

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ПІД'ЄМНОТРАНСПОРТНЕ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ»**

*(для студентів 4 курсу всіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2021**

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Під'ємнотранспортне та технологічне обладнання» (для студентів 4 курсу всіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад : В. М. Фатеев, О. В. Донець. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 38 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. В. М. Фатеев,  
канд. техн. наук, доц. О. В. Донець

#### Рецензент

**М. Ф. Смирний**, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 7 від 23.01.2019.*

Методичні рекомендації складено з метою допомогти студентам електротранспортних, електротехнічних, електромашинобудівних спеціальностей денної і заочної форм навчання під час підготовки до занять, складання заліку з курсу «Під'ємнотранспортне та технологічне обладнання».

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Зміст розрахунково-графічного завдання.....	7
1.1 Обсяг розрахунково-графічного завдання.....	7
2 Методичні рекомендації щодо виконання окремих розділів розрахунково-графічного завдання.....	8
2.1 Технічні дані технологічного механізму.....	8
2.2 Опис проектованої електромеханічної системи й вибір її за різновидами струму.....	8
2.3 Визначення функціональної схеми електромеханічної системи й вибір її основних елементів.....	12
2.4 Розрахунок параметрів структурної схеми системи підлеглого регулювання.....	18
2.5 Визначення показників якості замкнутої системи.....	24
Список джерел .....	31
Додаток А Технічні дані поздовжньо-стругальних верстатів.....	32

## ВСТУП

Застосування підйомно-транспортного обладнання в складському технологічному процесі сприяє полегшенню важких і трудомістких робіт, прискорює виконання навантажувально-розвантажувальних операцій, скорочує час простою транспорту.

Підйомно-транспортне обладнання класифікують за такими основними ознаками: функціональним призначенням; принципом періодичності дії; роду переробляється вантажу; видам приводу; ступеня механізації праці.

За функціональним призначенням поділяється на три групи: вантажопідйомні машини і механізми; транспортуючі машини та пристрої; вантажно-розвантажувальні машини.

До вантажопідйомних машин і механізмів відносять крани, вантажні ліфти, лебідки і електричні талі. Крани призначені для переміщення вантажів у вертикальному і горизонтальному напрямках. Їх поділяють на мостові і консольні, козлові і автомобільні, крани-штабелери.

Вантажний ліфт являє собою вантажопідйомний пристрій переривчастої дії для підйому і спуску вантажів. Вантажопідйомність – від 150 кг до 5 т. Лебідки використовуються для вертикального (підйомні лебідки) і горизонтального (тягові лебідки) переміщення вантажів. Випускаються з ручним і електричним приводами. Можуть мати тягові зусилля від 1 до 10 т. Електрична таль – механізм з електроприводом для вертикального і горизонтального переміщення вантажу, підвішеного на гак. Горизонтальне переміщення здійснюється уздовж підвісного однорельсового шляху. Керують нею за допомогою кнопкового механізму. Випускається вантажопідйомністю 0,5; 1; 5 і 10 т. Розрахована на висоту підйому вантажу від 4 до 30 м.

До транспортуючих машин і пристроїв відносяться конвеєри, гравітаційні пристрої, вантажні транспортні візки, електротягачі та ін. Конвеєри (транспортери) – транспортують машини безперервної дії. Залежно від конструктивних особливостей вони бувають стрічкові, пластинчасті і роликові.

Застосовуються для горизонтального і слабосхильних переміщеннях сипких і штучних вантажів. До гравітаційним пристроїв відносяться гравітаційні конвеєри і вертикальні спуски. Вантаж за допомогою цих пристроїв переміщається під дією своєї сили тяжіння. Вантажні транспортні візки використовуються для горизонтального і слабосхильних переміщення вантажів.

Вони бувають електричні і ручні. Електровізки застосовують для переміщення вантажів на відстань до 1 км. Їх вантажопідйомність – 500, 750, 1 000 і 2 000 кг. Ручні візки випускають на трьох-чотирьох колесах, вантажопідйомністю 0,25–1т. Вантажні транспортні візки вантажопідйомністю до 50 кг застосовують для переміщення окремих легковагих вантажів. Візки-штабелери з ручним гідравлічним важільним приводом підйому вантажу дозволяють виробляти багатоярусну складування, укладання в стелажі і переміщення вантажів у виробничій тарі. Візки можуть мати підйомну платформу або підйомні вила. Електротягачі застосовують для горизонтального переміщення причіпних візків і тари-обладнання на колесах. Загальна маса перевезених вантажів складає до 1 500 кг. Вантажно-розвантажувальні машини - вилочні навантажувачі і штабелери – призначені для виконання вантажно-розвантажувальних робіт, внутрискладського переміщення і складування вантажів. Навантажувачі діляться на електронавантажувачі і автонавантажувачі. Електронавантажувачі – машини наземного безрейкового електрифікованого транспорту, що приводяться в рух електродвигуном з живленням від акумуляторних батарей. Основним робочим органом є вила, службовці для підхоплення вантажу, його підйому, транспортування і укладання. Випускаються вантажопідйомністю від 0,5 до 5 т, висота підйому вантажу – від 2,0 до 5,6 м. Електронавантажувачі мають високу маневреність. Автонавантажувачі приводяться в дію за допомогою двигуна внутрішнього згорання, в зв'язку з чим застосовуються для виконання вантажно-розвантажувальних робіт на відкритих майданчиках.

Випускаються вантажопідйомністю від 3,2 до 10 т, висота підйому вантажу – до 8,2 м. Електроштабелери також відносяться до машин підлогового безрейкового транспорту. Служать для виконання складських робіт в закритих приміщеннях з твердим і рівним покриттям підлоги. Їх використовують для роботи в умовах обмеженого простору під час штабелювання вантажів в високі яруси стелажів. Випускаються вантажопідйомністю 0,8; 1; 1,25; 1,6 і 2 т.

## **1 ЗМІСТ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ**

**Мета розрахунково-графічного завдання** далі (РГЗ): курс «Під'ємнотранспортне та технологічне обладнання» займає важливе місце в підготовці інженера електромеханіка, оскільки електромеханічні системи є основними споживачами електроенергії в народному господарстві, визначають рівень механізації і автоматизації технологічних процесів і чинять істотний вплив на ефективність їх функціонування. РГЗ по курсу «Під'ємнотранспортне та технологічне обладнання» повинне дати студентові цілісне уявлення про методiku і послідовність рішення безлічі взаємозв'язаних завдань, починаючи від отримання технічного завдання і кінчаючи випуском робочою конструкторською документацією.

### **1.1 Обсяг розрахунково-графічного завдання**

РГЗ виконується у вигляді записки розрахункового пояснення обсягом 20–25 сторінок, що містить наступний матеріал:

- технічні дані технологічного механізму;
- опис технологічного механізму, що автоматизується, і вибір електромеханічної системи по роду струму;
- визначення функціональної схеми системи і вибір елементів силового кола;
- розрахунок параметрів системи регулювання;
- визначення показників якості розрахованої системи.

У записці має бути представлена функціональна схема електроприводу, а також структурна схема скоректованої системи і необхідні розрахункові залежності.

## **2 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПО ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ**

### **2.1 Технічні дані технологічного механізму**

У цьому розділі записки пояснення необхідно сформулювати основні завдання, які слід вирішувати при виконанні РГЗ, а також привести початкові дані для розрахунку (дивись дод. А).

### **2.2 Опис проектованої електромеханічної системи й вибір її за різновидами струму**

Вимоги, що пред'являються до електромеханічних систем, визначаються технологічними особливостями механізму, що автоматизується, конструктивним виконанням механічного устаткування, специфічними умовами експлуатації електроустаткування у цій галузі промисловості. Перше, що необхідно зробити на підставі цих вимог, вибрати систему по роду струму.

У РГЗ розробляється електромеханічна система для складного виробничого механізму – поздовжньо-стругального верстата. У цьому розділі дається коротка характеристика поздовжньо-стругальних верстата, описується технологія обробки виробу, приводиться кінематична схема і характеризується призначення вживаних на верстаті електромеханічних систем. Ці питання викладені в [1, 2].

Детальній розробці підлягає електромеханічна система автоматичного управління головним електроприводом верстата, яким є електропривод переміщення столу.

Діаграми швидкості руху столу, тягових зусиль і моменту двигуна за один подвійний хід столу приведені на рисунку 1.



