

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни  
“Теорія автоматичного управління технічними системами” для студентів  
спеціальності “Технологія машинобудування” усіх форм навчання /  
Петраков Ю.В.,– К.: КПІ, 2006.-41 с.

Затверджено на засіданні кафедри  
Технології машинобудування  
“ 20 “ жовтня 2006 р.  
Протокол № 6

## *МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ*

ДО РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ З

## ***ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ***

ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ  
“ІНЖЕНЕРНА МЕХАНІКА”

(за подальшою спеціальністю Технологія машинобудування)  
УСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

Укладач: Юрій Володимирович Петраков,  
доктор технічних наук, професор

Методичні вказівки призначені для виконання курсової роботи з  
дисципліни “Автоматичне управління технічними системами”, що  
викладається студентам 4-го курсу спеціальності Технологія  
машинобудування і базуються на використанні CD-ROM та навчально-  
методичного комплексу Галузевої лабораторії віртуальних засобів  
навчання “Автоматичне управління процесами обробки матеріалів  
різнанням”.

## 1. Зміст і обсяг курсової роботи

В ході виконання курсової роботи студент повинен провести аналіз і визначити основні характеристики і показники якості заданої САУ за її математичною моделлю.

Варіант завдання викладач визначає індивідуально кожному студенту. Курсову роботу оформлюють у вигляді розрахунково-пояснювальної записки на аркушах формату А4 з необхідними схемами, таблицями, графіками. Розрахунки за формулами подають в наступній послідовності: вихідна формула  $\Rightarrow$  формула з числовими значеннями заданих змінних  $\Rightarrow$  результат. Всі схеми, графіки і таблиці виконують на стандартних аркушах і супроводжують відповідними підписами, в яких розшифровуються прийняті позначення.

### Порядок виконання розрахунку

1. Побудова функціональної схеми заданої САУ. Визначення вхідних керуючих впливів, вихідних величин (цілі управління) і впливів, що збурюють.
2. Визначення передаточних функцій всіх елементів САУ. Виділення типових динамічних елементів.
3. Визначення виду з'єднання елементів і побудова структурної схеми САУ та її спрощення.
4. Визначення сталості САУ. При необхідності корекція параметрів (коефіцієнтів передачі) або корекція структури з метою досягнення сталості.
5. Побудова структурної схеми скоректованої системи (якщо корекція відбулась).
6. Визначення перехідної характеристики САУ: заданий вхід – вихід.
7. Розрахунок критеріїв якості за перехідною характеристикою. Висновки.

Цей порядок розрахунків повинен бути відображений у змісті курсової роботи.

### Курсова робота повинна містити:

1. Вихідну схему заданої САУ з вихідними даними. Стислий опис

призначення і принципу дії САУ.

2. Функціональну схему з описом функцій кожного елемента.
3. Виведення передаточних функцій всіх елементів САУ. Визначення виду типових динамічних елементів.
4. Структурну схему вихідної САУ. Визначення необхідних передаточних функцій системи.
5. Визначення сталості САУ. Оцінка запасів сталості за амплітудою і за фазою. Корекція параметрів або структури САУ в разі необхідності – структурна схема скоректованої системи.
6. Побудову перехідної характеристики за заданим входом.
7. Аналіз критеріїв якості САУ. Висновки.

## 2. Варіанти завдань

За останньою цифрою двозначного шифру, виданого викладачем, визначається вид САУ, за першою – вихідні дані параметрів системи.

### 0. Система автоматичного управління поперечним супортом токарного верстата з ЧПУ

Токарний верстат з ЧПУ призначений для обробки різноманітних фасонних поверхонь деталей типу тіл обертання. Точність і продуктивність верстатів з ЧПУ значною мірою залежить від точності і швидкодії приводів подачі формоутворюючих рухів. Для підвищення точності обробки застосовують замкнені системи автоматичного управління приводами таких рухів.

Привід (рис. 2.1) складається з високомоментного двигуна 1 постійного струму, зв'язаного муфтою з ходовим гвинтом 2 кулькової гвинтової пари переміщення поперечного супорта 3 верстата. На валу двигуна 1 розміщений вимірювальний прилад 4 кута повороту. Двигун живиться від тиристорного або транзисторного перетворювача 5, що управляється, і складає разом з ним комплектний електропривод. Деталь 6 встановлено в патрон 7 верстата і обточується різцем 8, закріпленим в револьверній головці 9 поперечного супорта 3 верстата.

САУ працює таким чином. Сигнал, що виробляється системою ЧПУ, через цифро-аналоговий перетворювач (на рис. 2.1 не показаний) у вигляді напруги  $U_z$  надходить на вхід порівняльного пристосування ПП. На другий вхід ПП надходить сигнал  $U_o$  вимірювального приладу 4 кута повороту. Напруга  $\delta U$  помилки впливає на перетворювач 5, що управляється, і двигун 1 обертається в напрямку зменшення помилки.

Поперечний супорт 3 разом із різцем 8 переміщається, формуючи на деталі заданий профіль згідно з програмою пристрою ЧПУ.

Таким чином, за вихідну величину заданої системи (ціль управління) необхідно взяти точність формоутворення профілю в процесі різання, що визначається **фактичною** глибиною різання. Тому як об'єкт, що управляється, в систему треба ввести процес різання в замкненій пружній системі верстата.

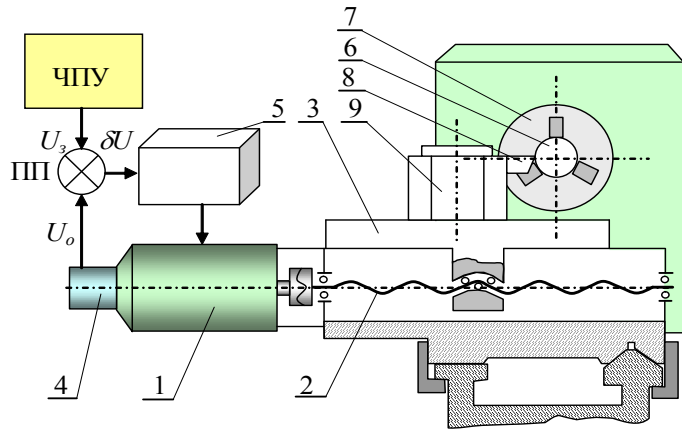


Рис.2.1. САУ приводу поперечного супорта

Таблиця 2.1. Вихідні дані

Пеша аши фра	Параметри елементів САУ						Параметри процесу різання				ВПС			
	Перетворувач		Двигун				Вимір. прилад кута	$T_p, c$	$V_o, м/хв$	$k$	$H_o, мм$	$\omega, рад/с$	$\xi$	$c, 10^6 Н/м$
	$k_{mn}$	$T_{mn}, c$	$k_d, рад/сВ$	$T_y, c$	$T_m, c$	$k_{nk}, В/град$								
0	20	0.03	2.5	0.08	0.30	0.05	0.010	100	1.0	2.0	-	-	10	
1	50	0	4.0	0.05	0.25	0.10	0	110	1.2	2.5	300	0.5	5	
2	100	0.05	1.5	0	0.20	0.06	0	90	1.4	1.5	400	0.7	4	
3	70	0	6.0	0	0.45	0.08	0.005	150	1.1	1.0	200	0.6	1	
4	120	0.02	7.0	0.03	0.15	0.07	0.007	120	1.3	3.0	-	-	2	
5	200	0.01	2.0	0	0.35	0.03	0	220	1.5	3.5	220	0.4	0,9	
6	300	0	3.5	0.10	0.40	0.12	0	170	1.6	2.1	250	0.6	6	
7	250	0	5.5	0	0.55	0.02	0.003	60	1.4	4.0	320	0.8	4	
8	150	0	4.5	0	0.10	0.01	0.008	80	1.1	2.6	370	0.5	3	
9	400	0.04	9.0	0.90	0.65	0.04	0	200	1.2	2.2	-	-	0,8	

**Примітка.**

Для всіх варіантів прийняти:

1. Крок гвинтової пари – 8 мм.
2. Повздовжня (контурна) подача – 0.23 мм/об.
3. Коефіцієнт і показники ступеня у силових залежностях:  $C_p = 3000$ ,  $x_p = 0.9$ ,  $y_p = 0.75$ ,  $n = -0.3$ .

На рис.2.2 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

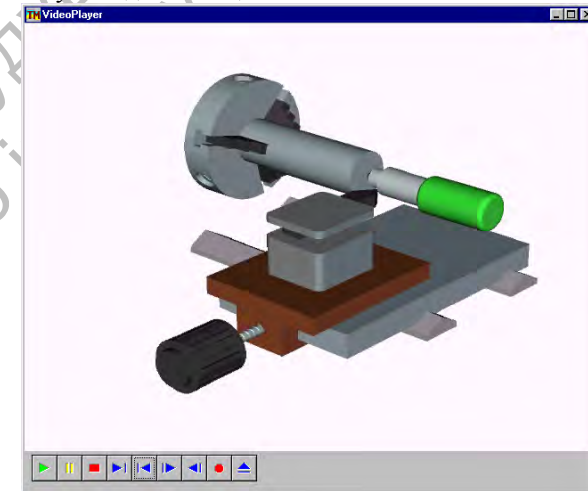


Рис.2.2. Ролик анімації рухів САУ

**1. Система автоматичного управління повздовжньою подачею при точінні**

Ця САУ призначена для стабілізації, або управління силою різання при точінні шляхом регулювання повздовжньої подачі.

На точність обробки при точінні (як і при інших видах обробки) має великий вплив сила різання, зокрема, її радіальна складова  $P_y$ . Внаслідок випадкових коливань припуску, твердості заготовки, затуплення різця та інших факторів сила різання під час точіння не постійна, що призводить до модифікації пружних деформацій технологічної системи верстата і утворення похибки обробки. Значно підвищити точність токарної обробки можна за рахунок стабілізації сили різання.

Крім того, при обробці нежорстких деталей без лонета для усунення похибки, спричиненої пружними деформаціями, необхідно

регулювати силу різання за певним законом залежно від способу закріплення деталі і координати обробки.

Система показана на рис. 2.3. Деталь 1 встановлено в патрон 2 та задній центр 3 токарного верстата, різець 4 закріплено в пристосуванні 5, що виконує функції перетворювача сили різання (наприклад, як таке пристосування можна використовувати тензOMETричний динамометр УДМ-600). Цей перетворювач, через електронний підсилювач 6 підключений до входу порівняльного пристосування 7. Рух подачі супорт 8 отримує через ходовий вал 9, коробку подач 10 від регульованого двигуна постійного струму 11. Для живлення двигуна 11 служить підсилювач-перетворювач 12.

