

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»**

*(для студентів усіх 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 «Елементи автоматизованого електроприводу» (для студентів усіх 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. – 30 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 та заочної форм навчання під час підготовки до занять, складання заліку з курсу «Елементи автоматизованого електроприводу».

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Зміст розрахунково-графічного завдання.....	6
1.1 Обсяг розрахунково-графічного завдання.....	6
2 Методичні рекомендації щодо виконання окремих розділів розрахунково-графічного завдання.....	8
2.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу.....	8
2.2 Визначення функціональної схеми системи стабілізації швидкості.....	8
3 Вибір елементів функціональної схеми, системи стабілізації та розрахунок їх статичних і динамічних параметрів.....	12
3.1 Перетворювач тиристора.....	12
3.2 Згладжуючий реактор.....	13
3.3 Датчик швидкості.....	14
3.4 Об'єкт управління.....	14
3.5 Регулятор швидкості.....	16
3.6 Корируючий пристрій.....	17
4 Визначення показників якості системи стабілізації швидкості.....	22
Список джерел .....	24
Додаток А Технічні дані поздовжньо-стругальних верстатів.....	25

## ВСТУП

З давніх часів людина прагнула замінити важку фізичну працю, що була джерелом механічної енергії (МЕ), роботою механізмів і машин. Для цього на транспорті та на сільськогосподарських роботах, на млинах і зрошувальних системах він використовував мускульну силу тварин, енергію вітру і падаючої води, а пізніше – хімічну енергію палива. Так з'явився привід – пристрій, що складається з трьох істотно різних за функціональним призначенням частин: двигуна (Д), механічного передавального пристрою (МПУ) та технологічної машини (ТМ).

Призначення двигуна – перетворення енергії різних видів в механічну енергію. Механічний передавальний пристрій призначений для передачі механічної енергії від двигуна до робочого органу технологічної машини. Воно не впливає на кількість переданої механічної енергії (без урахування втрат) і служить для узгодження видів руху двигуна і робочого органу технологічної машини. Воно виконується в вигляді ремінної, ланцюгової, зубчастої або інших механічних передач.

У сучасних приводах як джерело механічної енергії використовуються різні електричні двигуни, які перетворюють електричну енергію в механічну, Тому привід отримав назву електроприводу. До його складу крім названих елементів входить керований перетворювач, за допомогою якого електрична енергія від мережі подається до електричного двигуна.

Змінюючи сигнал управління перетворювачем  $U_u$ , можна змінювати кількість електричної енергії, що надходить від мережі до двигуна. В результаті цього буде змінюватися кількість механічної енергії, що виробляється двигуном і одержується технологічною машиною. Це, в свою чергу, призведе до зміни технологічного процесу, що проявляється в зміні регульованої величини  $y(t)$ .

Пріоритет у створенні електроприводу належить російським ученим Б. С. Якобі і Е. Х. Ленцу, які в 1834 році винайшли двигун постійного струму, а в 1838 році застосували його для приведення в рух катера. Однак

недосконалість двигуна і неекономічність джерела електричної енергії (гальванічної батареї) не дозволили цьому електроприводу знайти практичне застосування.

У середині XIX століття спроби застосування електроприводу з двигуном постійного струму для друкарських і ткацьких машин робилися вченими Франції та Італії. Однак система постійного струму не давала задовільного результату. До 1890 року тільки 5 % загальної потужності двигунів приводів становили електричні двигуни.

Широке застосування електроприводу пов'язано з винаходом у 1889 – 1891 роках російським інженером Доліво-Добровольським системи трифазного змінного струму і трифазного асинхронного двигуна. Простота трифазної системи, можливість централізованого виробництва електроенергії, зручність її розподілу привели до того, що до 1927 року вже 75 % загальної потужності двигунів приводів становили електричні двигуни.

На сьогодні в провідних галузях промисловості відношення встановленої потужності електроприводів до загальної встановленої потужності приводів з двигунами всіх видів (теплових, гідравлічних, пневматичних) наближається до 100 %.

Електропривод працює в середовищах агресивних рідин і газів при низьких і високих температурах; завдяки керованості перетворювача, електропривод легко регулює хід технологічного процесу, забезпечуючи різні параметри руху робочих органів ТМ; він має високий К.К.Д., надійний в експлуатації і не забруднює навколишнє середовище. Відмінною особливістю сучасного електроприводу є те, що в ньому сигнал управління перетворювачем  $U_{\omega}$  формується спеціальним автоматичним керуючим пристроєм (АКП) без безпосередньої участі людини. Таке управління називають автоматичним, а електропривод – автоматизованим (АЕП).

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

**Мета розрахунково-графічного завдання (РГЗ):** курс «Елементи автоматизованого електроприводу» займає важливе місце в підготовці бакалаврів з електроенергетики, електротехніки, та електромеханіки, так як електропривод будучи основним споживачем електроенергії в народному господарстві, забезпечує механічної енергією, переважну більшість технологічних машин і механізмів і визначає виконання вимог до показників режимів їх роботи.

Розрахунково-графічна робота з курсу «Елементи автоматизованого електроприводу» повинна дати студенту цілісне уявлення про методика вибору принципу побудови системи електроприводу, навчити застосовувати отримані теоретичні знання при практичних розрахунках параметрів елементів системи і аналізі автоматичних систем керування електроприводом.

