет параметров структурной схемы системы подчиненного регулирования

Структурная схема системы изображена на рис.3. Она составлена по функциональной схеме, приведенной на рис.2. Каждому элементу функциональной схемы поставлена в соответствие передаточная функция одного или нескольких определенным образом включенных элементарных динамических звеньев. Передаточные функции типовых элементов систем электропривода и методика расчета их параметров приведены в [8].

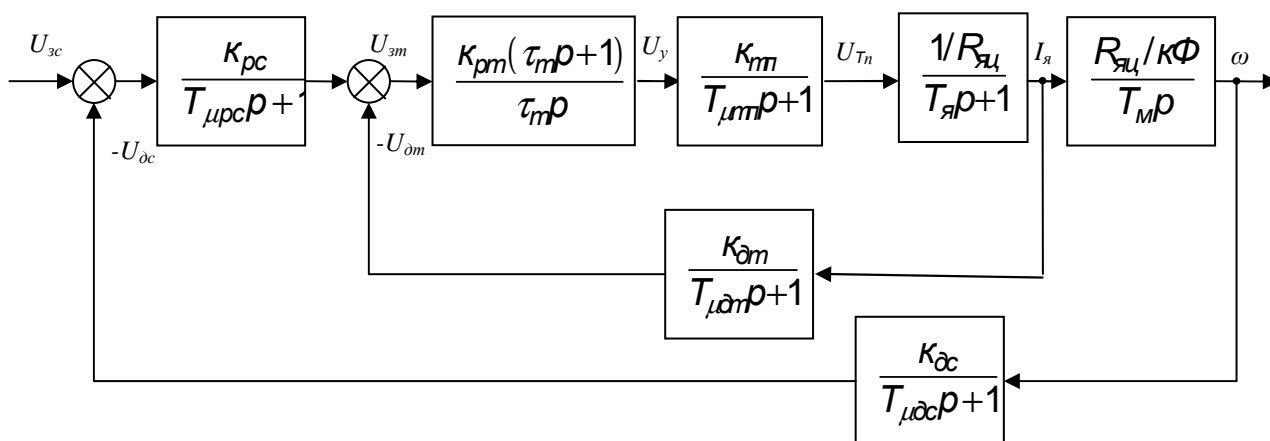


Рис. 3 – Структурная схема двухконтурной СПР

Система содержит два контура регулирования. Внутренний контур служит для регулирования тока якоря $I_{я}$, а внешний – для регулирования скорости двигателя ω .

В пояснительной записке необходимо описать принципы построения СПР, а также методы оптимизации контуров СПР по модульному (МО) и симметричному (СО) оптимумам. Эти вопросы изложены в [7, 8].

Как следует из структурной схемы на рис.3, в состав объекта регулирования токового контура входят: тиристорный преобразователь, якорная цепь двигателя и датчик тока якоря. Передаточная функция ТП

представляет собой инерционное звено с коэффициентом передачи κ_{mn} и малой постоянной времени $T_{\mu mn}$ фильтра на входе ТП. Величина κ_{mn} определяется как отношение номинального напряжения ТП U_{mn} к номинальному значению сигнала управления U_{yn} на входе ТП. Поскольку напряжение управления U_y на входе тиристорного преобразователя изменяется в пределах $0 \div 15\text{В}$, имеем

$$\kappa_{mn} = U_{mn}/15 \quad (27)$$

Передаточная функция якорной цепи двигателя представляет собой инерционное звено с коэффициентом передачи $1/R_{яц}$ и электромагнитной постоянной времени T_y (с), которая в контуре регулирования тока является «большой» постоянной времени.

Активное сопротивление якорной цепи двигателя $R_{яц}$ (Ом) определяется при температуре двигателя 75°C , как сумма сопротивлений обмотки якоря R_y , компенсационной обмотки $R_{ко}$ и добавочных полюсов $R_{оп}$. Если величины R_y , $R_{ко}$ и $R_{оп}$ приведены в каталоге для температуры 25°C , то пересчет осуществляется по формуле

$$R_{яц} = 1,2(R_y + R_{ко} + R_{оп}) \quad (27)$$

Величина T_y определяется по формуле:

$$T_y = L_\partial / R_{яц} \quad (28)$$

где L_∂ – полная индуктивность цепи выпрямленного тока, величина которой определяется по (23).