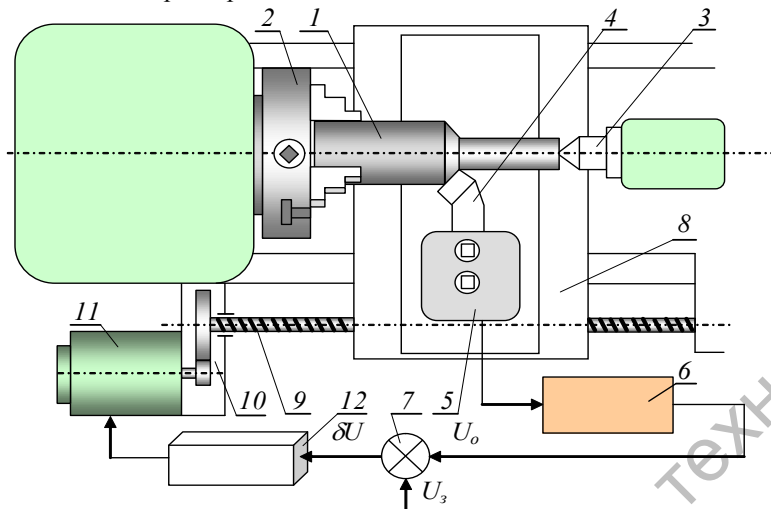


Рис.2.3. САУ повздовжньою подачею при точінні

САУ працює таким чином. На вхід порівняльного пристосування 7 подається сигнал  $U_s$ , який відповідає потрібному значенню сили різання, в певному масштабі. На другий вхід пристосування 7 надходить сигнал  $U_o$ , що виробляється перетворювачем сили різання 5 і підсилювачем 6. Цей сигнал пропорційний реальному значенню сили різання. Помилка  $\delta U = U_s - U_o$  надходить на вхід підсилювача-перетворювача 12, який виробляє напругу живлення двигуна 11, що визначає, нарешті, величину повздовжньої подачі так, щоб звести помилку до мінімуму. Таким чином, САУ шляхом управління подачею, що задає, при точінні здійснює стабілізацію сили різання на заданому рівні. Як об'єкт управління в САУ входить процес різання в замкненій технологічній системі верстата.

Таблиця 2.2. Вихідні дані

№ рш а ци ф р а	Параметри елементів САУ							Параметри процесу різання			ЕПС		
	Перетворювач		Двигун			Вимір. прилад сили	Редуктор	$T_p$ , с	$V_o$ , м/хв	$H_o$ , мм	$\omega_o$ , рад/с	$\xi$	$c$ , $10^5$ Н/м
	$k_{mn}$	$T_{mn}$ , с	$k_d$ , рад/сВ	$T_y$ , с	$T_m$ , с	$k_{пс}$ , В/Н	$k_p$						
0	12	0.03	3.6	0	0.20	0.05	0.05	0	110	1.0	240	0.7	3
1	50	0.02	2.8	0	0.25	0.10	0.07	0	140	1.5	310	0.6	5
2	20	0.05	1.4	0	0.31	0.06	0.06	0	90	0.5	340	0.5	4
3	25	0.01	0.8	0.08	0.43	0.08	0.11	0.005	150	1.2	-	-	1
4	27	0.02	1.0	0.03	0.18	0.07	0.02	0.007	120	2.0	-	-	0,9
5	30	0.03	1.6	0.06	0.13	0.03	0.04	0.002	220	1.6	-	-	2
6	35	0	3.0	0.10	0.24	0.12	0.08	0	170	1.1	250	0.6	0,6
7	15	0.06	4.4	0	0.22	0.02	0.10	0	160	1.4	190	0.8	0,4
8	18	0	4.2	0	0.10	0.01	0.03	0.008	180	2.6	180	0.5	0,3
9	40	0	1.3	0.90	0.06	0.04	0.12	0	90	2.2	120	0.8	0,8

На рис.2.4 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

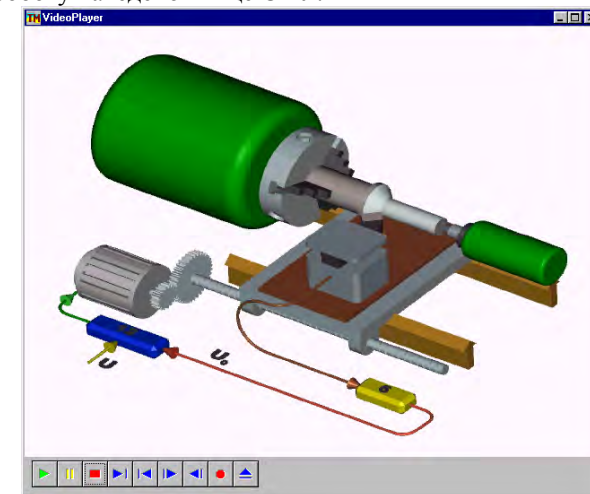


Рис.2.4. Ролик анімації рухів САУ

**Примітка:** Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнт підсилення електронного підсилювача 6 взяти 50, постійною часу знехтувати.

2. Повздовжня подача – 0.17 мм/об.
3. Коефіцієнт і показники ступеня у силових залежностях:  $C_p = 3000$ ,  $x_p = 0.9$ ,  $y_p = 0.65$ ,  $n = -0.1$ .

**Увага!** Парні варіанти (залежно тільки від першої цифри, наведеної в таблиці) – знайти перехідну характеристику за керуючим впливом  $U_3$ , непарні – за збуренням  $H_3$ .

## 2. Система автоматичного управління поперечною подачею при врізному шліфуванні

При врізному шліфуванні необхідно забезпечити управління процесом за рахунок регулювання врізної подачі так, щоб на всіх етапах циклу шліфування фактична швидкість зняття припуску не перевищувала допустимої. На етапі врізання допустима швидкість зняття припуску звичайно обмежується потужністю приводу головного руху, допустимим рівнем вібрацій, розмірною стійкістю шліфувального круга. На заключній стадії циклу допустима швидкість зняття припуску обмежується допустимою глибиною дефектного шару, шорсткістю поверхні деталі, що вимагається, точністю обробки. Отже, для реалізації оптимального циклу врізного шліфування необхідно управляти врізною подачею за певним законом. Для цього сучасні шліфувальні верстати оснащуються пристосуваннями ЧПУ з системою автоматичного управління поперечною (врізною) подачею.

САУ (рис. 2.5) складається з двигуна 1 постійного струму, що кінематично зв'язаний через редуктор 2 з ходовим гвинтом 3 шліфувальної бабки 4. Для вимірювання фактичної швидкості зняття припуску використовується прилад активного контролю безперервної дії, наприклад, індуктивний вимірювальний прилад 5, підключений до диференціюючого підсилювача 6. Живлення двигуна 1 здійснюється підсилювачем-перетворювачем 7 (комплектний електропривод, що управляється). Деталь 8 встановлюється в центрах шліфувального верстата і приводиться в обертання від приводу передньої бабки 9.

САУ працює таким чином. З пристрою ЧПУ врізної подачі шліфувального верстата через цифро-аналоговий перетворювач (на рис. 7.3 не показаний) напруга  $U_3$ , яка відповідає в певному масштабі значенню потрібної швидкості зняття припуску, надходить на порівняльне пристосування ПП. Відзначимо, що при постійній ширині шліфування швидкість зняття припуску пропорційна врізній подачі. На другий вхід ПП надходить сигнал від диференціюючого підсилювача 6 у вигляді напруги  $U_0$ , пропорційної фактичній швидкості зняття припуску. Це забезпечується тим, що, сигнал від індуктивного вимірювального приладу 5, пропорційний фактичній глибині різання, при його диференціюванні

відповідає фактичній швидкості зняття припуску. Далі сигнал помилки  $\delta U$  через вхід підсилювача-перетворювача 7, що управляється, впливає на двигун 1. В результаті двигун 1 передає шліфувальній бабці 4 врізну подачу, що забезпечує швидкість зняття припуску, яка вимагається певним алгоритмом управління.

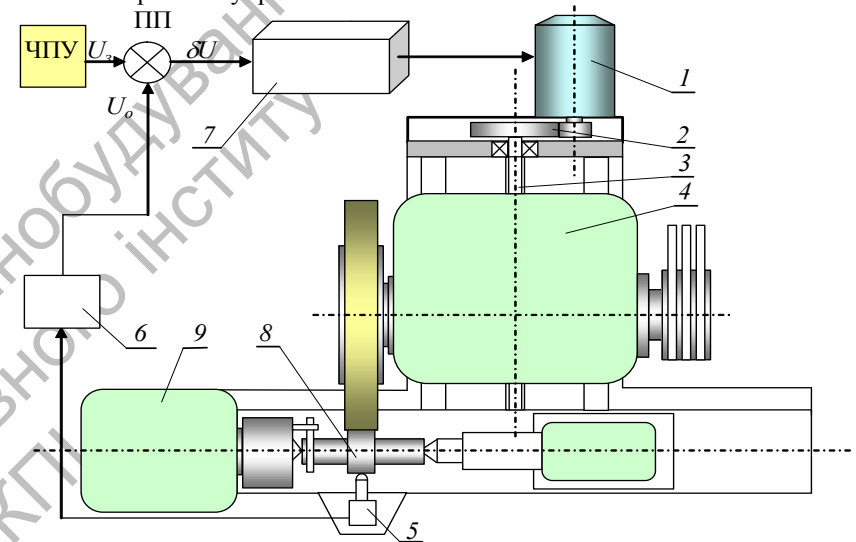


Рис.2.5. САУ врізною подачею на круглошліфувальному верстаті

Врізна подача  $V_e$  перетворюється на фактичну швидкість зняття припуску  $V_\phi$  в ході реалізації багатопрохідного процесу різання в замкненій технологічній системі верстата. Тут, для математичного опису процесу необхідно використати запізнюючий елемент з часом запізнення, рівним часу одного оберту деталі. Проте, доведено, що з великим ступенем наближення цей процес спрощено можна описати передаточною функцією, що відповідає аперіодичному елементу 1-го порядку:

$$\frac{V_\phi(s)}{V_e(s)} = \frac{k_u}{T_u s + 1}$$

де  $k_u$  – коефіцієнт передачі;  $T_u$  – постійна часу.