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

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

1. Завдання на розрахунково-графічну роботу.
2. Визначення функціональної схеми системи стабілізації швидкості.
3. Вибір елементів функціональної схеми системи стабілізації

швидкості двигуна і розрахунок їх статичних і динамічних параметрів:

- тиристорний перетворювач;
- згладжувальний реактор;
- датчик швидкості;
- об'єкт управління;

- регулятор швидкості;
- коригувальний пристрій.

#### 4. Визначення показників якості системи стабілізації швидкості.

На кресленні повинна бути представлена функціональна схема електроприводу, структурна схема скоректованої системи та результати її моделювання.

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

### **2.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу**

У розрахунково-графічній роботі вибираємо функціональну схему системи стабілізації швидкості двигуна постійного струму незалежного збудження та елементи що входять до її складу. У даному розділі пояснювальної записки необхідно сформулювати основні завдання, які слід вирішувати при виконанні РГР, а також, відповідно до заданого варіанту привести вихідні дані для розрахунку (див. дод. А).

### **2.2 Визначення функціональної схеми системи стабілізації швидкості**

Системи стабілізації швидкості застосовують для приводів технологічних машин, які потребують особливо точного підтримки заданого значення швидкості, потужності або інших параметрів робочого процесу. Вони забезпечують завдання і автоматичну стабілізацію на заданому рівні регульованого параметра в сталому і перехідному режимах, обумовлених впливом на робочий процес впливів, що обурюють [1].

Серед великої різноманітності систем, основною функцією яких є підтримання сталості регульованої величини, найбільш характерні системи стабілізації швидкості. Вони виконуються з живленням двигуна (Д) від керованого перетворювача (П). Тому їх часто називають замкнутими системами П-Д або системами П-Д із зворотними зв'язками [2]. В даний час найбільш широке застосування знайшли системи «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д), в якій якір двигуна постійного струму незалежного збудження живиться від керованого перетворювача, і система «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД), де статорні обмотки асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором отримують живлення від керованого



перетворювача частоти. Обидві системи забезпечують необхідні характеристики стабілізації швидкості, тому остаточний вибір варіанта здійснюється на підставі техніко-економічного розрахунку. У РГЗ приймається до розгляду система ТП-Д.

Основним показником роботи системи стабілізації швидкості в сталому режимі служить точність підтримання сталості заданої швидкості при впливі на систему різних збурень і, в першу чергу, зміни моменту статичного навантаження приводу  $M_c$ .

Точність системи визначається величиною статичного падіння швидкості  $\Delta\omega_c$  при зміні  $M_c$  від моменту статичного навантаження холостого ходу  $M_{схх}$  до  $M_c$ , рівного номінальному моменту двигуна  $M_n$ . Відсоток вираження  $\Delta\omega_c$  по відношенню до швидкості ідеального холостого ходу  $\omega_0$  називається статизмом

$$S_x = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = (\Delta\omega_c / \omega_0) \cdot 100(\%), \quad (2.1)$$

де  $\omega$  – швидкість двигуна при  $M_c = M_n$ .

При зменшенні напруги на якорі механічна характеристика системи опускається вниз паралельним переносом. Тому величина  $\Delta\omega_c$  не змінюється, а статизм  $S_x$  збільшується.

Максимальне значення він буде мати на нижній характеристиці:

$$S_{x \text{ макс}} = \Delta\omega_c / \omega_{0 \text{ мін}} = (\Delta\omega_c / \omega_{0 \text{ макс}}) \cdot D \cdot 100(\%), \quad (2.2)$$

де  $\omega_{0 \text{ макс}}$ ,  $\omega_{0 \text{ мін}}$  – максимальна й мінімальна швидкості ідеального холостого ходу характеристик, відповідних діапазону регулювання швидкості  $D$ ;

$D = \omega_{0 \text{ макс}} / \omega_{0 \text{ мін}}$  – діапазон регулювання швидкості.

Отже, задану точність підтримання сталості швидкості необхідно забезпечувати на нижній характеристиці системи. При збільшенні діапазону регулювання швидкості заданий статизм можна забезпечити тільки шляхом зменшення  $\Delta\omega_c$ .

Залежно від вимог до точності стабілізації і діапазону регулювання швидкості застосовують різні зворотні зв'язки.

У системі ТП-Д можна застосувати негативний зворотний зв'язок по напрузі перетворювача. Однак в такій системі навіть при астатичному законі регулювання напруги, величина  $\Delta\omega_c$  не може бути меншою за відповідну на природній характеристиці  $\Delta\omega_{ce}$ .

При порівняно невеликих діапазонах регулювання швидкості система ТП-Д виконується з негативним зворотним зв'язком по ЕРС обертання, що дозволяє побічно контролювати швидкість двигуна.

При необхідності стабілізації швидкості з високою точністю використовують головний негативний зворотний зв'язок по швидкості.

У РГЗ вибираються елементи й розраховуються показники якості системи ТП-Д з головним негативним зворотним зв'язком за швидкістю двигуна. На рисунку 2.1 приведена функціональна схема замкнутої системи ТП-Д.