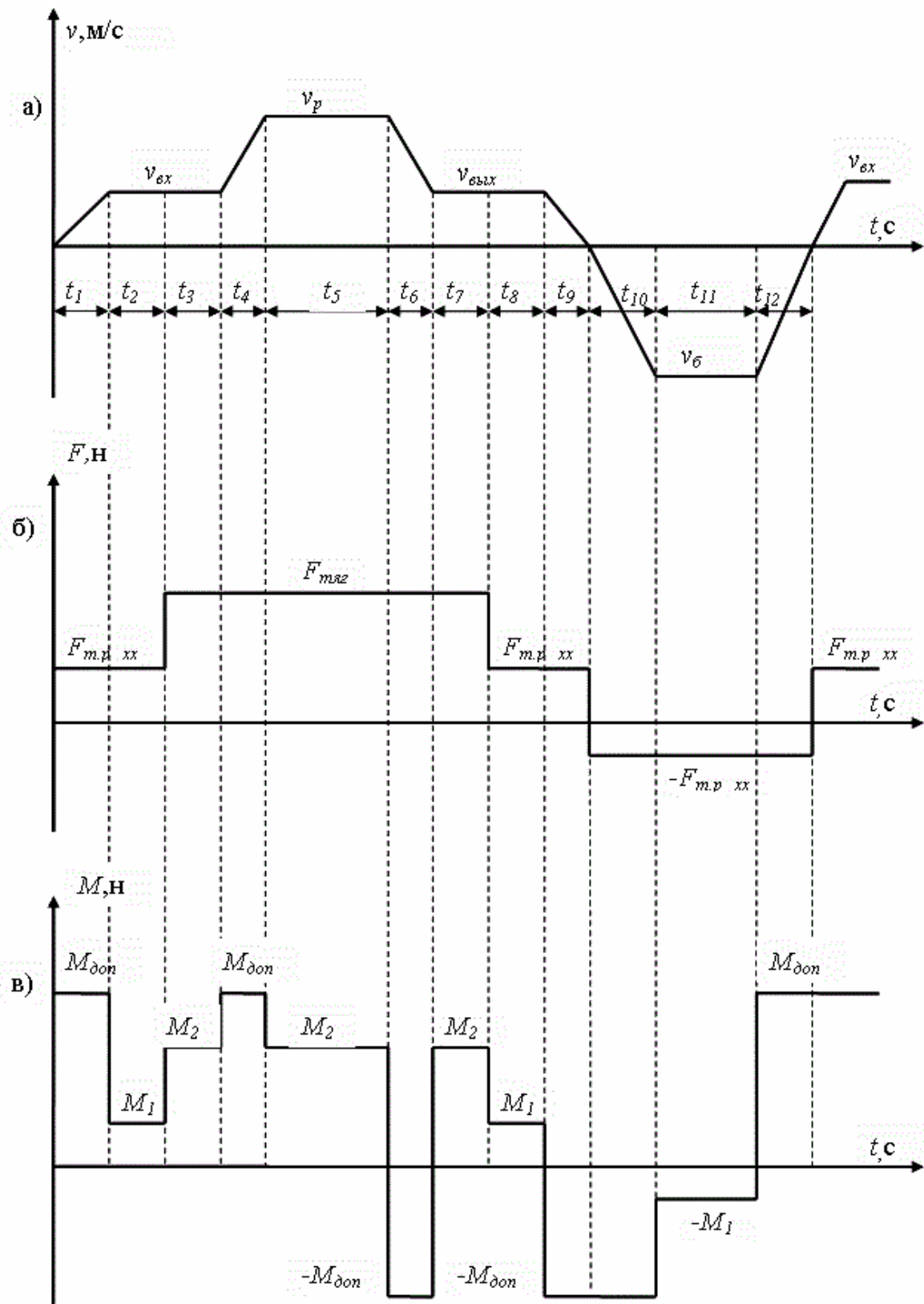


Рисунок 1 – Діаграми швидкості руху столу й моменту двигуна, а – тахограма руху столу; б –діаграма зусиль; в – навантажувальна діаграма двигуна де  $t_1 (c)$  – час, протягом якого стіл розганяється до швидкості  $v_{ex} (m/c)$ .

Величина  $v_{ex}$ . вибирається таким чином, щоб в процесі входу різця у виробі не м'яв край виробу і не ламався різець;  $F_{mp.x.x}$  (Н) зусилля тертя столу до напрямних:

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

де  $\mu = 0,05$  – коефіцієнт тертя столу до напрямних;

$m_c, m_d$  (кг) – маса столу та деталі;

$g$  (м/с<sup>2</sup>) – прискорення сили тяжіння;

$M_{don}$  (Н·м) – максимально допустимий момент, який для двигунів постійного струму з незалежним збудженням рівний  $M_{don} \leq 2,5M_n$ ;

$M_n$  (Н·м) – номінальний момент двигуна;

$t_2$  (с) – час, протягом якого стіл рухається з постійною швидкістю  $v_{ex}$ ;

$M_1$  (Н·м) – відповідний момент, що розвивається двигуном:

$$M_1 = F_{mp.x.x} \rho / \eta_n, \quad (2)$$

де  $\rho$  (м/рад) – радіус приведення механічного передавального пристрою (МПП) головного електроприводу верстата.

$\eta_n =$  К.П.Д. (МПУ) рівний:

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

де  $n$  – кількість ступенів передачі;

$\eta_n = 0,96-0,98$  – номінальний К.К.Д. зубчастої пари;

$t_3$  (с) – час, протягом якого різець врізається в метал;

$F_{мяг}$  – тягове зусилля на столі:

$$F_{мяг} = F_{p\Sigma} + F_{mp} \quad (4)$$

де  $F_{p\Sigma}(H) = F_p(N_{cv} + N_{cz})$  – сумарне зусилля різання (дивись дод. А);

$F_{mp}(H) = [F_y + \mu g(m_c + m_q)]$  – зусилля тертя з урахуванням вертикальної складової зусилля різання;

$F_y(H) = 0,4 F_p N_{cv}$ ;  $M_2$  (Н·м) – відповідний момент двигуна:

$$M_2(H \cdot м) = F_{мяг} \rho / \eta_n, \quad (5)$$

де  $t_4$  (с) – час, протягом якого стіл розганяється до швидкості різання

$v_p$  (м/с) – при моменті двигуна, рівному  $M_{don}$ ;

$t_5$  (с) – час, протягом якого стіл рухається із швидкістю різання  $v_p$ .

Навантаження на привід визначається величиною  $F_{тяг} \cdot M_{момент}$ , що розвивається двигуном, рівний  $M_2$ ,  $t_6(c)$  – час, протягом якого швидкість знижується до величини  $v_{вих}$ , що запобігне сколюванню кромки виробу при виході різця. При цьому двигун працює в гальмівному режимі з гранично допустимим моментом  $M_{дон}$ ;  $t_7(c)$  – час виходу різця з металу.

Навантаження на привід визначається величиною  $F_{тяг}$ , а момент двигуна рівний  $M_2$ ;  $t_8(c)$  – час, протягом якого стіл рухається з постійною швидкістю  $v_{вих}$ . При цьому, навантаження на привід визначається величиною  $F_{тр.х.х}$ , а момент двигуна рівний  $M_1$ ;  $t_9(c)$  – час, протягом якого швидкість столу знижується до нуля. Двигун працює в гальмівному режимі з гранично допустимим моментом  $M_{дон}$ ;  $t_{10}(c)$  – час, протягом якого стіл розганяється до швидкості зворотного ходу  $v_6 (м/с)$ .

Під час переходу швидкості через нульове значення зусилля  $F_{тр.х.х}$  змінює свій знак. Двигун продовжує працювати з  $M_{дон}$ ;  $t_{11}(c)$  – час, протягом якого стіл рухається із сталою швидкістю  $v_6$  при  $F = F_{тр.х.х}$  і  $M = M_1$ ;  $t_{12}(c)$  – час, протягом якого швидкість столу зменшується до нуля. При цьому двигун працює з гранично допустимим моментом  $M_{дон}$ . Далі цикл роботи повторюється.

Вибір найбільш ефективних режимів різання при обробці різних матеріалів забезпечується за рахунок регулювання швидкості головного електроприводу поздовжньо-стругального верстата. Діапазон регулювання швидкості визначається як відношення максимальної швидкості поступальної ходи до його мінімальної швидкості, тобто як відношення швидкості  $v_6$  до швидкості  $v_{ex}$ . Найменша величина  $v_{ex}$  дорівнює 0,067–0,1 м/с, а найбільша величина  $v_6$  дорівнює 11,25–2,0 м/с [1], тому діапазон регулювання швидкості  $D$  головного електроприводу лежить у межах:

$$D = \frac{v_6}{v_{ex}} = \frac{1,25 - 2,0}{0,1 - 0,067} = 12,5 - 30$$

Для підвищення продуктивності верстата, яка визначається роботою головного електроприводу не лише в сталих, але і в перехідних режимах,

швидкість приводу повинна регулюватися електричним способом. Оскільки  $D > 10$ , то рекомендується застосовувати двигун постійного струму [2].