Таким чином, при моделюванні процесу шліфування можна подати його в математичній моделі цим елементом. Але треба зауважити, що в цьому випадку всі високочастотні складові реального процесу будуть загублені.

Таблиця 2.3. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри елементів САУ										Параметр і процесу різання	
	Перетворювач		Двигун			Диф. підсилювач		Вимір. прилад переміщ.	Крок гвинт. Пари	Редуктор		
	$k_{mn}$	$T_{mn}, c$	$k_d, рад/сВ$	$T_{я}, c$	$T_{л}, c$	$k_n$	$T_n, c$	$k_{пт}, В/мм$	$h_{гп}, мм$	$k_p$	$T_{ш}, c$	$k_{ш}$
0	42	0.03	2.6	0	0.20	40	0.02	0.05	4.0	0.05	0.8	0.90
1	20	0.02	1.8	0.05	0.37	70	0	0.10	4.5	0.07	0.5	0.80
2	25	0.05	2.4	0	0.15	90	0.01	0.06	5.0	0.06	1.7	0.70
3	50	0.01	1.0	0	0.24	80	0.03	0.08	5.6	0.11	1.5	0.85
4	37	0.02	3.5	0.03	0.30	20	0	0.07	4.5	0.02	1.2	0.90
5	28	0.03	3.0	0.06	0.18	15	0	0.03	5.0	0.04	0.6	0.60
6	75	0	2.5	0.10	0.44	35	0.03	0.12	4.2	0.08	1.0	0.55
7	85	0.06	2.0	0	0.32	10	0.04	0.02	5.4	0.10	1.4	0.70
8	90	0	3.2	0.08	0.21	25	0.01	0.01	6.0	0.03	0.7	0.85
9	95	0.04	2.3	0.90	0.16	50	0	0.04	6.4	0.12	0.9	0.75

На рис.2.6 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

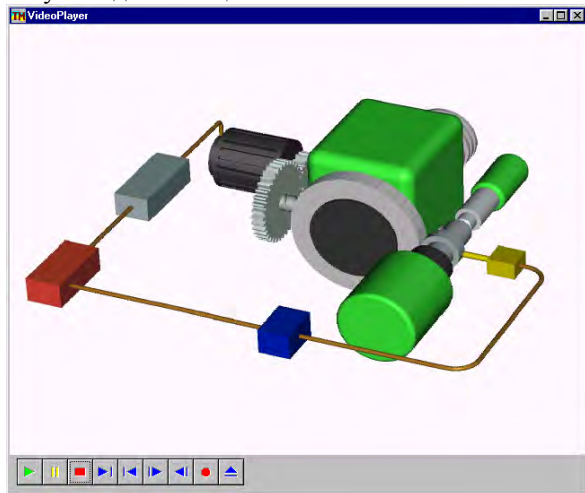


Рис.2.6.Ролик анімації рухів САУ

Система автоматичного управління поворотом робочого органу промислового робота

Промисловий робот є автоматичним пристосуванням, що має принципову універсальність (багатофункціональність) щодо механічних

дій та алгоритмів взаємодії з зовнішнім середовищем, аж до прояву штучного інтелекту.

Робот функціонує без безпосередньої участі людини і залежно від виконуваних функцій, повинен забезпечувати точність, швидкість і оперативне перенастроювання, які потрібні гнучкому виробництву. Тому основним видом приводів виконавчих механізмів промислових роботів є замкнені гідравлічні, електромеханічні або електрогідравлічні системи.

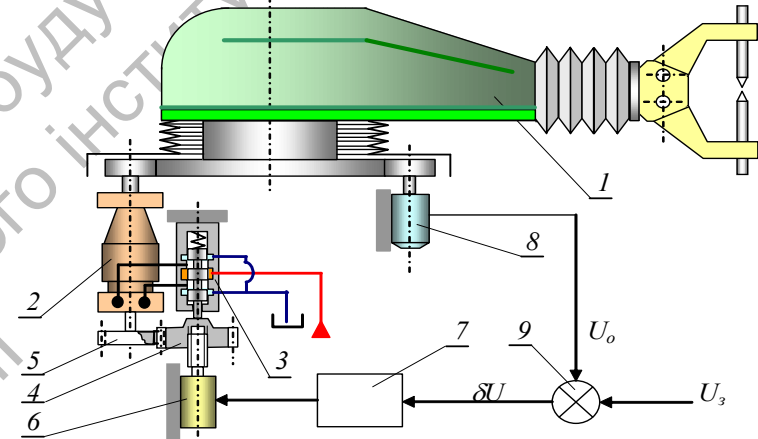


Рис.2.7. САУ поворотом робочого органу робота

САУ (рис. 2.7) поворотом робочого органу 1 робота (наприклад, зварювального робота) складається з гідравлічного двигуна 2, гідравлічного підсилювача 3 і електричної частини. Функції гідравлічного підсилювача 3 виконує чотирикрайковий золотник, з плунжером якого взаємодіє шестірня 4, що зачіплюється з шестірнею 5 гідравлічного двигуна 2. Електродвигун 6, що управляється, виконує функції пристосування, що задає і живиться від підсилювача 7. Його вал зв'язаний з гвинтом, що складають з шестірнею 4 гвинтову пару. До САУ входить також перетворювач (вимірювальний прилад) кута 8 і порівняльне пристосування 9.

При роботі САУ на вхід пристосування 9, що порівнює, надходить сигнал у вигляді напруги  $U_s$ , що виробляється пристосуванням управління за командою від ЕОМ. Порівняльне пристосування 9 виробляє сигнал помилки  $\delta U = U_s - U_o$ , де  $U_o$  – напруга перетворювача кута 8, пропорційна фактичному куту повороту робочого органу 1. Сигнал

помилки через підсилювач 7 викликає обертання двигуна 6. У вихідному стані гідравлічний підсилювач 3 знаходиться в нейтральному положенні і гідравлічний двигун 2 не обертається.

Поворот вихідного вала двигуна 6 спричинює зміщення шестірні 4 у вертикальному напрямку, оскільки вона зв'язана з шестірнею 5, що в цей момент часу нерухома. Шестірня 4 переміщує плунжер золотника 3 з нейтрального положення. Гідравлічний двигун 2 починає обертатися, повертаючи робочий орган 1, шестірню 5 і вал перетворювача кута 8. Поворот шестірні 5 викликає обертання шестірні 4 і переміщення її разом з підпружиненим плунжером золотника 3 по гвинту двигуна 6 в бік відновлення рівноваги. Так діє місцевий зворотний зв'язок, організований зчепленням зубчастих коліс 5 і 4.

Крім того, поворот перетворювача 8 викликає модифікацію напруги  $U_o$  так, що помилка з виходу порівняльного пристосування зменшується. Так функціонує головний зворотний зв'язок всієї системи. В результаті робочий орган 1 буде повертатися доти, доки не займе наріжне положення, згідно до сигналу, що задає.

Таблиця 2.4. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри елементів САУ											
	Підсилювач	Двигун			Гідро-підсилювач		Гідродвигун		Вимір. прилад кута	Крок гвинт пари	Шестірні	
	$k_n$	$k_d$ , рад/сВ	$T_d$ , с	$k_z$ , мм <sup>2</sup> /с	$T_z$ , с	$k_{zd}$ , об/мм <sup>3</sup>	$T_{zd}$ , с	$k_{nk}$ , В/рад	$h_{zn}$ , мм	$Z_5$	$Z_4$	
0	20	2.2	0.020	9E6	0.02	2E-5	0.050	2.5	2.0	60	20	
1	30	4.0	0.030	8E6	0.01	1E-5	0.065	1.2	2.5	30	60	
2	100	3.6	0.015	1E6	0.01	9E-5	0.105	3.4	3.0	40	40	
3	50	1.2	0.045	2E6	0.03	8E-6	0.085	5.6	3.5	20	60	
4	200	2.5	0.030	3E6	0.04	5E-6	0.090	7.5	1.5	50	30	
5	40	2.0	0.018	5E6	0.05	3E-6	0.110	1.0	2.0	60	20	
6	120	3.5	0.040	1E7	0.03	5E-5	0.040	2.5	2.2	70	10	
7	180	1.2	0.035	4E6	0.04	7E-5	0.035	3.5	3.4	20	60	
8	290	0.8	0.025	6E6	0.01	6E-5	0.025	6.4	4.0	40	40	
9	95	0.6	0.010	7E6	0.02	4E-6	0.070	3.0	4.4	30	50	

**Примітка.**

Для всіх варіантів взяти коефіцієнт передачі редуктора від гідравлічного двигуна до робочого органу 0.25, від робочого органу до вимірювального приладу кута 4.

На рис.2.8 представлений вигляд анімаційного ролика, що пояснює роботу наведеної вище САУ.

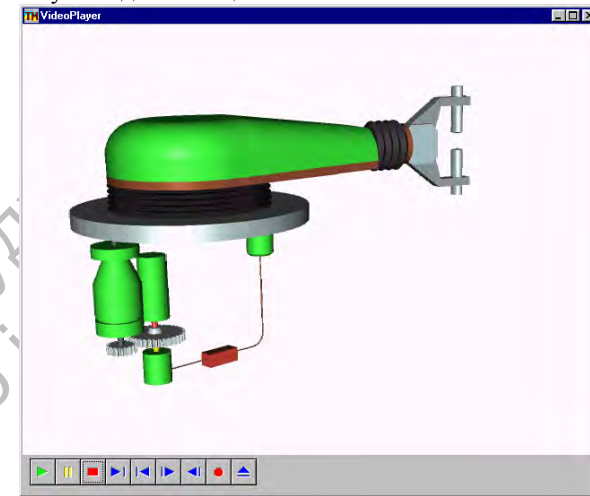


Рис.2.8. Ролик анімації рухів САУ

**4. Система автоматичного регулювання розміру виробу, що шліфується, на безцентрово-шліфувальному верстаті**

Безцентрово-шліфувальний верстат (рис. 2.9) складається зі шліфувальної бабки зі шліфувальним кругом 1, рухомої бабки 2 з ведучим кругом 3, приводу подачі, що складається з електродвигуна 4, редуктора 5 і гвинтової пари 6. Деталь 7 в зоні обробки базується на похилій поверхні ножа 8 та поверхні ведучого круга 3 і за рахунок нахилу осі останнього їй передається повздовжній рух подачі (перпендикулярно до площини рисунку).