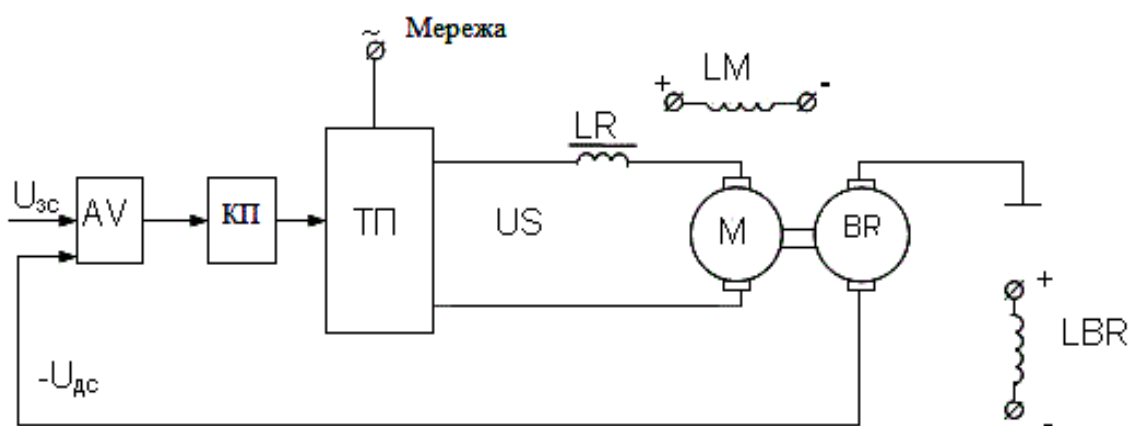


Рисунок 2.1– Функціональна схема стабілізації швидкості електроприводу

На функціональній схемі (рис. 1) необхідні показники сталого режиму роботи, забезпечується за допомогою вибору структури й параметрів регулятора швидкості AV, а якість регулювання – структурою та параметрами послідовного коригуючого пристрою (КП). До вузлу підсумовування на вході AV, крім сигналу завдання швидкості  $U_{зс}$  подається сигнал зворотного зв'язку по швидкості  $U_{дс}$ , який знімається з виходу тахогенератора BR. Реактор LR обмежує на необхідному рівні пульсації випрямленого струму.

У записці пояснення необхідно привести функціональну схему системи, вказати вживаний принцип управління, призначення кожного елементу системи і показники, що характеризують систему стабілізації в сталому і перехідному режимах роботи.

### **3 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ, СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

#### **3.1 Перетворювач тиристора**

Застосування ТП в електроприводах постійного струму дозволяє підвищити швидкодію приводу, поліпшити його енергетичні і вагові показники. Зокрема, К. К. Д. електроприводу тиристора на 5–7 % вище за К. К. Д. системи генератор-двигун, діапазон регулювання швидкості досягає  $D = 1000$  і більш, точність підтримки заданого значення швидкості може бути доведена до  $S_x = 0,2$  %. Водночас, ТП мають підвищену чутливість до перевантажень, а пульсуючий характер випрямленого струму збільшує втрати в двигуні і зменшує його комутаційну здатність.

У системі стабілізації швидкості використовують нереверсивний тиристорний перетворювач. Вибір номінальної напруги  $U_{\text{ТПН}}$  і струму  $I_{\text{ТПН}}$  перетворювача робиться по номінальних значеннях напруги  $U_{\text{дн}}$  і струму  $I_{\text{ян}}$  двигуна. Технічні дані ТП приведені в [3].

У записі пояснення необхідно привести функціональну схему ТП і охарактеризувати призначення її основних елементів.

За динамічними властивостями перетворювач тиристора може бути представлений безінерційною ланкою з передавальною функцією

$$W_{\text{ТП}}(p) = k_{\text{ТП}}, \quad (3.1)$$

де  $k_{\text{ТП}} = U_{\text{ТПН}}/U_y$  – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача.

Оскільки напруга управління  $U_y$  на вході перетворювача тиристора змінюється в межах від 0 В до 15 В, маємо

$$k_{\text{ТП}} = U_{\text{ТПН}}/15. \quad (3.2)$$

### 3.2 Згладжуючий реактор

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 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  $L_{\delta}$ , значення якої визначається за формулою:

$$L_{\delta} = \frac{U_{dm} 100}{\omega p \% I_{mnn}}, \quad (3.3)$$

де  $U_{dm}$  – амплітудне значення першої гармоніки випрямленої напруги;

$$U_{dm} = 0,2 U_{mnn};$$

$\omega$  – кругова частота мережі;

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

$I_{mnn}$  – номінальний випрямлений струм перетворювача.

Знаючи величину  $L_{\delta}$ , можна визначити величину індуктивності додаткового реактора LR:

$$L_{др} = L_{\delta} - L_{я}, \quad (3.4)$$

де  $L_{я}$  – індуктивність якоря двигуна:

$$L_{я} = \kappa \frac{30U_{\delta n}}{\pi I_{\delta n} n_p} \quad (3.5)$$

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

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

$U_{\delta n}$ ,  $I_{\delta n}$ ,  $n_p$  – номінальна напруга, струм і швидкість двигуна;

$p$  – кількість пар полюсів двигуна.

### 3.3 Датчик швидкості

Як датчик швидкості застосовується тахогенератор постійного струму типу ТД-102. Його вибір слід здійснювати по номінальній швидкості обертання двигуна. Технічні дані тахогенераторів приведені в [3].