Передаточная функция датчика тока якоря, как и в предыдущих случаях, представляет собой инерционное звено с коэффициентом передачи $\kappa_{от}$ и малой постоянной времени $T_{от}$ фильтра на входе датчика тока. Датчик состоит из операционного усилителя и измерительного шунта. При этом шунт выбирается на $0,075\text{ В}$, а усилитель имеет фиксированный коэффициент усиления, равный 134. Наилучшая помехозащищенность канала измерения тока обеспечивается в том случае, когда номинальный ток шунта $I_{шн}$ равен номинальному току двигателя $I_{он}$. С учетом того, что выбранный двигатель допускает 2,5 – кратную

перегрузку по току, коэффициент передачи обратной связи по току $\kappa_{\partial m} = 134 \cdot 0,075 / 2,5 I_{\partial n}$

Согласно принятым критериям настройки СПР по МО или СО в оптимизируемом контуре в прямом канале управления должно содержаться интегрирующее звено. Поэтому регулятор тока выбирается интегрально-пропорциональным (ИП) с передаточной функцией

$$W_{pm}(p) = \frac{\kappa_{pm}(\tau_m p + 1)}{\tau_m p}, \quad (29)$$

где κ_{pm} – коэффициент передачи; τ_m – постоянная времени регулятора тока.

При оптимизации контура СПР некомпенсированная постоянная времени контура T_μ является «базовой» величиной. Для контура тока некомпенсированная постоянная времени $T_{\mu t} = T_{\mu tn} + T_{\mu \partial t} + T_{\mu pt}$, где $T_{\mu pt}$ – малая постоянная времени фильтра на входе регулятора тока. В зависимости от вида элементной базы, на которой построена СПР, величина $T_{\mu t}$ лежит в пределах $1 \leq T_{\mu t} \leq 10$ мс [7]. При расчетах целесообразно принимать $T_{\mu t}$ в пределах $4 \div 10$ мс, так как при меньших значениях $T_{\mu t}$ помехозащищенность контура тока понижается.

В зависимости от величины соотношения $T_\lambda / T_{\mu t}$ рекомендуется: при $T_\lambda / 4T_{\mu t} < 1$ применять настройку контура тока по модульному оптимуму; при $T_\lambda / 4T_{\mu t} > 1$ – по симметричному оптимуму [9].

При настройке контура тока по МО параметры регулятора тока определяются из соотношений

$$\tau_m = T_\lambda, \quad (30)$$

$$\kappa_{pm} = T_\lambda / \kappa_{om} B_{om}, \quad (31)$$

где $\kappa_{om} = \kappa_{mn} \kappa_{\partial m} / R_{яц}$ – коэффициент передачи объекта управления контура тока; $B_{om} = 2T_{\mu t}$ – постоянная интегрирования контура тока.

Передаточная функция контура тока, оптимизированного по МО имеет вид

$$W_m(P) = \frac{\kappa_m}{2T_{\mu m}^2 p^2 + 2T_{\mu m} p + 1}, \quad (32)$$

где $\kappa_m = 1/\kappa_{\partial m}$ – коэффициент передачи оптимизированного контура тока.

При настройке контура тока по СО расчет параметром ИП-регулятора осуществляют аналогично. Отличие состоит лишь в том, что величину τ_m выбирают равной $4T_{\mu m}$. Передаточная функция контура тока, оптимизированного по СО, имеет вид

$$W_m(P) = \frac{\kappa_m (4T_{\mu T} p + 1)}{8T_{\mu T}^3 p^3 + 8T_{\mu T}^2 p^2 + 4T_{\mu T} p + 1}, \quad (33)$$

В состав объекта управления контура скорости (см. рис.3) входят: механическая часть электропривода, оптимизированный токовый контур и датчик скорости.

Передаточная функция механической части электропривода представляет собой интегрирующее звено с коэффициентом передачи $R_{яц}/\kappa\Phi$ и электромеханической постоянной времени T_m , которая является «большой» постоянной времени в контуре регулирования скорости.

Величина $\kappa\Phi$ может быть определена с помощью выражения:

$$\kappa\Phi = (U_{\partial n} - I_{\partial n} R_{яц}) / \omega_n \quad (34)$$

Величина T_m рассчитывается по формуле:

$$T_m = \frac{J R_{яц}}{(\kappa\Phi)^2}, \quad (35)$$

где величина J определяется по формуле (14).

Передаточная функция датчика скорости представляет собой инерционное звено с коэффициентом передачи $\kappa_{\partial c}$ и малой постоянной времени $T_{\mu \partial c}$ фильтра на его выходе. Статические характеристики датчиков скорости (тахогенераторов) линейны и однозначны. Поэтому величина $\kappa_{\partial c}$ определяется

как отношение номинального напряжения тахогенератора $U_{\partial сн}$ к номинальной скорости $\omega_{\partial сн}$

$$K_{\partial с} = \frac{U_{\partial сн}}{\omega_{\partial сн}} \quad (36)$$

Тип регулятора скорости и способ его оптимизации, в отличие от регулятора тока, выбирают не на основании соотношения T_m и некомпенсированной постоянной времени контура скорости $T_{\mu с}$, а в зависимости от требований к точности поддержания заданного значения скорости. Поскольку в прямом канале управления контура регулирования скорости (КРС) уже имеется интегрирующее звено, входящее в состав объекта управления, то можно применять как П, так и ПИ-регулятор скорости. При этом в первом случае система регулирования скорости получается однократно интегрирующей, а во втором – двукратно интегрирующей. В пояснительной записке необходимо разъяснить смысл понятий «однократно» и «двукратно интегрирующая система» и описать свойства таких систем.