### **2.3 Визначення функціональної схеми електромеханічної системи й вибір її основних елементів**

Функціональну схему системи управління електроприводом при заданому діапазоні регулювання швидкості вибирають з умов забезпечення необхідної точності регулювання швидкості.

У [3] відзначається, що статизм механічних характеристик головного електроприводу поздовжньо-стругального верстата  $S_x$  в усьому діапазоні регулювання швидкості не повинен перевищувати 5 % при зміні навантаження від холостого ходу до номінального. З урахуванням того, що електропривод повинен забезпечувати досить широкий діапазон регулювання швидкості, вказана вимога до точності регулювання швидкості може бути виконана тільки в результаті застосування замкнутої системи «Керований перетворювач – двигун» (П–Д) з головним зворотним зв'язком за швидкістю [5]. Нині основним видом перетворювачів для систем П–Д є тиристорні перетворювачі далі (ТП). На рисунку 2 приведена функціональна схема замкнутої системи ТП–Д, побудованої за принципом підлеглого регулювання (СПР). У ній потрібні діапазон, точність і якість регулювання швидкості забезпечуються за допомогою відповідного вибору структури і налаштувань регулятора струму  $AS$  і швидкості  $AV$ . Сигнал зворотного зв'язку по струму  $U_{dc}$  знімається з виходу датчика струму  $US$ . Сигнал зворотного зв'язку за швидкістю  $U_{дш}$  знімається з виходу тахогенератора  $BR$ .

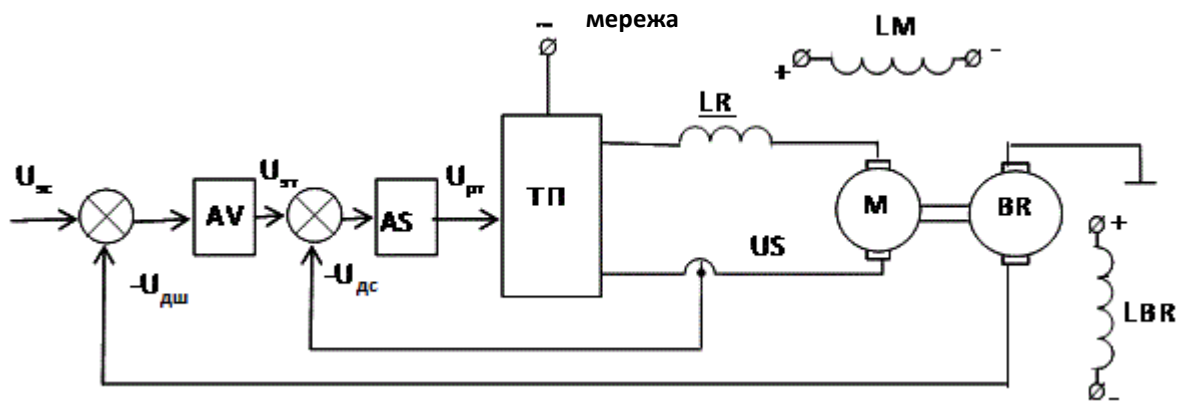


Рисунок 2 – Функціональна схема системи підлеглого регулювання

У записці пояснення необхідно дати коротку характеристику системи, сформулювати мету управління, пояснити вживаний принцип управління і вказати функціональне призначення кожного елемента системи [5].

Характерними для головного електроприводу поздовжньо-стругального верстата є тривалий і повторно-короткочасний режими роботи. Обидва режими протікають при змінному навантаженні. У сталому режимі роботи, потужність двигуна витрачається на подолання приведенного моменту опору на його валу. Під час перехідного процесу двигун повинен розвивати додаткову потужність, необхідну для подолання сил інерції рухомих елементів кінематичної системи. Попереднє визначення потужності двигуна проводиться для сталого режиму по максимальних величинах зусилля і швидкості різання (інтервал  $t_5$  на рис. 1).

У цьому раді потужність на валу двигуна  $P_d$  (Вт):

$$P_d = F_{тяг} v_p / \eta_n \quad (6)$$

Номінальна потужність двигуна в усьому діапазоні зміни швидкості столу

$$P_{н.расч} = k_3 P_d v_0 / v_p, \quad (7)$$

де  $k_3 = 1,1-1,3$  – коефіцієнт запасу, що враховує перехідні режими роботи двигуна.

За величиною  $P_{н.расч}$  в [5] вибирається найближчий більший по потужності двигун постійного струму єдиної серії П. У разі потреби можна застосовувати

дводвигунний електропривод. При цьому обидва двигуни повинні мати однакові номінальні дані.

За номінальною швидкістю  $n_n$  (об/хв) визначається номінальна кутова швидкість двигуна  $\omega_n$  (рад/с):

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

За величиною  $\omega_n$  і відповідній їй максимальній швидкості переміщення столу  $v_\delta$  визначається радіус приведення механічного передавального пристрою  $\rho$  (м/рад) головного електроприводу:

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

Для перевірки вибраного двигуна по нагріву необхідно розрахувати параметри діаграми навантаження, тобто величини моментів, що розвиваються двигуном на окремих інтервалах циклу і тривалість кожного тимчасового інтервалу рисунок 1.

Номінальний момент двигуна

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

Величина допустимого моменту вибирається в межах  $M_{\text{доп}} \leq 2,5 M_n$ . Величини  $M_1$  і  $M_2$  розраховуються відповідно за формулами (2) і (4).

Величина шляху, прохідного столом на 2, 3, 7 і 8 інтервалах, визначається умовами виконання відповідних технологічних операцій. Рекомендується приймати її в межах  $l_m = 0,01-0,03$  м. Тоді тривалість 2 і 3 тимчасових інтервалів дорівнює:

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

Тривалість 7 і 8 інтервалів

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

Тривалість 1, 4, 6, 9, 10 і 12 інтервалів діаграми, протягом яких двигун працює в перехідних режимах, можна розрахувати, скориставшись рівнянням руху електроприводу

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

де  $M_c$  (Н·м) – сумарний приведений момент опору, величина якого залежить від того, на якому тимчасовому інтервалі тахограми працює двигун;

$J$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ) – сумарний приведений момент інерції механічної частини електроприводу.

У нашому випадку

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

де  $\kappa_n = 1, 1-1, 2$  – враховує моменти інерції елементів механічного передавального пристрою;

$J_0$  ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ) – момент інерції двигуна;  $m = m_c + m_d$  – маса поступально рухомих частин.

У процесах розгону і гальмування двигун працює з постійним моментом, рівним  $M_{\text{дон}}$ . Величина моменту опору  $M_c$  на будь-якій з ділянок діаграми також не залежить від часу, тому тривалість  $t_j$  (с) будь-якого перехідного режиму.

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

де  $v_{j+1}$ ,  $v_j$  – початкова і кінцева швидкості перехідного режиму столу.

Тут знак + перед  $M$  відповідає розгону, а знак – гальмуванню двигуна.

Величина шляху  $l_j(m)$ , прохідного столом на інтервалах 1, 4, 6, 9, 10 і 12

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

Повний шлях переміщення столу

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

де  $\kappa_c = 0,8 \div 0,9$  – враховує довжину деталі;

$l_c$  (м) – довжина столу.

За величиною  $l$  і величинам шляхів, прохідним столом на різних інтервалах прямого ходу, знаходимо величину шляху на п'ятому інтервалі  $l_5$  (м)

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

Аналогічно для 11 інтервалу на зворотному ході

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

Тривалість п'ятого і одинадцятого інтервалів складає

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

$$t_{11} = l_{11} / v_0, \quad (21)$$

Перевірка двигуна на нагрів розраховується по методу еквівалентного моменту [7]. Еквівалентний момент  $M_{\text{э}}$  (Н·м) по розрахованій діаграмі навантаження визначається як середньоквадратична величина за формулою

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

де  $n$  – число інтервалів діаграми навантаження;

$n = 12$ ;  $M_i$  – величина моменту на  $i$ -том інтервалі;

$t_i$  – тривалість  $i$ -того інтервалу.

Якщо умова  $M_{\text{э}} \leq M_n$  не виконується, необхідно прийняти двигун більшої потужності і повторити розрахунок.