Передавальна функція датчика швидкості може бути представлена безінерційною ланкою

$$W_{дс}(p) = k_{дс} \quad (3.6)$$

Статичні характеристики датчиків швидкості лінійні і однозначні. Тому величина коефіцієнта передачі тахогенератора  $k_{дс}$  визначається як відношення номінальної напруги тахогенератора  $U_{дсн}$  до номінальної швидкості  $\omega_{дсн}$

$$k_{дсн} = \frac{U_{дсн}}{\omega_{дсн}} \quad (3.7)$$

### 3.4 Об'єкт управління

Динамічні характеристики електроприводу з двигуном постійного струму незалежного збудження представлені елементарною ланкою другого порядку з передавальною функцією [4]

$$W_{\delta}(p) = \frac{k_{\delta}}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1}, \quad (3.8)$$

де  $k_{\delta} = 1/k\Phi_n$  – передавальний коефіцієнт двигуна;

$T_m = JR_{яц}/(k\Phi_n)^2$  – електромеханічна постійна часу;

$T_{я} = L_{\delta}/R_{яц}$  – електромагнітна постійна часу.

Величина  $k_{\delta}$  може бути визначена за допомогою вираження

$$k\Phi_n = (U_{\delta n} - I_{\delta n} R_{яц})/\omega_n, \quad (3.9)$$

де  $R_{яц} = R_{я} + R_{ко} + R_{\delta n}$  – активний опір якірного кола двигуна при температурі двигуна  $75^{\circ}\text{C}$ , включаючий опір обмотки якоря  $R_{я}$ , компенсаційної обмотки  $R_{ко}$  і додаткових полюсів  $R_{\delta n}$ .

Якщо величини  $R_{я}$ ,  $R_{ко}$  і  $R_{он}$  приведені в каталозі для температури  $25^{\circ}\text{C}$ , то перерахунок здійснюється за формулою

$$R_{яц} = 1,2(R_{я} + R_{ко} + R_{он}). \quad (3.10)$$

При розрахунку  $T_m$  величина приведеного моменту інерції  $J$  визначається за формулою

$$J = \kappa_n \cdot J_{\partial}, \quad (3.11)$$

де  $J_{\partial}$  – момент інерції двигуна;

$\kappa_n = 1,2 - 1,5$  – коефіцієнт, що враховує момент інерції передач, сполучних муфт і гальмівних шківів приводу.

Величина  $L_{\partial}$  при розрахунку  $T_{я}$  визначається по формулі (3.3).

У записці пояснення необхідно визначити коріння  $p_1$ ,  $p_2$  характеристичного рівняння  $T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1 = 0$  і представити  $W_{\partial}(p)$  виразом двох аперіодичних ланок із загальним коефіцієнтом передачі  $\kappa_{\partial}$  і постійними часу  $T_{1\phi} = 1/p_1$ ,  $T_{2\phi} = 1/p_2$  або передавальною функцією коливальної ланки

$$W_{\partial}(p) = \frac{\kappa_{\partial}}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1}, \quad (3.12)$$

де  $T_1 = \sqrt{T_{я} T_m}$  – постійна часу коливальної ланки;

$\xi = \frac{T_m}{2\sqrt{T_{я} T_m}}$  – коефіцієнт демпфування.

### 3.5 Регулятор швидкості

Основним показником роботи системи стабілізації швидкості в сталому режимі служить точність підтримки постійності заданого значення швидкості при дії на систему різних обурень і, в першу чергу, при зміні моменту навантаження  $M_c$ .

Кількісно точність системи визначається величиною статизма  $S_{xz}$  механічної характеристики системи при зміні  $M_c$  в заданих межах

$$S_{xz} = \frac{(\omega_0 - \omega_{c3})}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_{c3}}{\omega_0} \quad (3.13)$$

де  $\omega_0$  – швидкість ідеального холостого ходу;

$\omega_{c3}$  – статична швидкість в замкнутій системі.

У [4] показано, що при замиканні системи головним негативним зворотним зв'язком за швидкістю статизм статичної характеристики зменшується в порівнянні з розімкненою системою в  $1 + \kappa$  раз, де  $\kappa = K_{pc}K_{mn}K_{\delta}K_{\delta c}$  – коефіцієнт посилення розімкненої системи.

Необхідний коефіцієнт посилення  $\kappa = \kappa_{трєб}$ , що забезпечує при заданому діапазоні регулювання швидкості  $D$  необхідну величину статизма  $S_{xz}$  визначається по вираженню

$$\kappa_{трєб} = \frac{S_{xp}}{S_{xz}} D - 1, \quad (3.14)$$

де  $S_{xp} = \frac{\Delta\omega_p}{\omega_{0max}}$  – статизм швидкісної характеристики в розімкненій системі;

$\Delta\omega_p = I_{\delta n} R_{яц} \kappa_{\delta}$  – статичне падіння швидкості в розімкненій системі.

$$\omega_{0max} = U_{\delta n} \kappa_{\delta}. \quad (3.15)$$

Отже, визначивши відповідно до (3.14) величину  $\kappa_{трєб}$ , можна визначити величину коефіцієнта передачі регулювальника швидкості:

$$K_{pc} = \frac{\kappa_{трєб}}{K_{mn} K_{\delta} K_{\delta c}}. \quad (3.16)$$



### 3.6 Коригуючий пристрій

У цьому розділі курсової роботи необхідно здійснити синтез послідовного коригуючого пристрою, тобто за наявною структурною схемою системи визначити передавальну функцію, вибрати принципову схему і розрахувати параметри КУ, включення якого в систему забезпечить отримання приведених в завданні показників якості: величину перерегулювання  $\sigma$  і час регулювання  $t_n$ .