Требования к точности поддержания заданного значения скорости главного электропривода продольно-строгального станка не очень жесткие, т.к. статизм $S_{хз} \leq 5\%$. Поэтому возможно применение П-регулятора скорости с передаточной функцией, представляющей апериодическое звено с коэффициентом передачи $k_{рс}$ и малой постоянной времени $T_{\mu рс}$ фильтра на входе регулятора скорости.

Оптимальной настройке контура регулирования скорости с П-регулятором соответствует

$$k_{рс} = T_m / k_{ос} B_{ос} \quad (37)$$

где $k_{ос} = k_T k_{\partial с} R_{яц} / k\Phi$ – коэффициент передачи объекта управления контура скорости; $B_{ос} = 2T_{\mu с}$ – постоянная интегрирования КРС; $T_{\mu с} = 2T_{\mu т} + T_{\mu \partial с}$. Величина $T_{\mu \partial с}$ равна 10÷12мс.

Передаточная функция оптимизированного контура скорости имеет вид:

$$W_c(p) = \frac{K_c}{2T_{\mu c}^2 p^2 + 2T_{\mu c} p + 1} \quad (38)$$

$K_c = I / K_{\partial c}$ – коэффициент передачи оптимизированного контура скорости.

Система с П-регулятором скорости представляет собой статическую систему регулирования. Задание на входе регулятора тока возникает в результате наличия статической ошибки $\Delta\omega_c$, т.е. разности заданного ω_3 и фактического ω значений скорости двигателя $\Delta\omega_c = \omega_3 - \omega$

$$U_{zm} = U_{pc} = K_{pc} K_{\partial c} \Delta\omega_c. \quad (39)$$

Величина тока якоря, соответствующая заданию, равна

$$I_a = K_m U_{zm} \quad (40)$$

На основании уравнений (39) и (40), с учетом уравнения (37), величина $\Delta\omega_c$ определяется соотношением

$$\Delta\omega_c = \frac{I_a}{K_m K_{pc} K_{\partial c}} = \frac{I_a R_{яц}}{K\Phi} \frac{B_{oc}}{T_m} \quad (41)$$

В пояснительной записке необходимо определить величину $\Delta\omega_c$ при $I_a = I_{\partial n}$, а также охарактеризовать возможности ее уменьшения.

2.5. Определение показателей качества замкнутой системы

Показатели качества системы могут быть определены по ее переходной характеристике $h(t)$, которая представляет собой реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие $I(t)$ при нулевых начальных условиях.

Оригинал переходной характеристики $h(t)$ можно определить по передаточной функции системы с помощью теоремы разложения [7].

Однако в настоящее время более рациональным подходом является использование компьютерного моделирования на основе существующих прикладных пакетов, в которые уже заложен некоторый набор готовых и