Таким чином, діаметр виробу 7, що шліфується, визначається відстанню між ведучим кругом 3 і шліфувальним кругом 1 на рівні, що визначається ножем 8. Ця відстань в процесі роботи верстата може змінюватися, як в результаті модифікації сили різання чи зносу абразивних кругів, так і під впливом інших факторів. Розглядувана САУ призначена для автоматичного регулювання (стабілізації) розміру оброблюваної деталі.

САУ складається з перетворювача переміщення 9 (наприклад, індуктивного вимірювального приладу переміщення, оснащеного накінцівником з твердого сплаву або алмазу), підсилювача 10, порівняльного пристосування 11 і підсилювача-перетворювача 12. Підсилювач-перетворювач 12 (наприклад, тиристорний або

транзисторний) призначений для живлення двигуна постійного струму 4 і складає разом з останнім регульований комплектний електропривод.

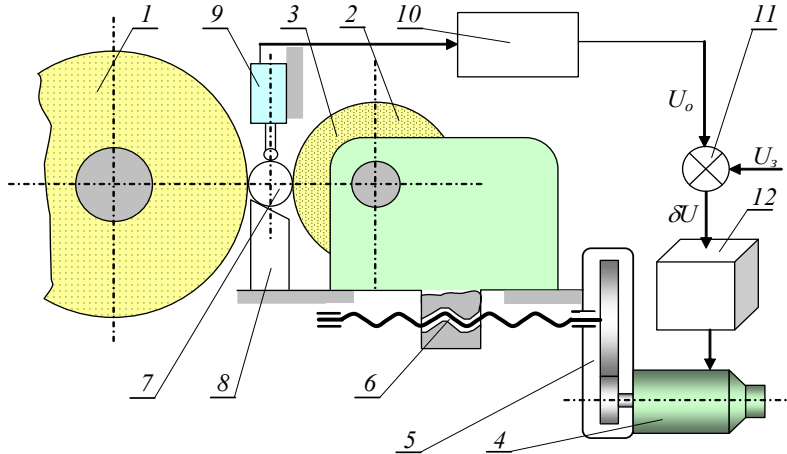


Рис.2.9. САУ розміру деталі, що шліфується на безцентрово-шліфувальній верстаті

При роботі системи на вхід порівняльного пристосування 11 подається напруга  $U_s$ , яка відповідає в певному масштабі потрібному розміру деталі 7. На другий вхід пристосування 11 надходить напруга  $U_o$ , пропорційна дійсному розміру деталі 7. Ця напруга виробляється вимірвальним приладом переміщення 9 і підсилювачем 10. Напруга помилки  $\delta U$  через підсилювач-перетворювач 12 впливає на двигун 4, що управляється, який через редуктор 5 і гвинт 6 переміщує рухома бабку 2 в той або інший бік з метою усунення помилки.

Розглянемо функціонування САУ.

Нехай, наприклад, в результаті зношування шліфувального круга або через будь-яку іншу причину діаметр виробу, що шліфується, став перевищувати той, що вимагається. В цьому випадку напруга від перетворювача 9 і вихідна напруга електронного підсилювача 10 зменшуються і порушується умова рівноваги системи, тобто помилка збільшується. Двигун 4 переміщує рухома бабку 2 вперед, в напрямку компенсації зменшення діаметра виробу, що шліфується. Якщо діаметр деталі зменшився, то система автоматично діє у протилежний бік, стабілізуючи потрібний розмір.

Оскільки сигнал зворотного зв'язку надходить з оброблюваної деталі в процесі шліфування, то як об'єкт управління в САУ входить процес різання в замкненій технологічній системі верстата.

Вихідні дані САУ наведені у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри елементів САУ							Параметри процесу різання			ЕПС		
	Перетворювач		Двигун			Вимір. прилад перем.	Редуктор						
	$k_{mn}$	$T_{mn}, c$	$k_{\alpha}, рад/сВ$	$T_{\alpha}, c$	$T_M, c$	$k_{пл}, В/мм$	$k_p$	$T_p, c$	$V_o, м/хв$	$S_o, м/хв$	$\omega_o, рад/с$	$\xi$	$c, Н/м$
0	20	0.03	1.6	0	0.20	5	0.01	0	20	5.0	240	0.7	3E6
1	25	0.02	1.8	0	0.25	10	0.02	0	40	4.5	310	0.6	5E6
2	40	0.05	1.4	0	0.31	16	0.06	0	10	3.5	340	0.5	4E6
3	65	0.01	0.8	0.08	0.43	28	0.02	0.005	25	5.2	-	-	1E7
4	70	0.02	1.0	0.03	0.18	17	0.03	0.007	12	6.0	-	-	9E6
5	10	0.03	1.2	0.06	0.13	30	0.04	0.002	22	7.6	-	-	2E6
6	15	0	2.0	0.10	0.24	100	0.08	0	17	8.1	250	0.6	6E6
7	18	0.06	2.4	0	0.22	20	0.10	0	26	5.4	290	0.8	4E6
8	58	0	2.2	0	0.10	50	0.03	0.008	48	4.6	280	0.5	3E6
9	40	0	0.3	0.90	0.06	40	0.12	0	9	2.2	320	0.8	8E6

Примітка. Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнти і показники ступеня у формулі для розрахунку сили різання:  $C_p=20, x=0.4, y=0.8, z=0.7$ .
2. Задана глибина різання  $H_o=0.005$  мм.
3. Коефіцієнт передачі електронного підсилювача для вимірвального приладу переміщення 100, постійною часу знехтувати.

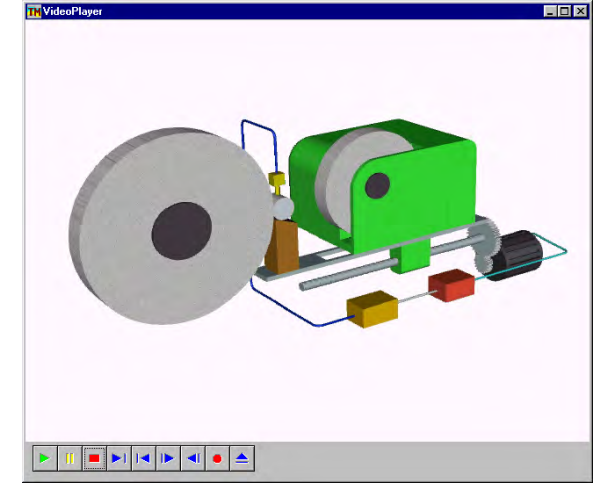


Рис.2.10. Ролик анімації рухів САУ



**Увага!** Парні варіанти (залежно тільки від першої цифри, наведеної в таблиці) – знайти перехідну характеристику за керуючим впливом  $U_3$ , непарні – за збуренням  $H_3$ .

### 5. Система автоматичного дистанційного управління маніпулятором

Для автоматизації операцій завантаження і розвантаження деталей з робочої зони верстата, преса, термічної установки тощо, застосовують автооператори чи маніпулятори, що можуть працювати як в автоматичному режимі, так і в режимі ручного управління. При цьому робочий орган маніпулятора повинен з великою точністю повторювати рухи важеля управління.

Маніпулятор (рис. 2.11) складається з силового циліндра 1 з приладами захоплення 2 деталі 3 і зв'язаний з перетворювачем переміщення 4, яким може бути потенціометр. Для управління переміщенням гідроциліндра 1 використовується двокасадний гідравлічний підсилювач. Перший каскад підсилення містить два сопла 5 і 6 з заслінкою 7 і два дроселі з постійними прохідними перетинами, що включені за диференційною схемою. Заслінка 7 повертається на певний кут електромеханічним перетворювачем 8, що підключений до виходу електронного підсилювача 9, вхідним сигналом якого є різниця потенціалів на бігунках потенціометра 4 зворотного зв'язку і потенціометра 10, що задає, які ввімкнені між собою за мостовою схемою.

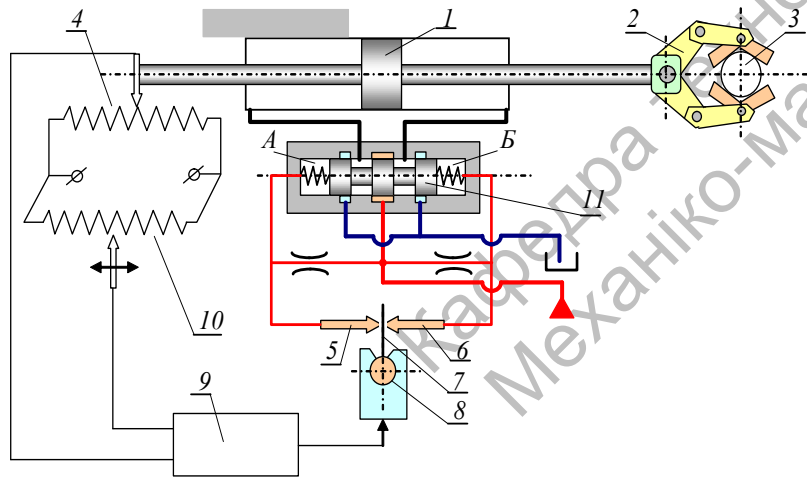


Рис.2.11. САУ дистанційного управління маніпулятором

Другий каскад підсилення виконаний у вигляді гідравлічного підсилювача з чотирикравковим золотником, плунжер 11 якого розміщений в корпусі і знаходиться під впливом пружин в нейтральному стані.

У вихідному стані САУ заслінка 7 розміщена так, що зазори між нею і соплами 5 і 6 однакові, а тиски в камерах А і Б золотника дорівнюють один одному. Тому плунжер 11 також знаходиться в нейтральному стані і робочий циліндр 1 нерухомий.

Розглянемо функціонування системи.