Застосування ТП в електроприводах постійного струму дозволяє підвищити швидкодію приводу, поліпшити його техніко-економічні, енергетичні і вагові показники. Зокрема, К.К.Д. тиристорного електроприводу на 5–7 % вище за К.К.Д. системи генератор-двигун, а діапазон регулювання швидкості досягає 1000:1 і більш. В той же час ТП мають підвищену чутливість до перевантажень, а пульсуючий характер випрямленого струму збільшує втрати в двигуні і зменшує його комутаційну здатність.

У головному електроприводі поздовжньо-стругального верстата використовується реверсивний тиристорний перетворювач. Його вибір робиться по номінальних значеннях струму і напруги двигуна. При дводвигунному приводі слід вибрати ТП з номінальною випрямленою напругою 460 В. Технічні дані ТП приведені в [6, 7]. У записці пояснення необхідно привести функціональну схему ТП і охарактеризувати призначення її основних елементів.

У тиристорному електроприводі згладжуючі реактори виконують декілька функцій: зокрема, зменшують зону переривчастих струмів, згладжують пульсації випрямленого струму, обмежують струм короткого замикання.



Вплив пульсацій випрямленого струму на комутацію двигунів проявляється в звуженні зони темної комутації в порівнянні з живленням від генератора постійного струму і в появі іскріння під щітками. Забезпечення задовільної комутації особливе важливо для реверсивних електроприводів, що працюють з частими пусками, реверсами і гальмуваннями. Для цього коло випрямленого струму повинно мати індуктивність  $L_{\delta}$  (Гн), значення якої визначається по формулі [7]:

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

де  $U_{dm}$  (В) – амплітудне значення першої гармоніки випрямленої напруги, складові 20 % від номінальної напруги ТП  $U_{mnn} - U_{dm} = 0,2 U_{mnn}$ ;

$\omega$  (1/с) – кутова частота мережі;

$p\%$  – допустима амплітуда першої гармоніки струму у відсотках. Для електроприводів потужністю менше 500кВт  $p=2\div 5\%$ ;

$I_{mnn}$  (А) – номінальний випрямлений струм перетворювача.

Знаючи величину  $L_{\delta}$ , можна визначити величину індуктивності  $L_{\delta p}$  (Гн) додаткового реактора LR (див. рис. 2):

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

де  $L_{я}$  (Гн) – індуктивність якоря двигуна.

Величина  $L_{я}$  визначається за формулою:

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

де  $\kappa = 0,5 - 0,6$  для некомпенсованих машин;

$\kappa = 0,1$  для компенсованих машин;

$U_{\delta n}$  (В),  $I_{\delta n}$  (А),  $n_n$  – номінальна напруга, струм і швидкість двигуна;

$p$  – число пар полюсів двигуна.

Як датчик швидкості ВР застосовується тахогенератор постійного струму. Його вибір слід здійснювати по максимальній швидкості обертання двигуна. Технічні дані тахогенераторів приведені у [8].

## 2.4 Розрахунок параметрів структурної схеми системи підлеглого регулювання

Структурна схема системи зображена на рисунку 3. Вона складена за функціональною схемою, приведеною на рисунку 2. Кожному елементу функціональної схеми поставлена у відповідність передавальна функція одного або декількох певним чином включених елементарних динамічних ланок. Передавальні функції типових елементів систем електроприводу і методика розрахунку їх параметрів приведені у [8].

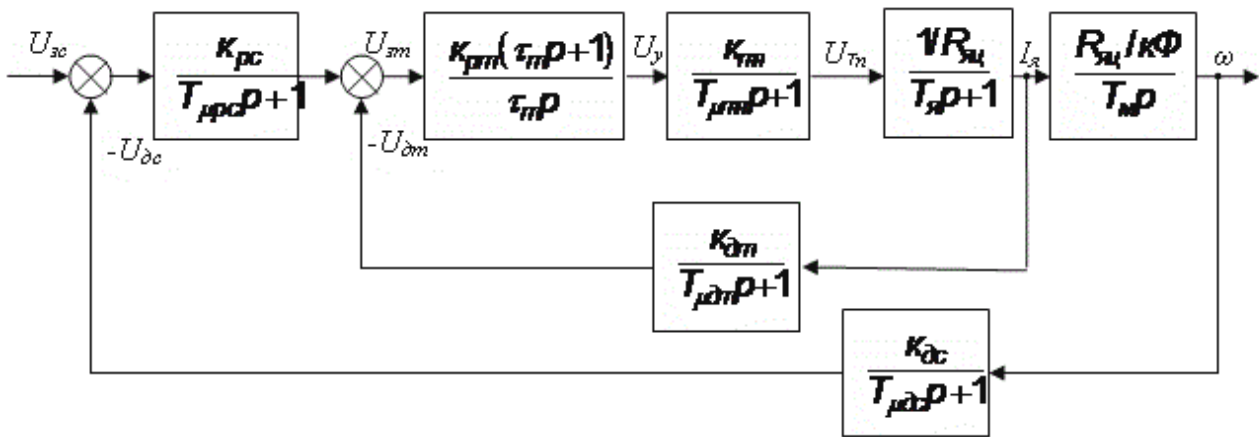


Рисунок 3 – Структурна схема двоконтурної системи підлеглого керування

Система містить два контури регулювання. Внутрішній контур служить для регулювання струму якоря  $I_a$ , а зовнішній – для регулювання швидкості двигуна  $\omega$ .

У записці пояснення необхідно описати принципи побудови СПР, а також методи оптимізації контурів СПР за модульним (МО) і симетричним (З) оптимумом. Ці питання викладені в [7, 8].

Як впливає із структурної схеми на рисунку 3, до складу об'єкта регулювання струмового контуру входять: перетворювач тиристора, якірне коло двигуна і датчик струму якоря. Передавальна функція ТП є інерційною ланкою з коефіцієнтом передачі  $k_{mp}$  і малою постійною часу  $T_{mnp}$  фільтру на вході ТП. Величина  $k_{mp}$  визначається як відношення номінальної напруги ТП

$U_{min}$  до номінального значення сигналу управління  $U_{yn}$  на вході ТП. Оскільки напруга управління  $U_{yn}$  на вході перетворювача тиристора змінюється в межах 0–15 В, маємо:

$$k_{mn} = U_{min}/15 \quad (26)$$

Передавальна функція якірного кола двигуна є інерційною ланкою з коефіцієнтом передачі  $1/R_{яц}$  і електромагнітною постійною часу  $T_{я}$  (с), яка в контурі регулювання струму є «велика» постійною часу.

Активний опір якірного кола двигуна  $R_{яц}$  (Ом) визначається при температурі двигуна  $75^{\circ}\text{C}$ , як сума опорів обмотки якоря  $R_{я}$ , компенсаційної обмотки  $R_{ко}$  і додаткових полюсів  $R_{дп}$ . Якщо величини  $R_{я}$ ,  $R_{ко}$  і  $R_{дп}$  приведені в каталозі для температури  $25^{\circ}\text{C}$ , то перерахунок здійснюється по формулі

$$R_{яц} = 1,2(R_{я} + R_{ко} + R_{дп}). \quad (27)$$

Величина  $T_{я}$  визначається за формулою:

$$T_{я} = L_{\delta}/R_{яц}, \quad (28)$$

де  $L_{\delta}$  – повна індуктивність ланцюга випрямленого струму, величина якого визначається по (23).

Передавальна функція датчика струму якоря, як і в попередніх випадках, є інерційною ланкою з коефіцієнтом передачі  $k_{дс}$  і малою постійною часу  $T_{дт}$  фільтру на вході датчика струму. Датчик складається з операційного підсилювача і вимірювального шунта. При цьому шунт вибирається на 0,075 В, а підсилювач має фіксований коефіцієнт посилення, рівний 134. Найкраща заводо захищеність каналу виміру струму забезпечується у тому випадку, коли номінальний струм шунта  $I_{шн}$  дорівнює номінальному струму двигуна  $I_{дн}$ . З урахуванням того, що обраний двигун допускає 2,5 – кратне перевантаження по струму, коефіцієнт передачі зворотного зв'язку по струму  $k_{дт} = 134 \cdot 0,075 / 2,5 I_{дн}$ .

Згідно з прийнятими критеріями налаштування СПР по МО або СО в контурі, що оптимізується, в прямому каналі управління повинна знаходитися інтегруюча ланка, тому регулятор струму обирається інтегрально-пропорційним далі (ІІ) з передавальною функцією

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

де  $\kappa_{pm}$  – коефіцієнт передачі;

$\tau_m$  – постійна часу регулювальника струму.