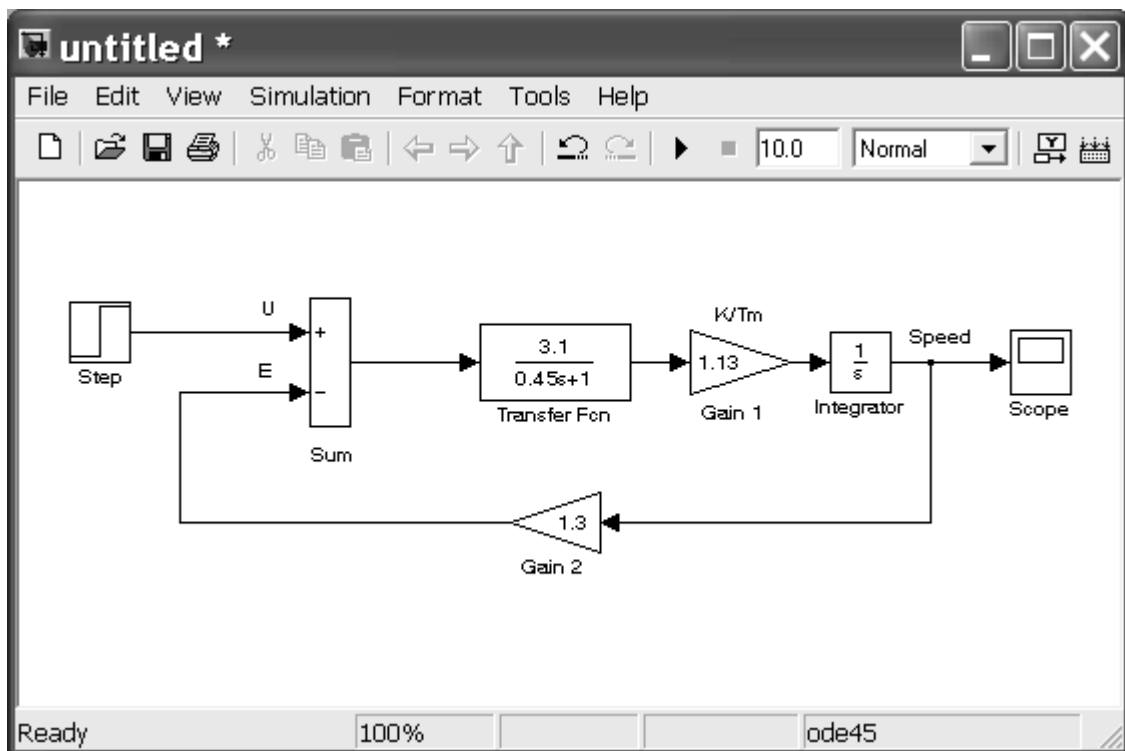
апробированных алгоритмов. Современные версии всех этих пакетов позволяют осуществлять численное моделирование систем и процессов управления в них на достаточно высоком уровне с использованием широкого спектра средств визуального представления результатов. Наиболее приспособленным для решения конкретных инженерных задач в области электромеханики является пакет MATLAB с широко развитыми дополнениями (TOOLBOXES), из которых TOOLBOXES SIMULINK наиболее приспособлен для анализа электромеханических систем [10].

Объектом управления в проектируемой системе является электропривод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения при управлении двигателем со стороны якоря. Модель электропривода, соответствующая структурной схеме на рис. 3, приведена на рис. 4а.

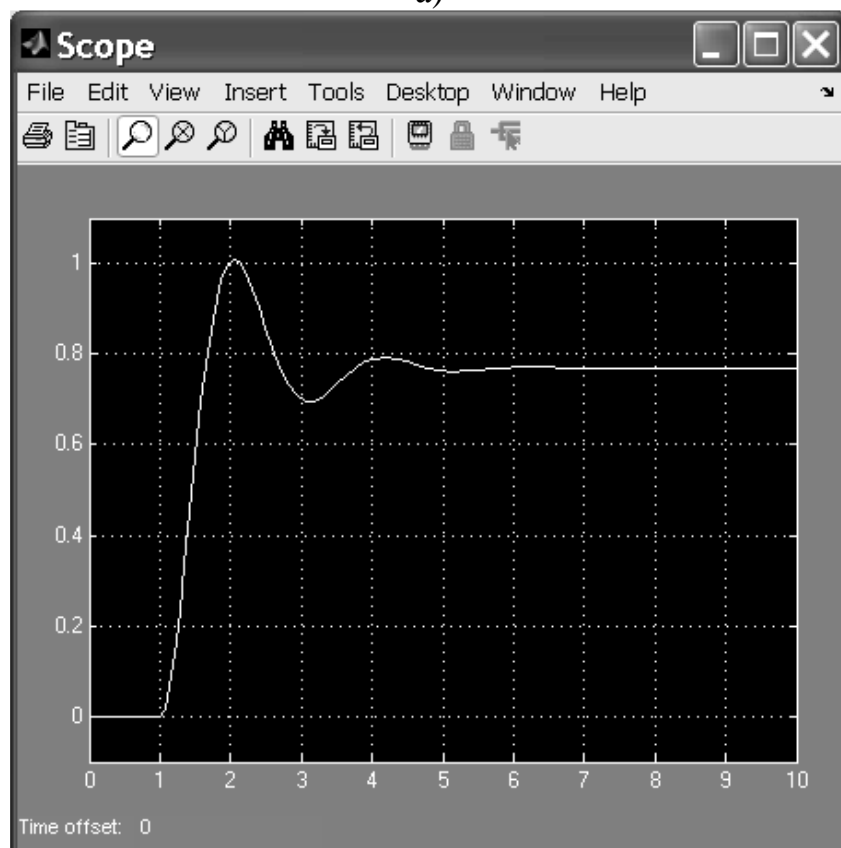
Блок (Transfer Fcn) моделирует электромагнитный переходный процесс с коэффициентом передачи $1/R_{яц}$ и постоянной времени $T_{я}$. Блоки (Gain 1, Integrator) моделируют электромеханический переходный процесс. Коэффициент передачи блока (Gain 1) определяется как результат деления коэффициента передачи интегрирующего звена $R_{яц}/k\Phi$ на электромеханическую постоянную времени $T_{м}$. Блоки (Gain 2, Sum) моделируют внутреннюю обратную связь по э.д.с. (E) вращения двигателя. Коэффициент передачи блока (Gain 2) равен $k\Phi$.