Структурна схема початкової нескоректованої системи приведена на рисунку 3.1 Вона складена за функціональною схемою, зображеною на рисунку 2.1.

Кожному елементу функціональної схеми поставлена у відповідність передавальна функція одного або декількох певним чином включених елементарних динамічних ланок. Об'єкт управління представлений виразом двох аперіодичних ланок.

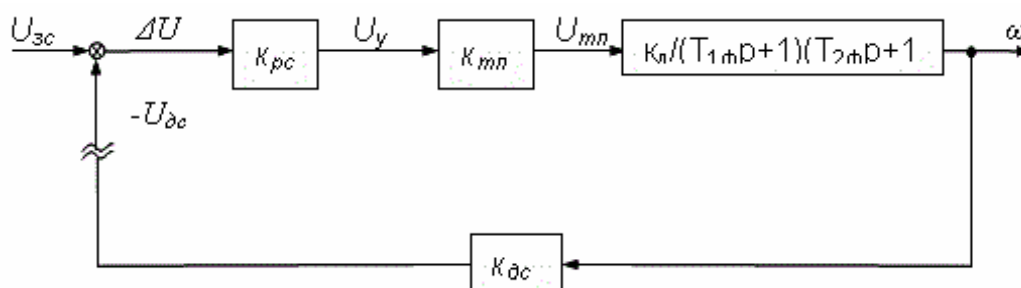


Рисунок 3.1 – Структурна схема початкової нескоректованої системи

Синтез КУ здійснюється за допомогою методу логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАХ). Ідея методу заснована на тому, що за заданими показниками якості системи можна побудувати бажану логарифмічну амплітудно-частотну характеристику  $L_{ж}(\omega)$ , тобто ЛАХ такої системи, яка забезпечує задані показники якості. При цьому ЛАХ коригуючого пристрою  $L_{к}(\omega)$ , може бути отримана в результаті віднімання з ординат бажаної ЛАХ початкової системи  $L_{исх}(\omega)$ :

$$L_{к}(\omega) = L_{ж}(\omega) - L_{исх}(\omega). \quad (3.17)$$

Загальний порядок синтезу КУ викладений в [1].

При побудові ЛАХ використовуються напівлогарифмічна сітка: по осі абсцис відкладається не сама частота  $\omega$ , а її десятиковий логарифм. Тому одиниця приросту  $\lg\omega$  відповідає десятиразовому збільшенню частоти  $\omega$ , тобто одній декаді.

Побудову ЛАХ початкової системи потрібно починати з отримання передавальної функції розімкненої системи.

Розглянемо побудову  $L_{уцх}(\omega)$  для випадку, коли передавальна функція двигуна може бути представлена у вигляді передавальних функцій двох аперіодичних ланок із загальним коефіцієнтом передачі  $K_{\partial}$  і постійними часу  $T_{1\phi}$  та  $T_{2\phi}$ . Тоді передавальна функція розімкненої системи матиме вигляд (див. рис. 3.1)

$$W_{раз}(p) = \frac{K_{pc}K_{mn}K_{\partial}K_{\partial c}}{(T_{1\phi}p + 1)(T_{2\phi}p + 1)}. \quad (3.18)$$

Припустимо, що  $T_{1\phi} < T_{2\phi}$ . Визначаємо значення сполучаємось:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_{2\phi}}, \quad (3.19)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_{1\phi}}. \quad (3.20)$$

З набутих значень відкладаємо на осі абсцис, і проводимо через точки  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  вертикальних ліній (рис. 3.2). На осі ординат відкладаємо значення  $20\lg k_{треб}$  і з цієї точки проводимо ЛАХ паралельно осі абсцис до першої сполученої частоти  $\omega_1$ . Починаючи зі значення  $\omega_1$  і далі починає позначатися високочастотна асимптота аперіодичної ланки з постійною часу  $T_{2\phi}$ . Тому нахил ЛАХ на ділянці від  $\omega_1$  до  $\omega_2$  рівний  $-20$  дБ/дек. Починаючи з частоти  $\omega_2$  нахил зростає ще на  $-20$  дБ/дек, оскільки починає позначатися високочастотна асимптота аперіодичної ланки з постійною часу  $T_{1\phi}$ . Якщо передавальна

функція двигуна представлена коливальною ланкою, то побудова  $L_{усх}(\omega)$  здійснюється аналогічно. Відмінність полягає лише в тому, що при частоті сполучення коливальної ланки  $\omega_k = 1/T_l$  нахил збільшується відразу на  $-40$  дБ/дек.

Бажана ЛАХ складається з трьох основних ділянок. Низькочастотну ділянку  $L_{жс}(\omega)$  вибирають, виходячи з вимог до точності регулювання в сталому режимі. У статичних систем нахил низькочастотної ділянки  $L_{жс}(\omega)$  рівний  $0$  дБ/дек. Система, що розробляється, відноситься до статичних, тому низькочастотна ділянка  $L_{жс}(\omega)$  співпадає з  $L_{усх}(\omega)$ .

Високочастотна частина  $L_{жс}(\omega)$ , розташована на частотах  $\omega > (5 - 10)\omega_c$ , де  $\omega_c$  – частота зрізу системи, не чинить істотного впливу на якість перехідного процесу. Тому її приймають співпадаючою з  $L_{усх}(\omega)$ .