При оптимізації контуру СПР некомпенсована постійна часу контуру  $T_\mu$  є «базовою» величиною. Для контуру струму некомпенсована постійна часу

$$T_{\mu m} = T_{\mu mn} + T_{\mu \delta m} + T_{\mu pm}, \quad (30)$$

де  $T_{\mu pm}$  – мала постійна часу фільтру на вході регулятора струму.

Залежно від виду елементної бази, на якій побудована СПР, величина  $T_{\mu m}$  лежить в межах  $1 \leq T_{\mu m} \leq 10$ мс [7]. При розрахунках доцільно приймати  $T_{\mu m}$  в межах 4–10 мс, оскільки при менших значеннях  $T_{\mu m}$  завадозахищеність контуру струму знижується.

Залежно від величини співвідношення  $T_\gamma/T_{\mu m}$  рекомендується: при  $T_\gamma / 4T_{\mu m} < 1$  застосовувати налаштування контуру струму по модульному оптимуму; при  $T_\gamma / 4T_{\mu m} > 1$  – за симетричним оптимумом [9].

При налаштуванні контуру струму по МО параметри регулятора струму визначаються із співвідношень

$$\tau_m = T_\gamma, \quad (31)$$

$$\kappa_{pm} = T_\gamma / \kappa_{om} B_{om}, \quad (32)$$

де  $\kappa_{om} = \kappa_{mn} \kappa_{\delta m} / R_{яц}$  – коефіцієнт передачі об'єкта управління контуру струму;

$B_{om} = 2T_{\mu m}$  – постійна інтеграції контуру струму.

Передавальна функція контуру струму, оптимізованого по МО має вигляд

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

де  $\kappa_m = 1/\kappa_{\delta m}$  – коефіцієнт передачі оптимізованого контуру струму.

При налаштуванні контуру струму по СО розрахунок параметром ПІ-регулятора здійснюють аналогічно. Відмінність полягає лише в тому, що величину  $\tau_m$  вибирають рівною  $4T_{\mu m}$ . Передавальна функція контуру струму, оптимізованого по СО, має такий вигляд:

$$W_m(P) = \frac{\kappa_m(4T_{\mu m}p+1)}{8T_{\mu m}^3p^3 + 8T_{\mu m}^2p^2 + 4T_{\mu m}p+1}, \quad (34)$$

До складу об'єкту управління контуру швидкості (зображений на рис. 3) входять, механічна частина електроприводу, оптимізованого струмового контуру і датчик швидкості.

Передавальна функція механічної частини електроприводу є інтегруючою ланкою з коефіцієнтом передачі  $R_{яц}/\kappa\Phi$  і електромеханічною постійною часу  $T_m$ , яка є «великою» постійною часу в контурі регулювання швидкості.

Величина  $\kappa\Phi$  може бути визначена за допомогою виразу

$$\kappa\Phi = (U_{\partial n} - I_{\partial n}R_{яц})/\omega_n \quad (35)$$

Величина  $T_m$  розраховується за формулою:

$$T_m = \frac{JR_{яц}}{(\kappa\Phi)^2}, \quad (36)$$

де величина  $J$  визначається по формулі (14).

Передавальна функція датчика швидкості є інерційною ланкою з коефіцієнтом передачі  $\kappa_{\partial c}$  і малою постійною часу  $T_{\mu \partial c}$  фільтру на його виході. Статичні характеристики датчиків швидкості (тахогенераторів) лінійні і однозначні. Тому величина  $\kappa_{\partial c}$  визначається як відношення номінальної напруги тахогенератора  $U_{\partial cн}$  до номінальної швидкості  $\omega_{\partial cн}$

$$\kappa_{\partial c} = \frac{U_{\partial cн}}{\omega_{\partial cн}}. \quad (37)$$

Тип регулювальника швидкості і спосіб його оптимізації, на відміну від регулювальника струму, вибирають не на підставі співвідношення  $T_m$  і

некомпенсованою постійною часу контуру швидкості  $T_{\mu c}$ , а залежно від вимог до точності підтримки заданого значення швидкості. Оскільки в прямому каналі управління контуру регулювання швидкості (КРШ) вже є інтегруюча ланка, що входить до складу об'єкта управління, то можна застосовувати як П, так і ПІ-регулятор швидкості. При цьому в першому випадку система регулювання швидкості виходить одноразово інтегруючою, а в другому – двократно інтегруючою. У записці пояснення необхідно роз'яснити сенс понять «одноразово» і «двократно інтегруюча система» і описати властивості таких систем.

Вимоги до точності підтримки заданого значення швидкості головного електроприводу поздовжньо-стругального верстата не дуже жорсткі, оскільки статизм  $S_{xz} \leq 5\%$ . Тому можливе застосування ПІ-регулятора швидкості з передавальною функцією, що представляє аперіодичну ланку з коефіцієнтом передачі  $k_{pc}$  і малою постійною часу  $T_{\mu pc}$  фільтру на вході регулятора швидкості.

Оптимальному налаштуванню контуру регулювання швидкості з ПІ-регулятором відповідає

$$k_{pc} = T_m / k_{oc} B_{oc} \quad (38)$$

де  $k_{oc} = k_T k_{dc} R_{яц} / k_{\Phi}$  – коефіцієнт передачі об'єкта управління контуру швидкості;

$B_{oc} = 2T_{\mu c}$  – постійна інтеграції КРС;

$T_{\mu c} = 2T_{\mu t} + T_{\mu dc}$ .

Величина  $T_{\mu dc}$  дорівнює 10–12 мс.

Передавальна функція оптимізованого контуру швидкості виглядає так:

$$W_c(P) = \frac{k_c}{2T_{\mu c}^2 P^2 + 2T_{\mu c} P + 1} \quad (39)$$

де  $k_c = I / k_{dc}$  – коефіцієнт передачі оптимізованого контуру швидкості.

Система з ПІ-регулятором швидкості є статичною системою регулювання. Завдання на вході регулювальника струму виникає в результаті наявності

статичної помилки  $\Delta\omega_c$ , тобто різниці заданого  $\omega_3$  і фактичного  $\omega$  значень швидкості двигуна  $\Delta\omega_c = \omega_3 - \omega$ :

$$U_{zm} = U_{pc} = \kappa_{pc}\kappa_{dc}\Delta\omega_c. \quad (40)$$

Величина струму якоря, відповідна завданню, рівна

$$I_a = \kappa_m U_{zm} \quad (41)$$

На підставі рівнянь (40) і (41), з урахуванням рівняння (38), величина  $\Delta\omega_c$  визначається співвідношенням

$$\Delta\omega_c = \frac{I_a}{\kappa_m \kappa_{pc} \kappa_{dc}} = \frac{I_a R_{яц} B_{oc}}{\kappa \Phi T_m} \quad (42)$$

У записі пояснення необхідно визначити величину  $\Delta\omega_c$  при  $I_a = I_{дн}$ , а також охарактеризувати можливості її зменшення.

## 2.5 Визначення показників якості замкнутої системи

Показники якості системи можуть бути визначені за її перехідною характеристикою  $h(t)$ , яка є реакцією системи на одиничну ступінчасту дію  $I(t)$  за нульових початкових умов.

Оригінал перехідної характеристики  $h(t)$  можна визначити по передавальній функції системи за допомогою теореми розкладання [7].

Проте нині раціональнішим підходом є використання комп'ютерного моделювання на основі існуючих прикладних пакетів, в які вже закладений деякий набір готових і апробованих алгоритмів. Сучасні версії усіх цих пакетів дозволяють здійснювати чисельне моделювання систем і процесів управління в них на досить високому рівні з використанням широкого спектру засобів візуального представлення результатів. Найбільш пристосованим для вирішення конкретних інженерних завдань в області електромеханіки являється пакет MATLAB з широко розвиненими доповненнями (TOOLBOXES), з яких

TOOLBOXES SIMULINK найбільш пристосований для аналізу електромеханічних систем [10].