Результаты моделирования приведены на рис. 4б. Полученная переходная характеристика объекта управления позволяет определить показатели качества – время регулирования t_p , количество отклонений выходной величины от установившегося значения за время регулирования n и перерегулирования σ . Полученные значения необходимо сравнить с оптимальными показателями качества – одно отклонение от установившегося значения с перерегулированием $\sigma \leq 5\%$.

Моделирование СПР, как и расчет оптимальных значений настроек регуляторов контуров, как и настройка реальной СПР, начинается с внутреннего контура – контура регулирования тока якоря двигателя.



a)



б)

Рис. 4. Модель (а) и результаты моделирования (б) электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения при управлении двигателем со стороны якоря.

Модель контура тока приведена на рис. 5а. Блок (Transfer Fcn1) моделирует тиристорный преобразователь, а блок (Transfer Fcn2) – электромагнитный переходный процесс. Блок (Gain) моделирует обратную связь по току якоря с коэффициентом передачи κ_{dm} . Пропорционально-интегральный регулятор тока моделируется с помощью блока (PID) – ПИД – регулятора, входящего в состав дополнительной библиотеки Simulink Extras. Окно настройки регулятора приведено на рис. 5б.

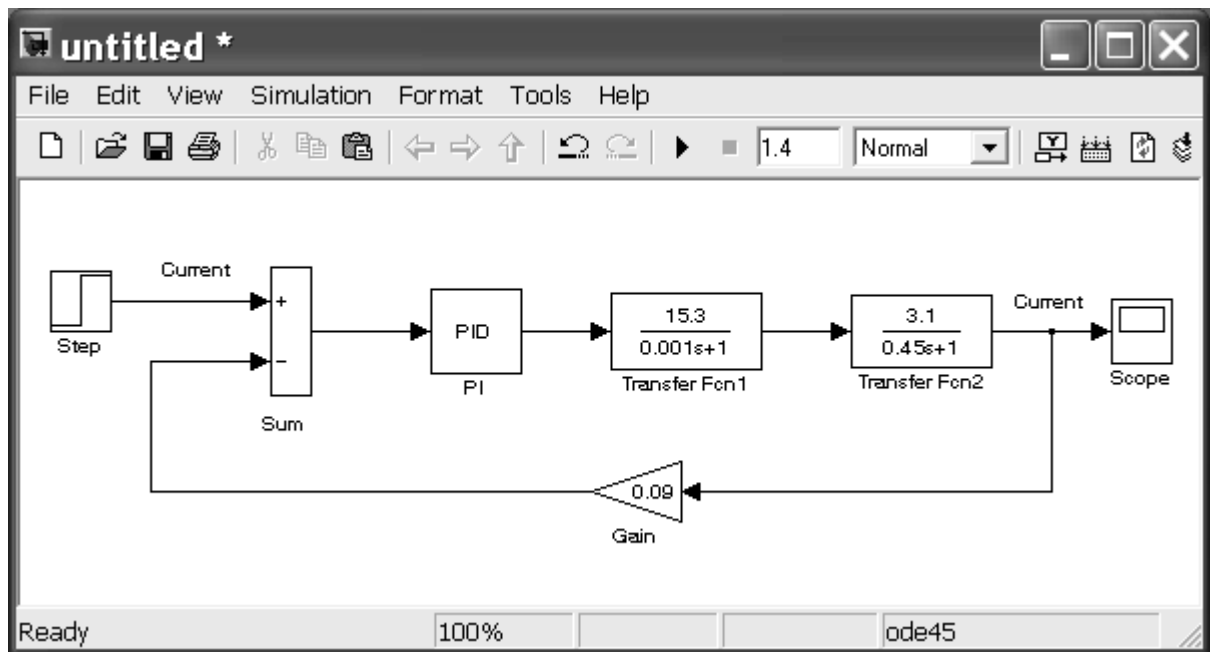
Передаточная функция ПИ-регулятора тока представлена выражением (29). После деления числителя и знаменателя передаточной функции на κ_{pm} она может быть преобразована к виду:

$$W_{pm}(p) = \frac{\kappa_{pm}(\tau_m p + 1)}{\tau_m p} = \frac{\tau_m p + 1}{(\tau_m / \kappa_{pm}) p} = \frac{\tau_m}{\tau_m / \kappa_{pm}} + \frac{1}{(\tau_m / \kappa_{pm}) p} = \kappa_n + \frac{\kappa_u}{p}, \quad (42)$$