Средньочастотна ділянка  $L_{жс}(\omega)$  є найбільш суттєвою, оскільки вона та, визначає стійкість і показники якості перехідного процесу. Її побудова виконується відповідно до заданих величин перерегулювання  $\sigma$  і часом регулювання  $t_p$ .

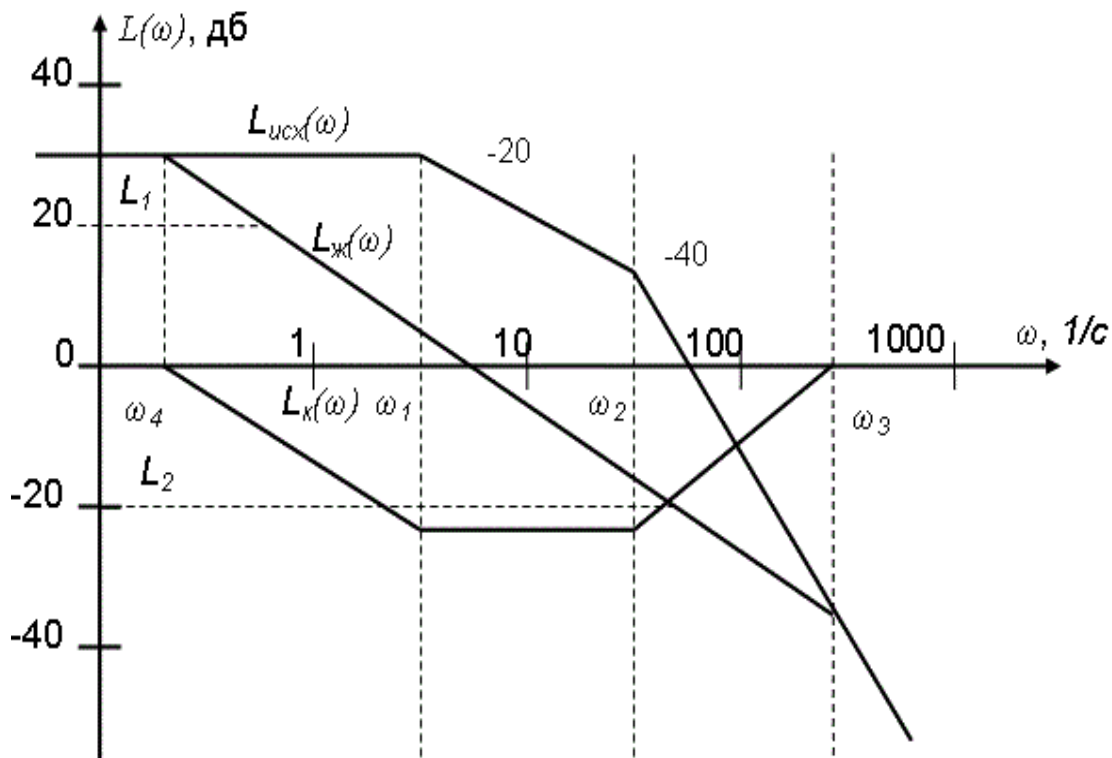


Рисунок 3.2 – Синтез послідовного коригувального пристрою

За кривою  $\sigma_{max} = f(P_{max})$ , наведеної на рисунку 3.3, для заданого значення  $\sigma$  визначаємо величину  $P_{max}$ . Потім по знайденому значенню  $P_{max}$  за допомогою кривої  $t_n \text{ макс} = \psi(P_{max})$  визначаємо величину  $t_n \text{ макс} = k\pi/\omega_n$ , і, знаючи задане значення  $t_n$ , знаходимо частоту позитивності:

$$\omega_n = \frac{k\pi}{t_n} \quad (3.21)$$

Далі визначаємо частоту зрізу системи  $\omega_c = (0,6 \div 0,9) \omega_n$ .

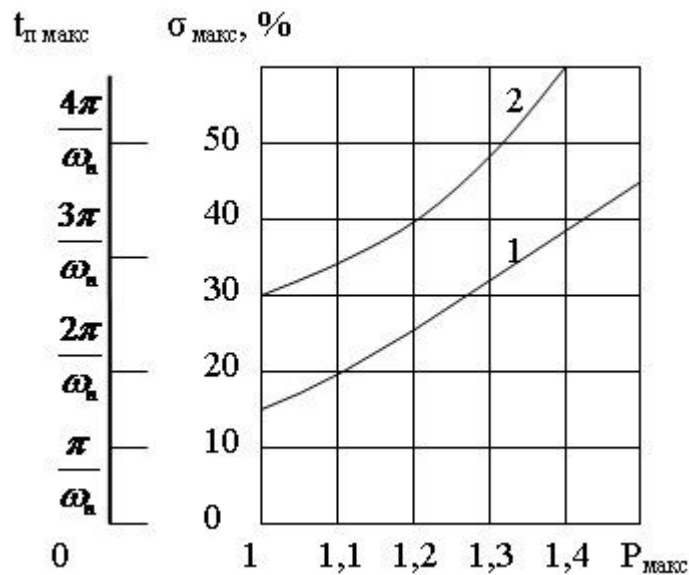


Рисунок 3.3 – Криві визначення заданого значення  $\sigma_{max}$  та  $P_{max}$ :

1 – залежність  $\sigma_{max} = f(P_{max})$ ; 2 – залежність  $t_n \text{ макс} = \psi(P_{max})$

На осі абсцис (див. рис. 3.2) крізь крапку, відповідну частоті  $\omega_c$ , проводимо пряму з нахилом  $-20$  дБ/дек. За кривої  $L = f(\sigma_{max})$ , наведеної на рисунку 3.4, визначаємо запас стійкості по амплітуді  $L_1$  для позитивних значень  $L_{жс}(\omega)$ .