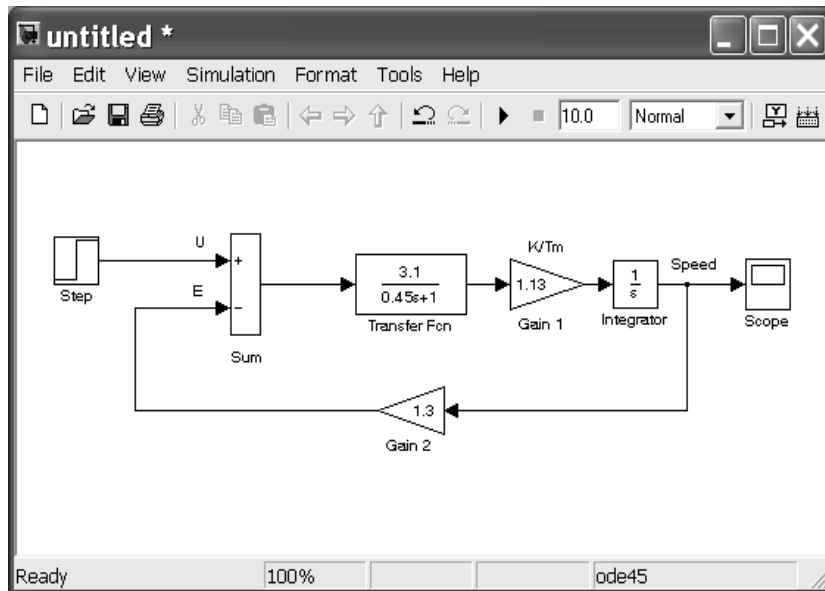
Об'єктом управління в проєктованій системі є електропривод з двигуном постійного струму незалежного збудження при управлінні двигуном з боку якоря. Модель електроприводу, відповідна структурній схемі на рисунку 3, приведена на рисунку 4, а.

Блок (Transfer Fcn) моделює електромагнітний перехідний процес з коефіцієнтом передачі  $1/R_{яц}$  і постійною часу  $T_{я}$ . Блоки (Gain 1, Integrator) моделюють електромеханічний перехідний процес. Коефіцієнт передачі блоку (Gain 1) визначається як результат ділення коефіцієнта передачі інтегруючої ланки  $R_{яц}/k\Phi$  на електромеханічну постійну часу  $T_m$ . Блоки (Gain 2, Sum) моделюють внутрішній зворотний зв'язок по е.р.с. ( $E$ ) обертання двигуна. Коефіцієнт передачі блока (Gain 2) дорівнює  $k\Phi$ .

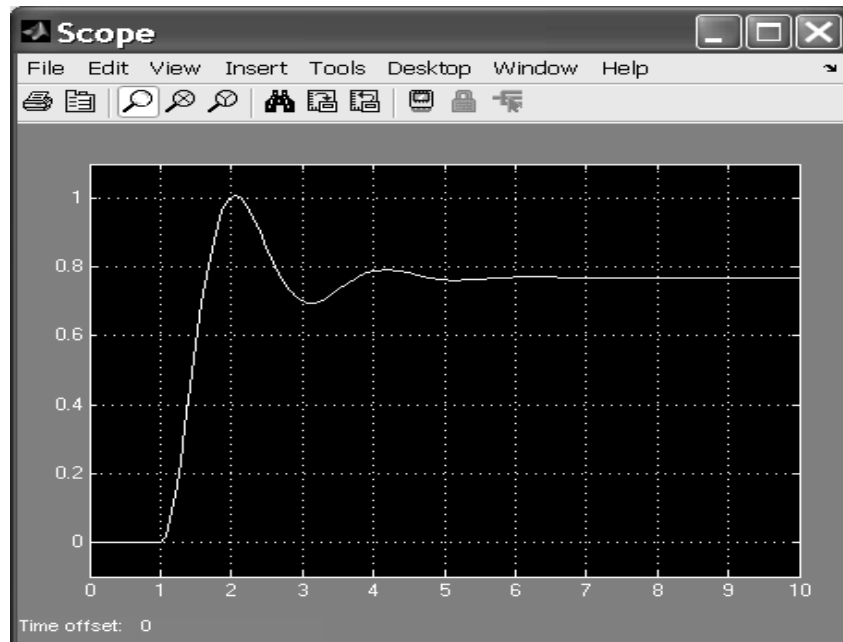
Результати моделювання приведені на рисунку 4, б. Отримана перехідна характеристика об'єкта управління дозволяє визначити показники якості – час регулювання  $t_p$ , кількість відхилень вихідної величини від сталого значення за час регулювання  $n$  і пере регулювання  $\sigma$ . Набутих значень необхідно порівняти з оптимальними показниками якості – одне відхилення від сталого значення з пере регулюванням  $\sigma \leq 5\%$ .

Моделювання СПР, як і розрахунок оптимальних значень налаштувань регулювальників контурів, як і налаштування реальної СПР, починається з внутрішнього контуру – контуру регулювання струму якоря двигуна.





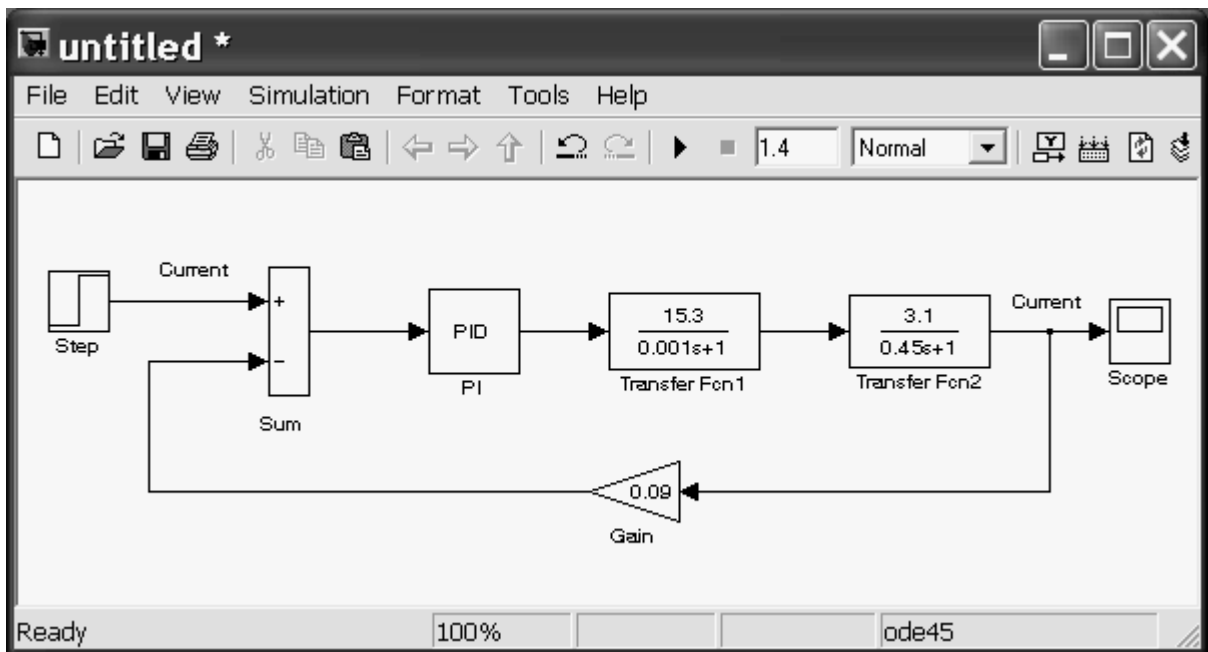
а



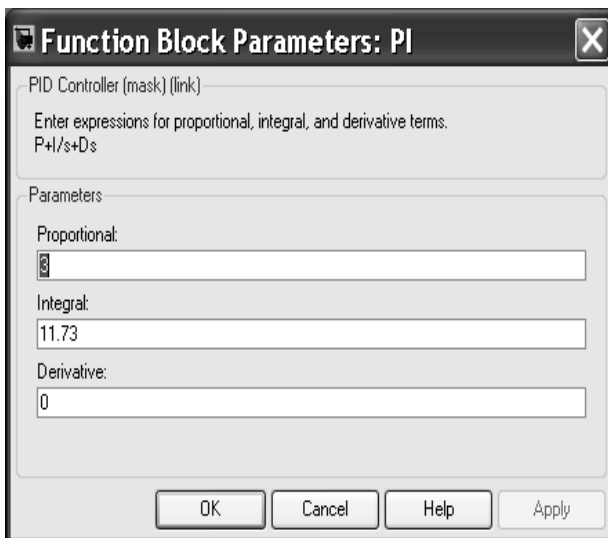
б

Рисунок 4 – Графічне зображення моделі (а) і результати моделювання (б) електроприводу з двигуном постійного струму незалежного збудження при управлінні двигуном з боку якоря