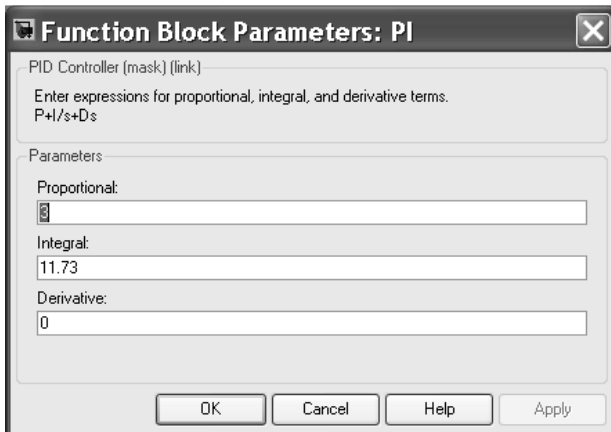
где $\kappa_n = \frac{\tau_m}{\tau_m / \kappa_{pm}}$ - коэффициент передачи пропорциональной части регулятора тока; $\kappa_u = \frac{1}{\tau_m / \kappa_{pm}}$ - коэффициент передачи интегральной части.

Коэффициент передачи дифференциальной части в окне настройки ПИД – регулятора (Derivative) принимается равным нулю.

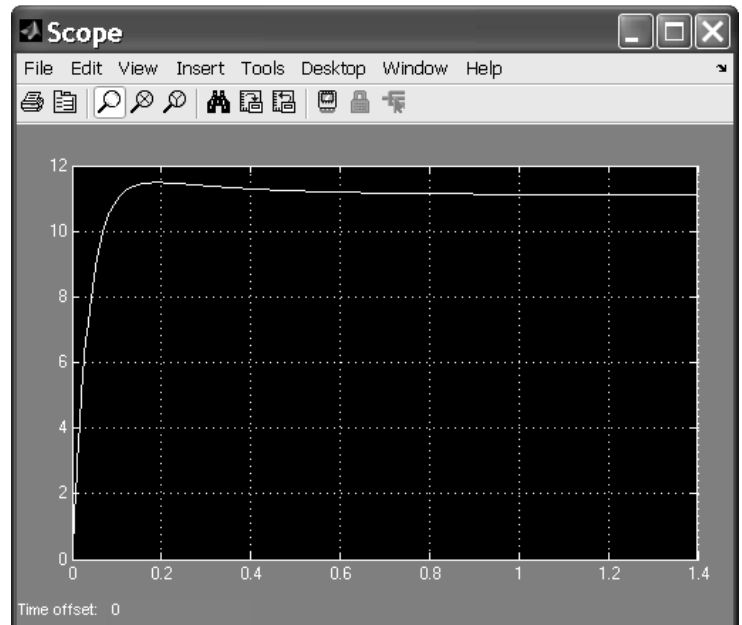
Результаты моделирования контура регулирования тока приведены на рис. 5в. Поскольку уравнение (31) для определения оптимального значения κ_{pm} получено без учета внутренней обратной связи по э.д.с. вращения двигателя, показатели качества переходной характеристики могут несколько отличаться от оптимальных. Для получения $\sigma \leq 5\%$ необходимо изменить величину κ_{pm} .



a)



б)



в)

Рис. 5 – Модель (а), окно настройки PID регулятора (б) и результаты моделирования (в) контура регулирования тока якоря двигателя.

Модель контура регулирования скорости приведена на рис. 6а. В ней оптимизированный контур регулирования тока входит в состав объекта управления как звено с малой, некомпенсируемой постоянной времени T_{um} . Он представлен блоками (Transfer Fcn1, Transfer Fcn2, Sum2, Sum3, Gain1, Gain3, PI). Сигналом задания для контура регулирования тока является выходной сигнал регулятора скорости. На вход «+» блока (Sum2) он подается через нелинейный блок (Saturation) – усилитель с ограничением.

Величина выходного сигнала при положительном и отрицательном входном сигнале устанавливается в окне настройки блока. Рекомендуется принимать ее равной 10. Использование блока (Saturation) позволяет реализовать еще одну важную особенность СПР – простыми средствами осуществлять ограничение любой из координат системы: действительное значение тока на выходе контура в установившемся режиме не может быть больше заданного.

Электромеханический переходный процесс моделируется блоками (Gain2, Integrator). Применение блоков (Sum4, Step2) позволяет моделировать реакцию системы на изменение возмущающего воздействия (момента сопротивления). Блок (Gain4) моделирует обратную связь по скорости двигателя с коэффициентом передачи $k_{\omega c}$.

Регулятор скорости моделируется блоком (P). В соответствии с правилами оптимизации контуров СПР применен П-регулятор, т.к. в состав объекта управления контура скорости входит интегрирующее звено. Коэффициент передачи пропорциональной части ПИД – регулятора, устанавливаемый в окне настройки регулятора, определяется по формуле (37). Коэффициенты передачи интегральной и дифференциальной частей принимаются равными нулю.