При зміщенні бігунка потенціометра 10, що задає, на вході підсилювача 9 виникає електричний сигнал. Заслінка 7 повертається електромеханічним перетворювачем 8 і тиск у камерах А і Б золотника змінюється, що приводить до переміщення плунжера 11 і відкриття щілин золотника. Силовий циліндр 1 починає рухатися згідно з різницею тисків в його порожнинах і переміщає бігунок потенціометра зворотного зв'язку 4 доти, доки не відновиться рівновага, тобто поки різниця потенціалів між бігунками потенціометрів 4 і 10 не стане менша за поріг чутливості САУ. В цьому випадку сигнал на виході підсилювача 9 близький до нуля, заслінка 7, а отже і плунжер 11 золотника, займають нейтральне положення і рух гідроциліндра 1 припиняється. Так силовий циліндр 1 з деталлю 3 стежить за переміщенням бігунка потенціометра 10, що задає. Вихідні дані САУ наведені у табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри елементів САУ									
	Електронний підсилювач		Електромеханічний перетворювач		Двокасадний гідропідсилювач			Гідроциліндр	Потенціометри	
	$k_n$	$T_n, c$	$k_{em}, мм/В$	$T_{em}, c$	$k_2, мм^2/с$	$\omega, рад/с$	$\xi$	$F_{гц}, см^2$	$k_{зп}, В/мм$	$k_{лзз}, В/мм$
0	200	0.020	2.4	0.060	2E6	280	0.80	100	6	2
1	400	0.030	3.6	0.090	4E6	350	0.85	120	3	6
2	360	0.015	4.5	0.075	8E6	400	0.55	80	4	4
3	120	0.045	1.0	0.045	7E6	500	0.65	140	2	6
4	250	0.030	0.7	0.060	3E6	600	0.70	200	5	3
5	200	0.018	1.2	0.085	1E7	450	0.75	180	6	2
6	85	0.040	0.8	0.045	5E6	550	0.90	250	1	5
7	120	0.035	0.9	0.065	9E5	650	0.45	130	2	6
8	80	0.025	0.5	0.040	6E6	350	0.55	90	4	2
9	60	0.010	1.4	0.050	8E5	200	0.60	160	3	5

На рис.2.12 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

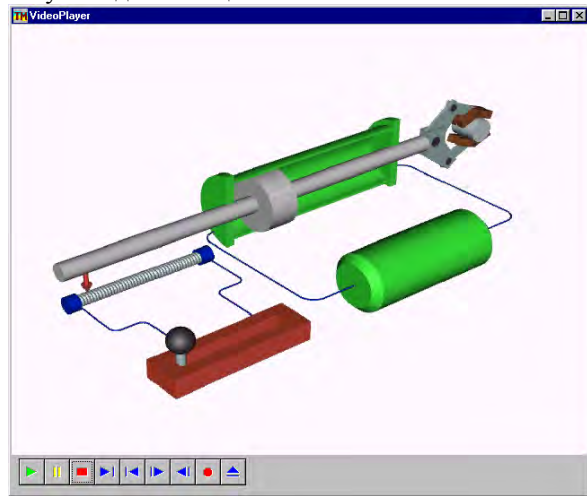


Рис.2.12. Ролик анімації рухів САУ

#### 6. Система автоматичного управління гідравлічним супортом токарного верстата

Гідравлічні копіювальні прилади, що застосовують на токарних верстатах, призначені для автоматизації процесу обробки складних фасонних поверхонь деталей машин, що мають, як правило, круглий поперечний переріз.

Оброблювану деталь 1 (рис. 2.13) встановлено у патрон 2 та задній центр 3 токарного верстата. Різець 4 закріплений у різцетримачі каретки 5, зв'язаної з корпусом циліндра 6, який розташований на напрямних супорта 7. З копіром 8 взаємодіє шуп 9 однокрайкового золотника 10. Порожнини А і Б циліндра 6 з'єднані між собою постійним дроселем 11.

При обробці деталі 1 передається обертання для створення швидкості різання, а супорту 7 – рух повздовжньої подачі. Робоча рідина під тиском підводиться в порожнину А циліндра і через постійний дросель 11 витікає у порожнину Б, звідки через щілину золотника 10 - на злив. Зі схеми видно, що тиск в порожнині Б визначається відкриттям щілини золотника 10 і гідравлічною провідністю постійного дроселя 11.

В нейтральному положенні (при нерухомому гідравлічному супорті) тиски у порожнинах А і Б такі, що підтримується рівновага гідроциліндра:

$$p_A F_A = p_B F_B.$$

При русі шупа 9 по копіру 8 змінюється осьове відкриття золотника 10, а, отже, і тиск у порожнині Б. Гідроциліндр 6 переміщується і переміщає корпус золотника 10. Це переміщення відбувається доти, доки знов не встановиться рівноважний стан. Таким чином, гідроциліндр 6 з різцем 4 стежить за переміщенням шупа, яке, в свою чергу, визначається профілем копира. На заготовці формується потрібна поверхня.

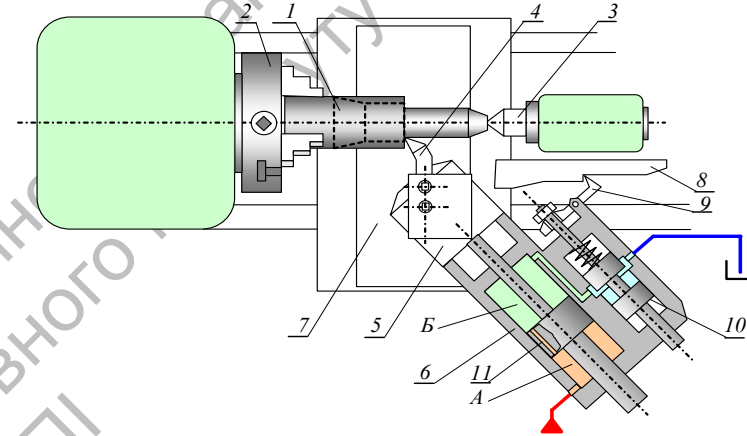


Рис.2.13. Гідравлічний супорт токарного верстата

В САУ гідравлічним супортом як об'єкт, що управляється, входить процес різання в замкненій технологічній системі.

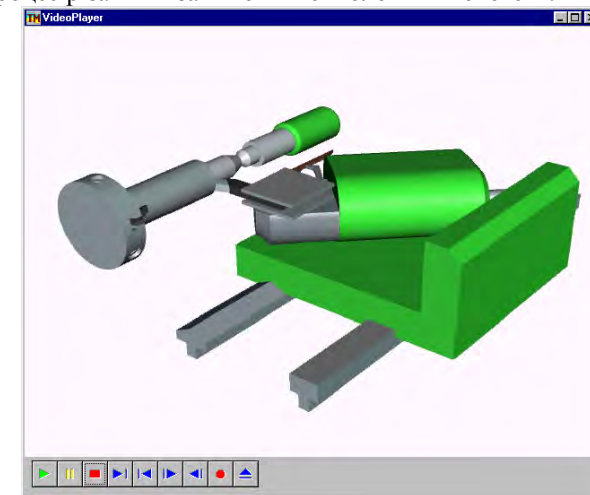


Рис.2.14. Ролик анімації рухів САУ

Вихідні дані представлені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри САУ			Параметри процесу різання					ЕПС		
	Гідропідсилювач		Гідроциліндр	$T_p$ , с	$V_o$ , м/хв	$C_p$	$S_o$ , мм/об	$H_o$ , мм	$\omega_o$ , рад/с	$\xi$	$c$ , Н/м
	$k_z$ , мм <sup>2</sup> /с	$T_z$ , с									
0	1E6	0.03	100	0	70	2000	0.17	2.0	270	0.6	1E6
1	2E6	0	70	0.003	110	3000	0.23	2.5	300	0.5	5E5
2	4E6	0.05	80	0	90	1800	0.43	3.5	400	0.7	4E5
3	6E6	0	90	0.002	150	3600	0.27	4.0	200	0.6	1E6
4	5E6	0.02	110	0	120	2400	0.13	3.0	240	0.9	2E6
5	4E6	0.01	76	0	220	3100	0.17	3.5	220	0.4	9E4
6	7E6	0	86	0.010	170	2700	0.23	2.1	250	0.6	6E5
7	1E6	0	92	0.003	60	1200	0.13	4.0	320	0.8	4E5
8	3E6	0	100	0.008	80	4000	0.27	2.6	370	0.5	3E6
9	7E6	0.04	105	0	200	3800	0.43	4.2	350	0.7	8E5

**Примітка.**

Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнти і показники степеня силової залежності:  $k=1$ ,  $x_p=0.65$ ,  $y_p=0.8$ ,  $n=-0.3$ .

**7. Система автоматичного управління подачею при фрезеруванні**

Точність фрезерування і якість обробленої поверхні (шорсткість, глибина дефектного шару тощо), як правило, визначаються силою різання. Сила різання при фрезеруванні залежить як від режимів обробки, геометрії інструмента, матеріалу заготовки тощо, так і від випадкових факторів: коливання припуску, твердості і т. ін. Отже, при постійних режимах фрезерування не можна забезпечити стабільність найважливішого параметра процесу – сили різання.

Призначенням САУ подачею при фрезеруванні є стабілізація сили різання або модифікація її за заздалегідь заданим законом згідно з сигналом управління за рахунок регулювання подачі. В результаті підвищується точність і якість обробки.

Таким чином, САУ здійснює управління процесом різання, котрий відбувається в технологічній системі верстата, яка складається з деталі 1, інструмента 2, стола 3 (рис. 2.15). Головний рух утворюється

двигуном 4, в ланцюг живлення якого ввімкнений перетворювач струму (струмовий трансформатор) 5. Привід подачі складається з порівняльного пристосування 6, підсилювача-перетворювача 7 комплектного електроприводу, двигуна постійного струму 8 і коробки подач 9.

Момент двигуна 4 головного руху пропорційний моменту різання і визначає струм в ланцюзі живлення від мережі  $\sim 380$  V. Отже, перетворювач струму 5, ввімкнений в ланцюг живлення двигуна 4, виробляє сигнал, пропорційний моменту, а отже і силі різання. Цей сигнал  $U_o$  надходить на вхід порівняльного пристосування 6, де порівнюється з сигналом  $U_z$ , що задає, пропорційним в певному масштабі заданій силі різання.