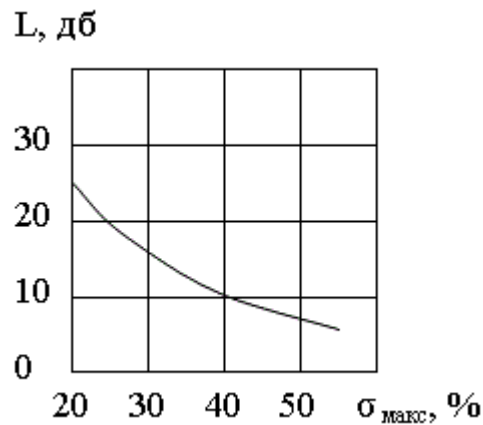


Рисунок 3.4 – Крива визначення запасу стійкості по амплітуді  $L = f(\sigma_{\max})$

Аналогічна величина  $L_2$  для негативних значень  $L_{жс}(\omega)$  дорівнює  $L_1$ . Значення  $L_1$  і  $L_2$  відкладаємо на осі ординат, і на рівні цих значень паралельно осі абсцис проводимо лінії до точок їх перетину з прямою, проведеної крізь  $\omega_c$ . Ділянка цієї прямої, що лежить між точками перетину, і буде середньочастотною ділянкою  $L_{жс}(\omega)$ .

Сполучення середньочастотної ділянки  $L_{жс}(\omega)$  з низько – та високочастотними ділянками  $L_{исх}(\omega)$  бажано проводити одним відрізком і прагнути до того, щоб різниця нахилів  $L_{исх}(\omega)$  і  $L_{жс}(\omega)$  не перевищувала 20 дБ/дек. У цьому разі коригувальна ланка буде найбільш проста.

Як зазначалося раніше, ЛАХ коригуючого пристрою  $L_{к}(\omega)$  виходить в результаті вирахування з ординат  $L_{жс}(\omega)$  ординати  $L_{исх}(\omega)$ . По виду  $L_{к}(\omega)$ , користуючись наведеними в [1] даними, визначаємо принципову схему КУ, його передавальну функцію. Визначивши частоти сполучення  $L_{к}(\omega)$ , знаходимо величини постійних часу передавальної функції, а потім розраховуємо параметри елементів принципової схеми КУ.

## 4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ

Показники якості системи можуть бути визначені по її перехідній характеристиці  $h(t)$ , яка являє собою реакцію системи на одиничну поетапну зміну сигналу на вході.

Найбільш раціональним методом знаходження  $h(t)$  є використання комп'ютерного моделювання на основі існуючих прикладних пакетів, які дозволяють здійснювати чисельне моделювання систем і процесів управління в них на досить високому рівні з використанням широкого спектра засобів візуального представлення результатів. Найбільш пристосованим для вирішення конкретних інженерних задач в області електромеханіки є пакет MATLAB з широко розвиненими доповненнями (TOOLBOXES), з яких TOOLBOXES SIMULINK найбільш пристосований для аналізу електромеханічних систем [6].

Об'єкт управління, передатна функція якого представлена елементарним динамічним ланкою другого порядку моделює блок (Transfer Fcn1).

Тиристорний перетворювач з передатною функцією безінерційної ланки моделює блок (Gain1).

Коригуючий пристрій моделює кілька послідовно включених блоків (Transfer Fcn), кількість яких залежить від виду передатної функції КУ.

Регулятор швидкості моделює блок (PID) – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, що входить до складу додаткової бібліотеки Simulink Extras. Досліджувана система є статичною, так як статизм механічних характеристик в ній  $S_{xz} > 0$ . Тому використовується тільки пропорційна частина регулятора. Коефіцієнти передачі інтегральної та диференціальної частин у вікні настройки PID-регулятора приймаються рівними нулю.

Зворотний зв'язок по швидкості моделює блок (Gain2).

Вузол підсумовування на вході регулятора швидкості моделює блок (Sum). Для візуального представлення результатів моделювання використовується блок (Scope).

Необхідно по перехідній характеристиці визначити величини перерегулювання і часу регулювання та порівняти їх із заданими значеннями. Отримані результати проаналізувати й зробити висновки про можливу зміну структури і параметрів регулятора швидкості й коригуючого пристрою.