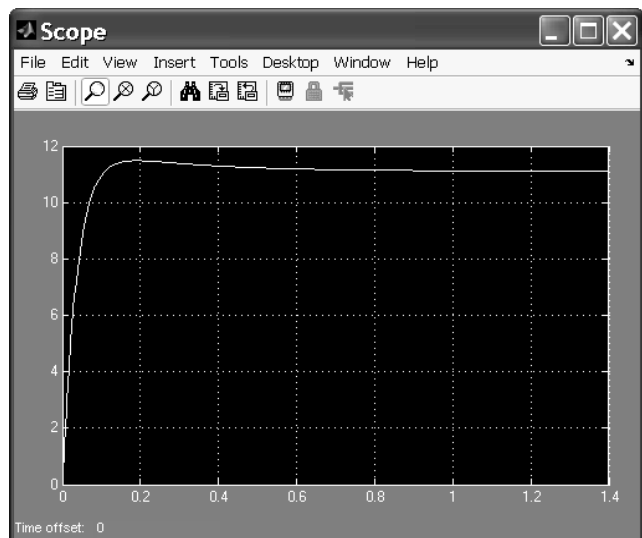
Модель контуру струму приведена на рисунку 5, а. Блок (Transfer Fcn1) моделює перетворювач тиристора, а блок (Transfer Fcn2) – електромагнітний перехідний процес. Блок (Gain) моделює зворотний зв'язок по струму якоря з коефіцієнтом передачі  $k_{\Delta m}$ . Пропорційно-інтегральний регулятор струму моделюється за допомогою блоку (PID) – ПІД – регулятора, що входить до складу додаткової бібліотеки Simulink Extras. Вікно налаштування регулятора приведено на рисунку 5, б.



а



б



в

Рисунок 5 – Результати моделювання моделі (а), вікно налаштування PID регулятора (б) і результати моделювання (в) контуру регулювання і струму якоря двигуна

Коефіцієнт передачі диференціальної частини у вікні налаштування ПД-регулятор (Derivative) приймається рівним нулю.

Передавальна функція П-регулятора струму представлена вираженням (29).

Після ділення чисельника і знаменника передавальної функції на  $\kappa_{pm}$  вона може бути перетворена так:

$$W_{pm}(p) = \frac{\kappa_{pm}(\tau_m p + 1)}{\tau_m p} = \frac{\tau_m p + 1}{(\tau_m / \kappa_{pm})p} = \frac{\tau_m}{\tau_m / \kappa_{pm}} + \frac{1}{(\tau_m / \kappa_{pm})p} = \kappa_n + \frac{\kappa_u}{p} \quad (43)$$

де  $\kappa_n = \frac{\tau_m}{\tau_m / \kappa_{pm}}$  – коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора струму;

$\kappa_u = \frac{1}{\tau_m / \kappa_{pm}}$  – коефіцієнт передачі інтегральної частини.

Результати моделювання контуру регулювання струму приведені на рисунку 5, в. Оскільки рівняння (31) для визначення оптимального значення  $\kappa_{pm}$  отримане без урахування внутрішнього зворотного зв'язку по е.р.с. обертання двигуна, показники якості перехідної характеристики можуть дещо відрізнятися від оптимальних. Для отримання  $\sigma \leq 5\%$  необхідно змінити величину  $\kappa_{pm}$ .

Модель контуру регулювання швидкості приведена на рисунку 6, а. У ній оптимізований контур регулювання струму входить до складу об'єкту управління як ланка з малою, постійною, що не компенсується, часу  $T_{\mu m}$ . Він представлений блоками (Transfer Fcn1, Transfer Fcn2, Sum2, Sum3, Gain1, Gain3, PI). Сигналом завдання для контуру регулювання струму є вихідний сигнал регулювальника швидкості. На вхід + блока (Sum2) він подається крізь нелінійний блок (Saturation) – підсилювач з обмеженням. Величина вихідного сигналу при позитивному і негативному вхідному сигналі встановлюється у вікні налаштування блоку. Рекомендується приймати її рівній 10. Використання блоку (Saturation) дозволяє реалізувати ще одну важливу особливість СПР – простими засобами здійснювати обмеження будь-якої з координат системи: дійсне значення струму на виході контуру в сталому режимі не може бути більше заданого.

Електромеханічний перехідний процес моделюється блоками (Gain2, Integrator). Застосування блоків (Sum4, Step2) дозволяє моделювати реакцію

системи на зміну обурюючої дії (моменту опору). Блок (Gain4) моделює зворотний зв'язок за швидкістю двигуна з коефіцієнтом передачі  $\kappa_{\omega}$ .

Регулювання швидкості моделюється блоком (P). Відповідно до правил оптимізації контурів СПР застосований П – регулятор, оскільки до складу об'єкту управління контуру швидкості входить інтегруюча ланка. Коефіцієнт передачі пропорційної частини ПД – регулятора, встановлюваний у вікні налаштування регулятора, визначається по формулі (38). Коефіцієнти передачі інтегральної і диференціальної частин приймаються рівними нулю.

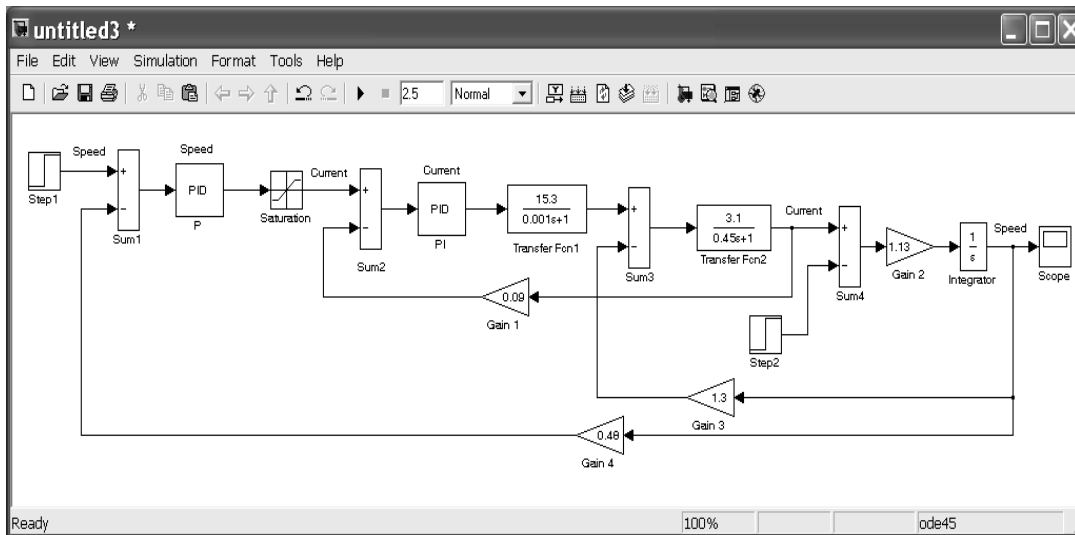
Результати моделювання контуру регулювання швидкості приведені на рисунку 6, а. Як і для контуру регулювання струму, показники якості можуть відрізнятися від оптимальних. Для отримання  $\sigma \leq 5\%$  необхідно змінити величину коефіцієнта передачі пропорційної частини регулятора швидкості  $\kappa_{pc}$ .

Після закінчення 1,5 с з'являється сигнал на виході блоку (Step2). Нове значення регульованої величини, що встановлюється після закінчення перехідного процесу, менше попереднього на величину  $\Delta\omega_c$ , визначувану по формулі (42). Це означає, що по обуренню контур регулювання швидкості є статичним. Якщо така характеристика не задовольняє вимогам, то слід застосувати ПІ-регулятор швидкості з передавальною функцією

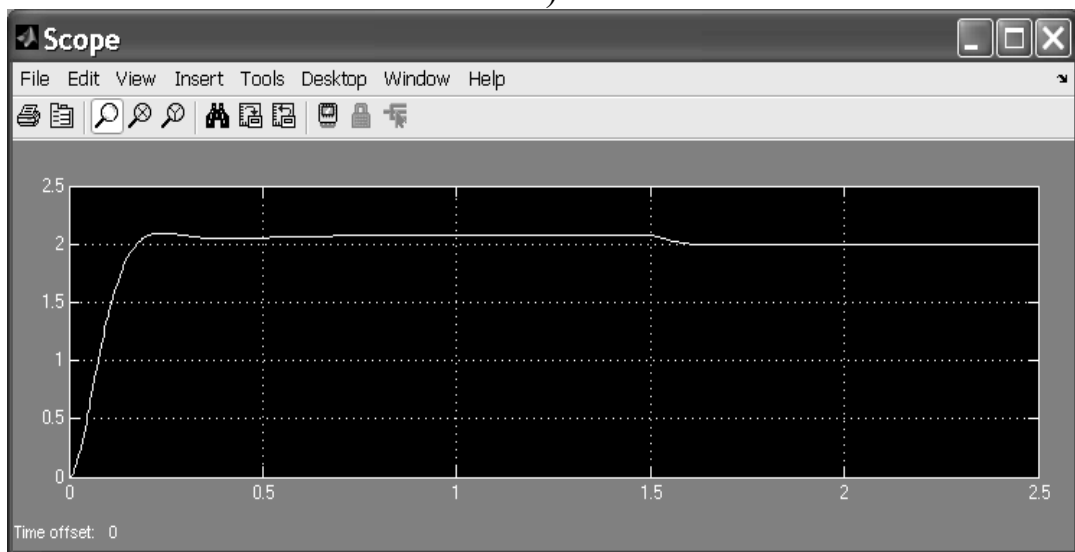
$$W_{pc}(p) = \frac{\kappa_{pc}(\tau_c p + 1)}{\tau_c p} \quad (44)$$

де  $\kappa_{pc}$  – коефіцієнт передачі регулювальника швидкості, величина якого визначається по формулі (38);

$\tau_c$  – постійна часу регулювальника швидкості, рівна  $\tau_c = 4T_{\mu c}$ .