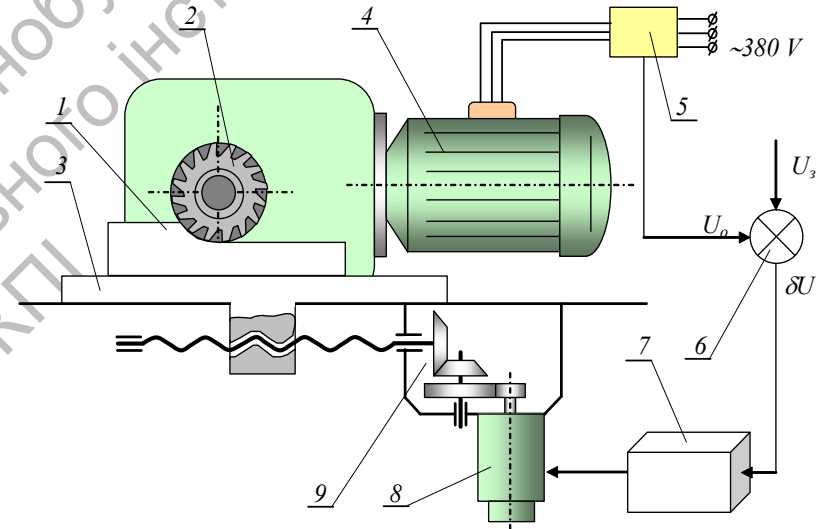


Рис.2.15. САУ фрезерного верстата

Сигнал у вигляді напруги  $\delta U$ , що утворився в результаті порівняння, надходить на вхід підсилювача-перетворювача 7 комплектного електроприводу і викликає модифікацію напруги живлення електродвигуна постійного струму 8, а отже і подачі стола 3. Подача змінюється (збільшується або зменшується) в бік зменшення сигналу помилки. Таким чином САУ стабілізує силу різання на заданому рівні. В САУ як об'єкт, що управляється, входить процес різання в замкненій технологічній системі.

На рис.2.16 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

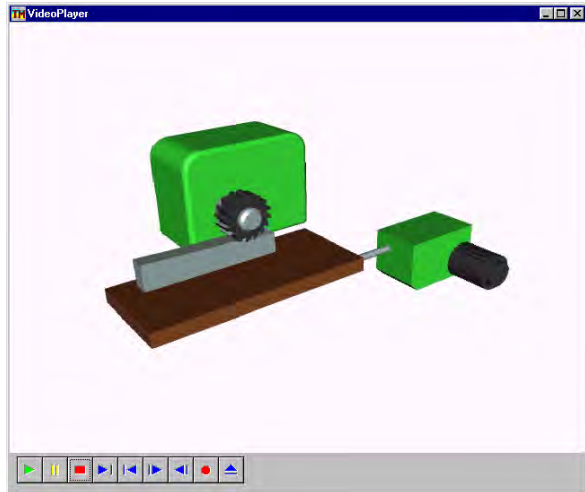


Рис.2.16. Ролик анімації рухів САУ

Вихідні дані представлені у табл.2.8.

Таблиця 2.8. Вихідні дані

Перша цифра	Параметри елементів САУ							Параметри процесу різання			ЕПС		
	Ел. двигун головного руху		Двигун подачі			Підсил. перетворювач		$T_p$ , с	Фреза		$\omega_0$ , рад/с	$\xi$	$e$ , Н/м
	$k_{ed}$ , А/Нм	$T_{ed}$ , с	$k_d$ , рад/сВ	$T_y$ , с	$T_m$ , с	$k_{nn}$	$T_{nn}$ , с		D, мм	Z			
0	0.2	0.03	2.6	0	0.20	45	0	0	100	20	240	0.7	3E6
1	0.5	0	2.8	0	0.25	50	0.01	0	80	16	310	0.6	5E6
2	0.4	0.05	2.4	0	0.31	90	0	0	120	20	340	0.5	4E6
3	0.6	0.06	3.8	0.08	0.43	12	0	0.005	150	24	-	-	1E7
4	0.7	0	3.0	0.03	0.18	24	0.04	0.007	150	20	-	-	9E6
5	1.0	0	3.2	0.06	0.13	35	0.03	0.002	100	24	-	-	2E6
6	1.5	0	4.0	0.10	0.24	95	0.02	0	120	20	250	0.6	6E6
7	0.8	0.16	2.4	0	0.22	30	0	0	80	14	290	0.8	4E6
8	0.5	0.12	4.2	0	0.10	70	0	0.008	90	16	280	0.5	3E6
9	0.4	0.15	5.3	0.90	0.06	80	0	0	100	18	320	0.8	8E6

**Примітка.** Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнт і показник ступеня у залежності для розрахунку сили різання:  $C_p=1000$ ,  $k=0.25$ .

2. Ширина фрезерування  $B=50$  мм.
3. Режими різання для лінеаризації:  $H_o=6$  мм,  $S_{zo}=0.035$  мм/зуб.
4. Коефіцієнт передачі редуктора подачі  $k_{pn}=0.012$ , крок гвинтової пари 6 мм, передатне відношення коробки головного руху  $i=4$ .
5. Коефіцієнт передачі струмового перетворювача  $k_{mn}=0.55$  В/А.

**Увага!** Парні варіанти (залежно тільки від першої цифри, наведеної в таблиці) – знайти перехідну характеристику за керуючим впливом  $U_3$ , непарні – за збуренням  $H_3$ .

### 8. Система автоматичного управління повздовжньою подачею при свердлінні

При свердлінні модифікація умов обробки зумовлена варіаціями фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, затупленням свердла і, особливо, збільшенням поточної глибини свердлування. Тому для оптимального управління режимом обробки верстат необхідно оснастити системою автоматичного управління, наприклад, осьовою подачею за моментом на свердлі.

На свердлувальному шпинделі 1 силової головки встановлений вимірювальний прилад моменту 2, що виробляє сигнал у вигляді напруги, пропорційній діючому моменту на свердлі 3 (рис. 2.17). Двигун 4 постійного струму через редуктор 5 і ходовий гвинт 6 передає головці 7 рух осьової подачі. Для управління двигуном 4 використовується підсилювач-перетворювач 8, що управляється, на вхід якого впливає сигнал, пропорційний похибці:

$$\delta U = U_3 - U_o$$

де  $U_3$  – задана напруга на вході САУ, відповідна потрібному моменту в певному масштабі,  $U_o$  – напруга на виході підсилювача 9, пропорційна діючому моменту різання. Деталь 10 встановлюється в патрон верстата і при свердлуванні їй передається обертання від привідного двигуна (на рисунку 2.17 не показаний).

При розрахунках САУ необхідно враховувати, що управляється об'єкт, яким є процес свердлування і який рекомендується описувати математичною моделлю, виходячи з динамічної моделі, показаної на рис. 7.9. Через динамічні властивості такої моделі фактична подача  $V_\phi$  буде відрізнятися від заданої двигуном  $V_3$  у перехідних режимах роботи.

У динамічній моделі використані наступні позначення:  $m$  – маса,  $c$  – жорсткість,  $\lambda$  – коефіцієнт в'язкого тертя силової головки,  $PC$  – процес свердлування,  $P_o$  – осьова сила різання,  $M$  – момент свердлування.

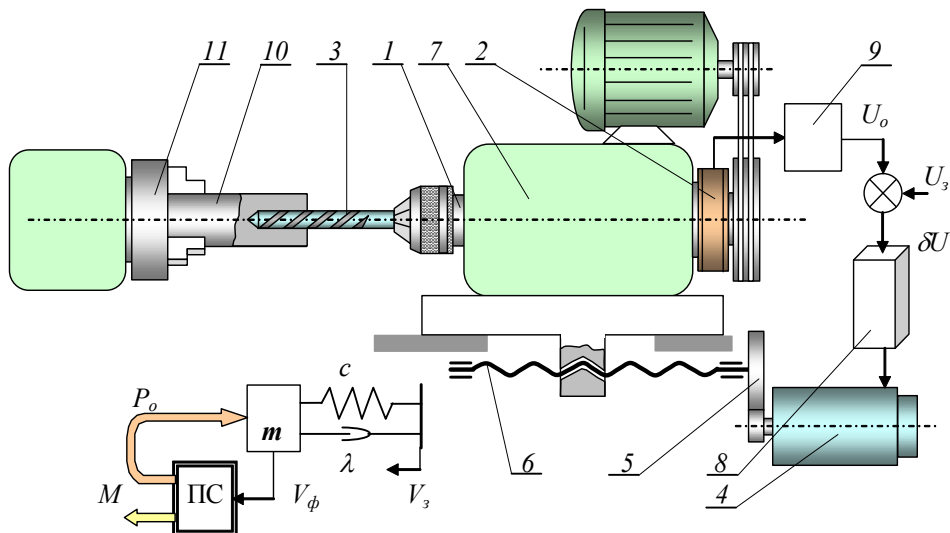


Рис.2.17. САУ агрегатного свердлувального верстату

Вихідні дані наведені у табл..2.9.

Таблиця 2.9. Вихідні дані

Пеша ци фра	Параметри елементів САУ						Параметри процесу різання				ЕПС		
	Перетворювач		Двигун			Вимір. прилад моменту							
	$k_{nn}$	$T_{nc}$	$k_d$	$T_{я}$	$T_m$	$k_{лм}$	$T_p$	$V_o$	$S_o$	$\phi$	$m$	$\lambda$	$c$
	с	рад/сВ	с	с	В/Нм	с	м/с	мм/об	мм	кг	кг/с	Н/м	
0	20	0	2.5	0	0.30	10	0.010	0.10	0.05	10	20	600	1E7
1	50	0	2.0	0.05	0.25	5	0	0.05	0.07	8.5	30	950	5E6
2	10	0.05	1.5	0	0.20	6	0	0.09	0.06	12	40	750	4E6
3	70	0	0.6	0	0.45	8	0.005	0.15	0.08	16	20	650	1E6
4	80	0	1.7	0.03	0.15	7	0.007	0.12	0.10	23	80	900	2E6
5	20	0.01	2.0	0	0.35	3	0	0.03	0.04	13	70	800	9E5
6	30	0	2.5	0.10	0.40	12	0	0.07	0.12	7.1	50	850	6E6
7	25	0	1.5	0	0.55	2	0.003	0.06	0.09	6.0	45	700	4E6
8	65	0	2.5	0	0.10	15	0.008	0.08	0.11	14	35	500	3E6
9	40	0.04	3.0	0.90	0.65	4	0	0.20	0.02	10	25	550	8E5

### Примітка.

Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнти і показники ступеня у формулах для розрахунків силових залежностей при свердлуванні:  $C_p=1730$ ,  $C_M=0.315$ ,  $x_p=0.2$ ,  $y_p=0.7$ ,  $z_p=0.36$ ,  $x_M=0.03$ ,  $y_M=0.6$ ,  $z_M=0.46$ .
2. Довжина свердлування  $L=100$  мм.
3. Коефіцієнт передачі редуктора осьової подачі  $k_p=0.025$ , крок гвинтової пари 6 мм.
4. Коефіцієнт підсилення електронного підсилювача  $k_n=20$ .