## 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 для розрахунку системи стабілізування швидкості

№ з/п	Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Варіант					
				1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5					
1	Номінальна потужність двигуна	$P_n$	кВт	1,0	1,5	3,2	4,5	6,0	6,0
2	Номінальна швидкість двигуна	$n_n$	об/хв	750	1 000	1 500	1 500	1 500	1 000
3	Номінальна напруга якоря	$U_{\partial n}$	В	220	220	220	220	220	220
4	Номінальний струм якоря	$I_{\partial n}$	А	6,8	9,3	18,4	25,4	33,2	32,6
5	Сумарний опір обмотки якоря та обмотки додаткових полюсів	$R_{\text{я}} + R_{\partial n}$	Ом	5,35	2,9	1,032	0,78	0,472	0,494
6	Момент інерції якоря двигуна	$J_{\partial}$	кг·м <sup>2</sup>	0,15	0,15	0,15	0,18	0,35	0,56
7	Діапазон регулювання швидкості	$D$	–	15	20	25	30	35	40
8	Статизм замкненої системи	$S_{\text{хз}}$	%	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5
9	Час регулювання	$t_n$	с	0,5	2,0	1,0	1,5	1,5	0,5
10	Перерегулювання	$\sigma$	%	35	25	40	30	25	40

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				7	8	9	10	11	12
1	Номінальна потужність двигуна	$P_n$	кВт	8,0	7,0	10,0	12,5	14,0	19,0
2	Номінальна швидкість двигуна	$n_n$	об/хв	1 000	750	1 000	1 000	750	1 500
3	Номінальна напруга якоря	$U_{\partial n}$	В	220	220	220	220	220	220
4	Номінальний струм якоря	$I_{\partial n}$	А	43,0	42,0	63,0	78,0	79,0	103,0
5	Сумарний опір обмотки якоря та обмотки додаткових полюсів	$R_{\text{я}} + R_{\partial n}$	Ом	0,328	0,546	0,300	0,237	0,244	0,123
6	Момент інерції якоря двигуна	$J_{\partial}$	кг·м <sup>2</sup>	0,65	1,4	1,4	1,6	2,7	1,4
7	Діапазон регулювання швидкості	$\mathcal{D}$	—	45	50	55	60	65	70
8	Статизм замкненої системи	$S_{\text{хз}}$	%	15	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5
9	Час регулювання	$t_n$	с	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	1,0
10	Перерегулювання	$\sigma$	%	35	30	25	40	25	35

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				13	14	15	16	17	18
1	Номинальна потужність двигуна	$P_n$	кВт	25,0	32,0	32,0	32,0	42,0	42,0
2	Номинальна швидкість двигуна	$n_n$	об/хв	1 000	750	1 000	750	1 000	600
3	Номинальна напруга якоря	$U_{\partial n}$	В	220	220	220	220	220	220
4	Номинальний струм якоря	$I_{\partial n}$	А	171	169	219	222	286	223
5	Сумарний опір обмотки якоря та обмотки додаткових полюсів	$R_{\partial} + R_{\partial n}$	Ом	0,07	0,094	0,055	0,049	0,023	0,023
6	Момент інерції якоря двигуна	$J_{\partial}$	кг·м <sup>2</sup>	5,9	7,0	7,0	10,3	10,3	12,0
7	Діапазон регулювання швидкості	$D$	—	85	90	95	100	105	110
8	Статизм замкненої системи	$S_{xz}$	%	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5
9	Час регулювання	$t_n$	с	0,5	2,0	1,0	1,5	1,5	0,5
10	Перерегулювання	$\sigma$	%	35	25	40	30	25	40

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				19	20	21	22	23	24
1	Номинальна потужність двигуна	$P_n$	кВт	55,0	42,0	55,0	75,0	55,0	75,0
2	Номинальна швидкість двигуна	$n_n$	об/хв	1 000	600	750	1 000	600	750
3	Номинальна напруга якоря	$U_{\partial n}$	В	220	220	220	220	220	220
4	Номинальний струм якоря	$I_{\partial n}$	А	286	223	286	335	287	387
5	Сумарний опір обмотки якоря та обмотки додаткових полюсів	$R_{\partial} + R_{\partial n}$	Ом	0,023	0,023	0,031	0,019	0,036	0,023
6	Момент інерції якоря двигуна	$J_{\partial}$	кг·м <sup>2</sup>	10,3	12,0	12,0	12,0	20,4	20,4
7	Діапазон регулювання швидкості	$D$	—	105	110	115	120	125	130
8	Статизм замкненої системи	$S_{xz}$	%	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	1,0
9	Час регулювання	$t_n$	с	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5
10	Перерегулювання	$\sigma$	%	25	40	35	30	25	40

Закінчення таблиці А.1

1	2	3	4	5					
				25	26	27	28	29	30
1	Номінальна потужність двигуна	$P_n$	кВт	70,0	85,0	32,0	42,0	55,0	75,0
2	Номінальна швидкість двигуна	$n_n$	об/хв	600	750	600	1 000	1 500	750
3	Номінальна напруга якоря	$U_{\partial n}$	В	220	220	220	220	220	220
4	Номінальний струм якоря	$I_{\partial n}$	А	361	436	172	218	387	287
5	Сумарний опір обмотки якоря та обмотки додаткових полюсів	$R_{\partial} + R_{\partial n}$	Ом	0,026	0,019	0,074	0,046	0,036	0,023
6	Момент інерції якоря двигуна	$J_{\partial}$	кг·м <sup>2</sup>	23,0	23,0	10,3	3,1	20,4	20,4
7	Діапазон регулювання швидкості	$D$	—	135	140	145	150	140	130
8	Статизм замкненої системи	$S_{xz}$	%	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,5
9	Час регулювання	$t_n$	с	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5
10	Перерегулювання	$\sigma$	%	25	35	30	30	25	35

*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації

до виконання розрахунково-графічної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

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

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2018, поз. 203 М.

---

Підп. до друку 11.11.2019. Формат 60 × 84/16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,7.  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

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

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.