а)



б)

Рисунок 6 – Результати моделювання моделі (а) і результати моделювання (б) контуру регулювання швидкості двигуна

Після перетворень, аналогічних виконаним для регулятора струму, рівняння для визначення коефіцієнта передачі пропорційної частини регулювальника швидкості матиме вигляд:

$$K_n = \frac{\tau_c}{\tau_c / K_{pc}} \quad (45)$$

Для інтегральної частини:

$$K_u = \frac{1}{\tau_c / K_{pc}} \quad (46)$$

Після установки набутих значень у вікні налаштування PID регулювальника швидкості, повторити моделювання контуру регулювання швидкості. Результати моделювання проаналізувати і пояснити, скориставшись визначенням передавальної функції помилково регулювання.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Зеленов А. Б. Теория электропривода. Часть I : учеб. пособие / А. Б. Зеленов. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 394 с.
2. Зеленов А. Б. Теория электропривода. Часть II : учеб. пособие / А. Б. Зеленов. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 513 с.
3. Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.]; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.
4. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
5. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод / В. В. Москаленко. – М. : Энергоатомиздат. – 1986. – 416 с.
6. Піцан Р. Збірник задач до курсу «Електропривід»: навч. посібник / Р. Піцан, В. Бардачевський, Б. Бойчук. – Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.
7. Елисеева В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу / В. А. Елисеев, А. В. Шинянский ; под редакцией В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
8. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник / А. З. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Копылова И. П. Справочник по электрическим машинам. В 2 т./ И. П. Копылов и Б. К. Клоков ; под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
10. Крупович В. И. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / В. И. Крупович, Ю. Г. Барыбин, М. П. Самовер ; под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. П. Самовера. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1982. – 416 с.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Технічні дані поздовжньо-стругальних верстатів

№ з/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Варіант					
				1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5					
1	Маса стола	$m_c$	$10^3$ кг	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
2	Маса деталі	$m_d$	$10^3$ кг	2	2,5	2,3	1,5	4,5	3,6
3	Довжина стола	$l_c$	м	4	5,5	1,8	4,5	4,2	3,8
4	Кількість вертикальних супортів	$N_{cv}$	шт.	1	1	1	2	2	2
5	Кількість горизонтальних супортів	$N_{ch}$	шт.	1	1	1	2	1	2
6	Максимальне зусилля різання із супорта	$F_p$	$10^3$ Н	0,5	0,5	0,6	1,5	0,6	0,8
7	Швидкість різання	$v_p$	м/с	0,7	0,7	0,8	0,5	1	0,8
8	Швидке переміщення стола	$v_b$	м/с	2,5	2,7	2,9	2,7	2,0	2,1
9	Швидкість входу різця в метал	$v_{vx}$	м/с	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,1
10	Швидкість виходу різця з металу	$v_{vix}$	м/с	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3



Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				7	8	9	10	11	12
1	Маса стола	$m_c$	$10^3\text{кг}$	1,8	3	4	5,8	12	20
2	Маса деталі	$m_d$	$10^3\text{кг}$	6	7	7,5	10	4,5	35
3	Довжина стола	$l_c$	м	2	3,5	2,7	3,5	6,5	4
4	Кількість вертикальних супортів	$N_{cv}$	шт.	2	2	2	2	1	2
5	Кількість горизонтальних супортів	$N_{ch}$	шт.	2	2	2	2	1	2
6	Максимальне зусилля різання із супорта	$F_p$	$10^3\text{Н}$	0,6	1	1	1,2	0,6	1,5
7	Швидкість різання	$v_p$	м/с	0,6	0,6	0,6	0,7	1	0,5
8	Швидке переміщення стола	$v_b$	м/с	1,9	1,8	1,6	1,7	2,3	1,4
9	Швидкість входу різця в метал	$v_{vx}$	м/с	0,1	0,1	0,09	0,1	0,09	0,08
10	Швидкість виходу різця з металу	$v_{vix}$	м/с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				13	14	15	16	17	18
1	Маса стола	$m_c$	$10^3\text{кг}$	45	80	100	75	50	75
2	Маса деталі	$m_d$	$10^3\text{кг}$	75	140	175	100	90	120
3	Довжина стола	$l_c$	м	6	5,5	9	7	6	7
4	Кількість вертикальних супортів	$N_{cv}$	шт.	2	2	2	2	2	2
5	Кількість горизонтальних супортів	$N_{ch}$	шт.	3	3	3	3	3	3
6	Максимальне зусилля різання із супорта	$F_p$	$10^3\text{Н}$	1,2	1	1	1	1	1,2
7	Швидкість різання	$v_p$	м/с	0,4	0,4	0,3	0,3	0,35	0,3
8	Швидке переміщення стола	$v_b$	м/с	1,25	1,2	0,9	1,1	1,6	1,0
9	Швидкість входу різця в метал	$v_{vx}$	м/с	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07
10	Швидкість виходу різця з металу	$v_{vix}$	м/с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				19	20	21	22	23	24
1	Маса стола	$m_c$	$10^3\text{кг}$	45	20	10	9	8	6
2	Маса деталі	$m_d$	$10^3\text{кг}$	60	55	18	17	14	9
3	Довжина стола	$l_c$	м	6	4	5	6,5	4,5	9,7
4	Кількість вертикальних супортів	$N_{cv}$	шт.	2	2	2	2	2	2
5	Кількість горизонтальних супортів	$N_{ch}$	шт.	3	2	2	2	2	2
6	Максимальне зусилля різання із супорта	$F_p$	$10^3\text{Н}$	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
7	Швидкість різання	$v_p$	м/с	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8
8	Швидке переміщення стола	$v_b$	м/с	1,55	1,6	1,7	2,1	2,0	2,9
9	Швидкість входу різця в метал	$v_{вх}$	м/с	0,08	0,08	0,9	0,1	0,1	0,1
10	Швидкість виходу різця з металу	$v_{вих}$	м/с	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3

Закінчення таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				25	26	27	28	29	30
1	Маса стола	$m_c$	$10^3\text{кг}$	5,5	4,5	3	1,5	20	45
2	Маса деталі	$m_d$	$10^3\text{кг}$	7	6,5	7	2,5	55	75
3	Довжина стола	$l_c$	м	8,8	8,5	7,3	6,5	4	6
4	Кількість вертикальних супортів	$N_{cv}$	шт.	1	1	1	1	2	2
5	Кількість горизонтальних супортів	$N_{ch}$	шт.	2	1	1	1	2	3
6	Максимальне зусилля різання із супорта	$F_p$	$10^3\text{Н}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1,2
7	Швидкість різання	$v_p$	м/с	1	1	1,2	1,2	0,5	0,4
8	Швидке переміщення стола	$v_b$	м/с	2,7	2,8	3,0	2,9	1,6	1,25
9	Швидкість входу різця в метал	$v_{вх}$	м/с	0,09	0,09	0,1	0,18	0,08	0,08
10	Швидкість виходу різця з металу	$v_{вих}$	м/с	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2

# *Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації

до виконання розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

## **«ПІД'ЄМНОТРАНСПОРТНЕ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ»**

*(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ФАТЕЄВ** Віктор Миколайович,  
**ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархасєв*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2018, поз. 205 М.

---

Підп. до друку 26.09.2019. Формат 60 × 84/16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 2,2.  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rektorat@kname.edu.ua](mailto:rektorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.