На рис.2.18 представлений вигляд анімаційного ролика, що ілюструє роботу наведеної вище САУ.

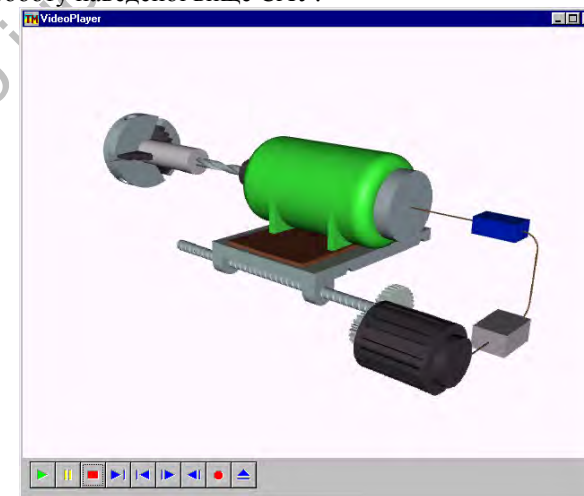


Рис.2.18. Ролик анімації рухів САУ

### 9. Система автоматичного управління копіювального фрезерного верстата

Копіювальний фрезерний верстат призначений для обробки складних поверхонь деталей машин по копію.

САУ копіювального фрезерного верстата (рис.2.19) складається з перетворювача переміщення 1, електронного підсилювача 2, підсилювача-перетворювача 3 комплектного електроприводу з двигуном постійного струму 4. Двигун 4 кінематично зв'язаний через редуктор 5 і гвинтову пару 6 з фрезерною бабкою 8. Перетворювач переміщення 1 має шуп 7 і закріплений на фрезерній бабці 8. Копір 9 і оброблювана деталь 10

встановлені на столі 11, якому передається рух подачі, що задає, від окремого приводу.

При ввімкненні приводу подачі, що задає, шуп 7 перетворювача 1 взаємодіє з профілем копіра 9 і виробляє сигнал у вигляді напруги, пропорційної відхиленню шупа. Ця напруга через електронний підсилювач 2 надходить на вхід підсилювача-перетворювача 3 комплектного регульованого електроприводу і спричинює обертання двигуна постійного струму 4. Двигун 4 через редуктор 5 і гвинтову пару 6 викликає зміщення фрезерної бабки 8 в бік зменшення помилки. Корпус перетворювача переміщення 1 закріплений на фрезерній бабці, чим забезпечений негативний зворотний зв'язок САУ.

В процесі функціонування САУ фреза буде повторювати (простежувати) переміщення шупа 7, взаємодіючого з копіром 9, і формувати таким чином потрібний профіль деталі.

Оскільки завданням системи є формування потрібного профілю деталі, який утворюється шляхом зняття стружки, то як об'єкт, що управляється, в САУ входить процес різання в замкненій пружній технологічній системі.

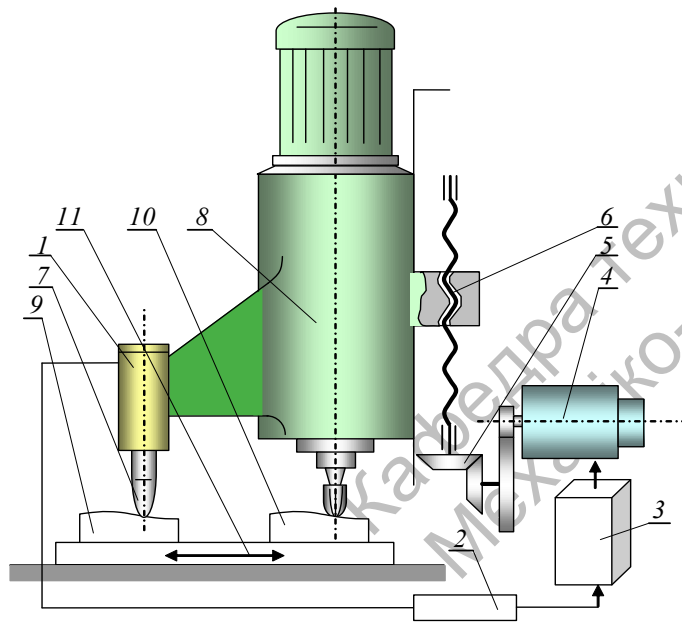


Рис.2.19. САУ копіювального фрезерного верстата

Таблиця 2.10. Вихідні дані

Параметри елементів САУ	Перетворювач		Двигун			Вимір прил. перем	Редуктор	Параметри процесу різання			ЕПС		
	$k_{mn}$	$T_{mc}$	$k_{\partial}$	$T_{я}$	$T_{м}$			$T_p$	$H_o$	$(S_z)_o$	$\omega_o$	$\xi$	$c$
		с	рад/сВ	с	с	В/мм	с	мм	мм/зуб	рад/с		Н/М	
0	40	0.03	0.6	0	0.20	15	0.01	0	2.0	0.010	340	0.7	3E6
1	45	0.02	1.8	0	0.25	10	0.02	0	4.0	0.005	210	0.6	5E6
2	60	0.05	1.4	0.04	0.31	16	0.06	0.003	3.0	0.015	-	-	4E6
3	85	0.01	0.8	0.08	0.43	28	0.02	0.005	2.5	0.020	-	-	1E7
4	90	0	1.0	0	0.18	17	0.03	0.007	4.2	0.025	180	0.7	9E6
5	30	0.03	1.2	0	0.13	30	0.04	0.002	2.2	0.060	250	0.6	2E6
6	35	0	1.5	0.10	0.24	20	0.08	0	1.7	0.080	350	0.7	6E6
7	38	0.06	2.0	0	0.22	12	0.10	0	2.6	0.055	290	0.8	4E6
8	85	0.04	2.2	0.02	0.10	5	0.03	0.008	4.8	0.035	-	-	3E6
9	70	0.03	0.9	0.09	0.36	14	0.12	0.004	5.0	0.045	-	-	8E6

Примітка. Для всіх варіантів прийняти:

1. Коефіцієнт і показники степеня в залежності для розрахунку сили різання:  $C_p=1200$ ,  $k=0.27$ ,  $\mu=0.07$ . Кількість зубців фрези  $z=12$ .
3. Коефіцієнт передачі електронного підсилювача  $k_{en}=60$ , постійною часу знехтувати. Крок гвинтової пари 12 мм.

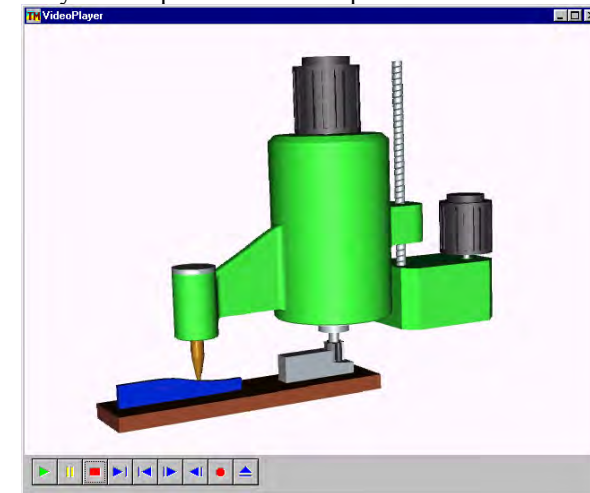


Рис.2.20. Ролик анімації рухів САУ

### 3. Методичні вказівки до розрахунку САУ

При визначенні передаточних функцій елементів САУ за вихідні рівняння можна взяти наступні рівняння процесів і елементів, що входять у систему.

#### Процес різання

Сила різання (будь-яка її складова) зв'язана з параметрами, які визначають елементи шару, що зрізається, диференціальним рівнянням:

$$T_p \frac{dP}{dt} + P = kA, \quad (3.1)$$

де  $T_p$  – постійна часу стружкоутворення;  $P$  – силовий параметр процесу різання;  $A$  – регульований параметр процесу різання – глибина, подача, швидкість;  $k = (\partial P / \partial A)_0$  – коефіцієнт пропорційності.

**Таким чином, права частина рівняння являє собою лінеаризовану залежність силового параметра від регульованого параметра в околиці режиму обробки, що встановився.**

При точінні слід скористатися відомою з теорії різання металів формулою:

$$P = C_p H^{x_p} S^{y_p} V^n k_p, \quad (3.2)$$

де  $C_p$ ,  $k_p$ ,  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $n$  – коефіцієнти і показники степеня,  $H$ ,  $S$ ,  $V$  – відповідно глибина, подача і швидкість різання.

При рівномірному фрезеруванні циліндричною фрезою:

$$P = \frac{2^{1-k}}{\pi(2-k)} C_p S_z^{1-k} \left(\frac{H}{D}\right)^{1-k} Bz, \quad (3.3)$$

де  $C_p$ ,  $k$  – емпіричні коефіцієнт і показник степеня;  $S_z$  – подача на зуб фрези;  $H$ ,  $B$  – відповідно глибина і ширина фрезерування;  $D$ ,  $z$  – відповідно діаметр і кількість зубців фрези.

При повному фрезеруванні торцевою фрезою:

$$P = \frac{2^{k/2}}{\pi} C_p S_z^{1-k} H^{1-\mu} z, \quad (3.4)$$

де  $C_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  – емпіричні коефіцієнт і показники степеня;  $S_z$  – подача на зуб фрези;  $H$  – глибина фрезерування;  $z$  – кількість зубців фрези.

При шліфуванні:

$$P_z = C_p V_\delta^x H^y S^z; \quad P_y = 2.5P_z, \quad (3.5)$$

де  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – коефіцієнт і показники степеня;  $V_\delta$  – швидкість деталі;  $H$ ,  $S$  – глибина різання і подача відповідно.

При глибокому свердлуванні осьова сила  $P_o$  і момент  $M$  різання:

$$P_o = C_p V^{x_p} S^{y_p} L^{z_p}; \quad M = C_M V^{x_M} S^{y_M} L^{z_M}, \quad (3.6)$$

де  $C_p$ ,  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $z_p$ ,  $C_M$ ,  $x_M$ ,  $y_M$ ,  $z_M$  – коефіцієнти і показники степеня,  $V$ ,  $S$ ,  $L$  – швидкість різання, подача і глибина свердлування відповідно.