Результаты моделирования контура регулирования скорости приведены на рис. 6а. Как и для контура регулирования тока, показатели качества могут отличаться от оптимальных. Для получения $\sigma \leq 5\%$ необходимо изменить величину коэффициента передачи пропорциональной части регулятора скорости k_{pc} .

По истечении 1,5 с появляется сигнал на выходе блока (Step2). Новое значение регулируемой величины, устанавливающееся по окончании переходного процесса, меньше предыдущего на величину $\Delta\omega_c$, определяемую по формуле (41). Это означает, что по возмущению контур регулирования скорости является статическим. Если такая характеристика не удовлетворяет требованиям, то следует применить ПИ – регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = \frac{k_{pc}(\tau_c p + 1)}{\tau_c p}, \quad (43)$$

где k_{pc} – коэффициент передачи регулятора скорости, величина которого определяется по формуле (37); τ_c – постоянная времени регулятора скорости, равная $\tau_c = 4T_{\mu c}$.

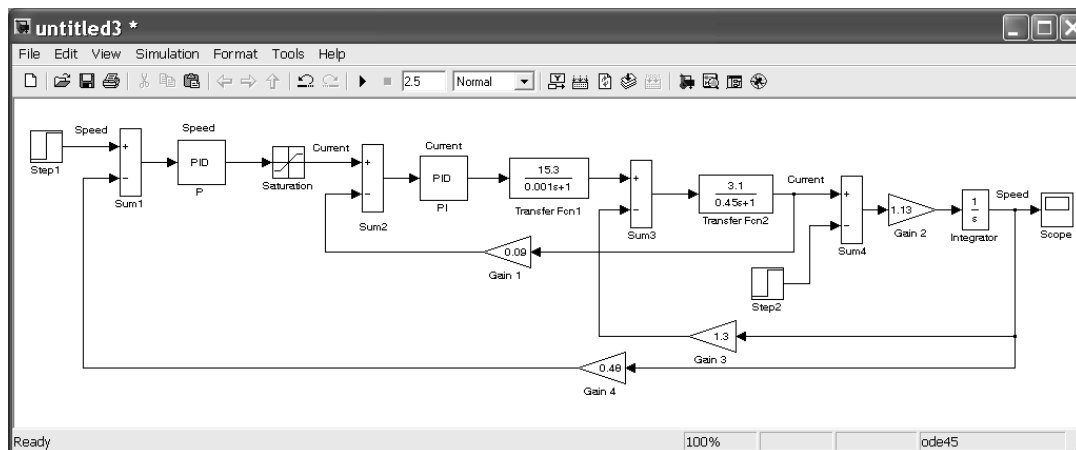
После преобразований, аналогичных выполненным для регулятора тока, уравнение для определения коэффициента передачи пропорциональной части регулятора скорости будет иметь вид:

$$K_p = \frac{\tau_c}{\tau_c / K_{pc}}, \quad (44)$$

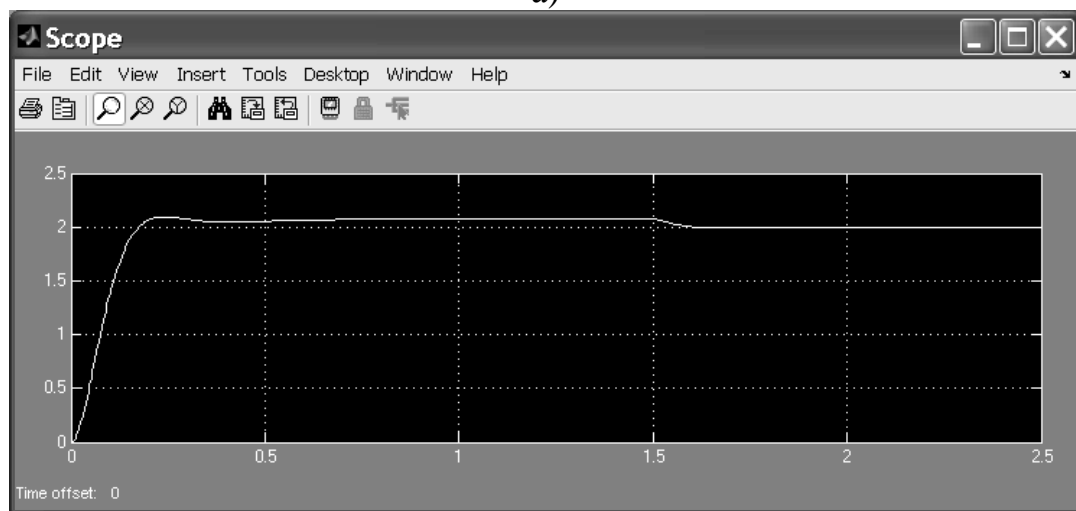
Для интегральной части:

$$K_u = \frac{1}{\tau_c / K_{pc}}, \quad (45)$$

После установки полученных значений в окне настройки PID регулятора скорости, повторить моделирование контура регулирования скорости. Результаты моделирования проанализировать и пояснить, воспользовавшись определением передаточной функции по ошибке регулирования.



а)



б)

Рис.6. – Модель (а) и результаты моделирования (б) контура регулирования скорости двигателя.

Приложение 1 - Технические данные продольно-строгальных станков

№ п/п	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Вариант													
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Масса стола	m_c	10 ³ кг	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	3	4	5,8	12	20	45	80
2	Масса детали	m_d	10 ³ кг	2	2,5	2,3	1,5	4,5	3,6	6	7	7,5	10	4,5	35	75	140
3	Длина стола	l_c	м	4	5,5	1,8	4,5	4,2	3,8	2	3,5	2,7	3,5	6,5	4	6	5,5
4	Количество вертикальных суппортов	N_{cv}	шт.	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
5	Количество горизонтальных суппортов	N_{ch}	шт.	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	3	3
6	Максимальное усилие резания по суппорту	F_p	10 ³ Н	0,5	0,5	0,6	1,5	0,6	0,8	0,6	1	1	1,2	0,6	1,5	1,2	1
7	Скорость резания	v_p	м/с	0,7	0,7	0,8	0,5	1	0,8	0,6	0,6	0,6	0,7	1	0,5	0,4	0,4
8	Быстрое перемещение стола	v_b	м/с	2,5	2,7	2,9	2,7	2,0	2,1	1,9	1,8	1,6	1,7	2,3	1,4	1,25	1,2
9	Скорость входа резца в металл	$v_{вх}$	м/с	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
10	Скорость выхода резца из металла	$v_{вых}$	м/с	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2

№ п/п	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Вариант													
				15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	Масса стола	m_c	10 ³ кг	100	75	50	75	45	20	10	9	8	6	5,5	4,5	3	1,5
2	Масса детали	m_d	10 ³ кг	175	100	90	120	60	55	18	17	14	9	7	6,5	7	2,5
3	Длина стола	l_c	м	9	7	6	7	6	4	5	6,5	4,5	9,7	8,8	8,5	7,3	6,5
4	Количество вертикальных суппортов	N_{cv}	шт.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	Количество горизонтальных суппортов	N_{cz}	шт.	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1
6	Максимальное усилие резания по суппорту	F_p	10 ³ Н	1	1	1	1,2	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
7	Скорость резания	v_p	м/с	0,3	0,3	0,35	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	1	1	1,2	1,2
8	Быстрое перемещение стола	v_b	м/с	0,9	1,1	1,6	1,0	1,55	1,6	1,7	2,1	2,0	2,9	2,7	2,8	3,0	2,9
9	Скорость входа резца в металл	v_{bx}	м/с	0,07	0,075	0,08	0,07	0,085	0,085	0,9	0,1	0,1	0,1	0,09	0,095	0,1	0,18
10	Скорость выхода резца из металла	v_{blyx}	м/с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. – М.: Высшая школа, 1979 – 359с.
2. Типовой электропривод промышленных установок/под. Общ. Ред. Волотковского С.А./ - Киев: Высшая школа, 1983 – 312с
3. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Высшая школа, 1979 – 318с.
4. Решеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1967 – 471с.
5. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 416с.
6. Справочник по преобразовательной технике. /под. Ред. Чиженко И.М./ - Киев: Техніка, 1978 – 448с.
7. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами. /под. Ред. Круповича В.И., Барыбина Ю.Г., Самовера М.Л./ - М.: Энергоатомиздат, 1982 – 400с.
8. Справочник по автоматизированному электроприводу. /под. Ред. Елисеева В.А., Шинянского А.В./ - М.: Энергоатомиздат, 1983 – 616с.
9. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы управления электроприводом в металлургии. М.: Металлургия, 1971 – 216с.
10. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2007. – 320с., ил.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к выполнению расчетно-графической работы «Электромеханическая система управления металлорежущего станка» (для студентов 4 курса всех форм обучения по специальности 6.092200 – «Электромеханические системы автоматизации и электропривода»)

Составители: Владимир Павлович Андрейченко,
Виктор Николаевич Фатеев

Редактор: Н.З. Аляб'ев

Верстка: И.В.Волосожарова

План 2009, поз. 205М

Подп. к печати 17.11.2009	Формат 60x84 1/16	Бумага офисная
Печать на ризографе	Условн. – печ. л. 1.2	Уч. – изд. 1.5
Тираж 50 экз.	Зак. №	

61002, Харьков, ул. Революции, 12

Сектор оперативной полиграфии ЦНИТ ХНАГХ

61002, Харьков, ул. Революции, 12