#### Еквівалентна пружна система (ЕПС) верстата

Пружна система верстата описується, в припущенні одномасової динамічної моделі, наступним рівнянням (при силовому збуренні):

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{1}{c} P, \quad (3.7)$$

де  $\omega_0$  – власна частота коливань;  $\xi$  – коефіцієнт затухання коливань;  $c$  – жорсткість пружної системи верстата;  $y$  – деформація пружної системи верстата;  $P$  – силовий параметр.

#### Механічний редуктор

Редуктор коробки подач, швидкостей тощо, без урахування зазорів, моментів інерції, крутильних жорсткостей і тертя, описується рівнянням:

$$\omega_{вих} = k_p \omega_{вх}, \quad \text{або} \quad \alpha_{вих} = k_p \alpha_{вх}, \quad (3.8)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт передачі редуктора;  $\omega_{вих}$ ,  $\alpha_{вих}$  – наріжна швидкість і кут повороту вихідного вала;  $\omega_{вх}$ ,  $\alpha_{вх}$  – наріжна швидкість і кут повороту вхідного вала редуктора.

#### Електронний підсилювач

Електронний підсилювач значної потужності описується рівнянням, що враховує його інерційність:

$$T_{en} \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих} = k_{en} U_{вх}, \quad (3.9)$$

де  $T_{en}$ ,  $k_{en}$  – постійна часу і коефіцієнт передачі (підсилення) електронного підсилювача;  $U_{вих}$ ,  $U_{вх}$  – вихідна і вхідна напруги відповідно.

#### Підсилювач-перетворювач комплектного регульованого електроприводу

Підсилювач-перетворювач комплектного електроприводу складається з перетворювача змінного струму великої потужності на базі тиристорних або транзисторних елементів і тому, у найпростішому уявленні, описується рівнянням:

$$T_{nn} \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих} = k_{nn} U_{вх}, \quad (3.10)$$

де  $T_m, k_m$  – постійна часу і коефіцієнт передачі підсилювача-перетворювача;  $U_{вх}, U_{вх}$  – вихідна і вхідна напруги відповідно.

#### Електродвигун постійного струму

Електричний двигун постійного струму, з урахуванням електромагнітних процесів, описується диференціальним рівнянням 2-го порядку:

$$T_y T_m \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_d U, \quad (3.11)$$

де  $T_y, T_m$  – електромагнітна і електромеханічна постійні часу;  $k_d$  – коефіцієнт передачі двигуна;  $U$  – напруга живлення якоря;  $\omega$  – наріжна швидкість.

#### Гідропідсилювач золотникового типу

Гідропідсилювач у найпростішому випадку може бути описаний лінійним диференціальним рівнянням:

$$T_{zn} \frac{dQ}{dt} + Q = k_{zn} h, \quad (3.12)$$

де  $T_{zn}, k_{zn}$  – постійна часу і коефіцієнт передачі гідропідсилювача;  $Q$  – витрата масла на виході гідропідсилювача;  $h$  – відкриття щілини золотника.

#### Двокаскадний гідравлічний підсилювач з підсилювачем типу “сопло-заслінка” у першому каскаді

Математична модель цього гідравлічного підсилювача повинна враховувати інерційність двох каскадів підсилення і у найпростішому лінійному уявленні має вигляд:

$$T^2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + 2\xi T \frac{dQ}{dt} + Q = k_{zn} h, \quad (3.13)$$

де  $T=1/\omega$  – постійна часу;  $\xi$  – коефіцієнт демпфування коливань;  $k_{zn}$  – коефіцієнт передачі гідравлічного підсилювача;  $h$  – вхідне переміщення заслінки першого каскаду.

#### Гідравлічний двигун

Без врахування динамічних явищ 2-го порядку, гідродвигун описується лінійним диференціальним рівнянням 1-го порядку:

$$T_{zd} \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_{zd} Q, \quad (3.14)$$

де  $T_{zd}, k_{zd}$  – постійна часу і коефіцієнт передачі гідравлічного двигуна;  $Q$  – витрата масла через гідродвигун;  $\omega$  – наріжна швидкість вала двигуна.

#### Гідравлічний циліндр

Гідравлічний циліндр без врахування маси, тертя, стисливості масла може бути описаний наступним рівнянням:

$$y_{zq} = \frac{1}{F_{zq}} \int Q dt, \quad (3.15)$$

де  $F_{zq}$  – корисна площа поршня;  $y_{zq}$  – переміщення штоку;  $Q$  – витрата масла через гідравлічний циліндр.

#### Асинхронний двигун головного руху

У першому наближенні, без урахування явищ 2-го порядку і у відповідності з лінеаризованою моделлю, цей двигун може бути поданий наступним диференціальним рівнянням, що зв'язує момент  $M$  навантаження на валу зі струмом  $I$  ланцюга живлення:

$$T_d \frac{dI}{dt} + I = k_d M, \quad (3.16)$$

де  $T_d, k_d$  – постійна часу і коефіцієнт передачі двигуна;  $M$  – момент навантаження на валу;  $I$  – струм в ланцюзі живлення.

#### Електромеханічний перетворювач

Це пристосування виконує перетворення електричного сигналу на вході на переміщення вихідного елемента і описується наступним диференціальним рівнянням:

$$T_{em} \frac{dh_{вх}}{dt} + h_{вх} = k_{em} U_{em}, \quad (3.17)$$

де  $T_{em}, k_{em}$  – постійна часу і коефіцієнт передачі перетворювача;  $U_{em}$  – напруга управління;  $h_{вх}$  – переміщення вихідного елемента.

#### Перетворювачі (вимірювальні прилади) різних фізичних величин

Ці прилади призначені для вироблення електричного сигналу у вигляді напруги, яка пропорційна фізичній величині на вході. Вони описуються наступним рівнянням:

$$U_{вх} = k_n A_{вх}, \quad (3.18)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт передачі вимірювального приладу;  $U_{вх}$  – вихідна напруга;  $A_{вх}$  – вхідний вимірюваний фізичний параметр (сила, переміщення тощо).



#### 4. Приклад виконання курсової роботи

Як приклад системи автоматичного управління розглянемо найбільш розповсюджений в металообробці тип замкнених САУ, призначених для автоматичного регулювання процесу різання заздалегідь встановленим чином. Такі системи можуть застосовуватися як для стабілізації заданих вихідних параметрів процесу різання, так і для їх модифікації в циклі обробки за певним алгоритмом. Найбільш доцільно використання таких систем на заключних, фінішних операціях технологічного процесу, якими, як правило, є операції алмазно-абразивної обробки.

При шліфуванні точність обробки, в основному, визначається пружними деформаціями технологічної системи, що, в свою чергу, залежать від сили різання. Тому система автоматичної стабілізації сили різання на заздалегідь заданому рівні і програмного зменшення її до кінця циклу шліфування дозволяє підвищити точність обробки і значно покращити якість поверхні деталей.

САУ змонтована на круглошліфувальному верстаті (рис. 4.1), що складається з інструментальної бабки 1 зі шліфувальним кругом 2 і двигуном головного руху 3, передньої бабки 4 з приводом обертання деталі 5, стола 6 з гідравлічним циліндром 7 позадвожньої подачі.

Система стабілізації сили різання складається з перетворювача струму 8, підсилювача 9, порівняльного пристрою 10, підсилювача 11 і двокаскадного гідравлічного підсилювача з голкою та золотником і електромеханічним перетворювачем 12.

Система працює наступним чином. Напруга  $U_3$ , в певному масштабі відповідає значенню сили різання  $P$ , що вимагається, подається на вхід порівняльного пристрою 10. Оскільки сила різання  $P$  визначає момент двигуна 3 головного руху, а отже, і струм двигуна, що вимірюється перетворювачем струму 8, то на інший вхід порівняльного пристрою надходить сигнал, пропорційний діючій силі різання. Величина

помилки через підсилювач 11 надходить на обмотки електромеханічного перетворювача 12.

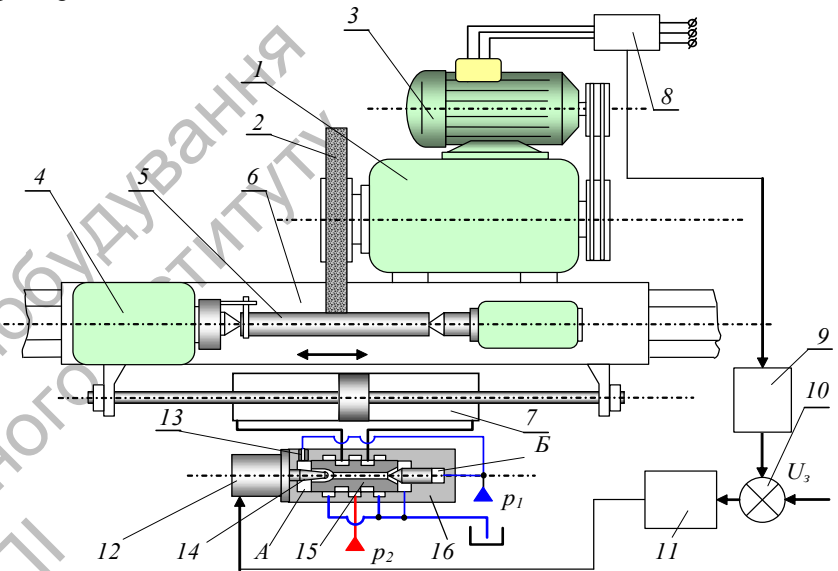


Рис.4.1. Принципова схема САУ

Перший каскад гідравлічного підсилювача живиться від джерела з невеликим постійним тиском  $p_1$  і обмеженою витратою робочої рідини. Робоча рідина проходить крізь дросель 13, камеру  $A$ , прохідний перетин між голкою і кромкою отвору у плунжері 15 і далі по внутрішньому каналу у плунжері золотника потрапляє на злив. Джерело живлення першого каскаду з'єднане також з камерою  $B$ .

Другий гідравлічний каскад підсилення живиться від джерела з підвищеним постійним тиском  $p_2$  і значною витратою робочої рідини.

У нейтральному положенні плунжер 15 золотника знаходиться у рівновазі і його крайки перекидають вікна у гільзі 16, гідравлічний циліндр 7 нерухомий. В цьому положенні між голкою і отвором у торці плунжера повинен бути деякий початковий зазор, через прохідний перетин якого потік робочої рідини проходить на злив.

При переміщенні голки 14 електромеханічним перетворювачем 12 змінюється площа прохідного перетину між голкою і кромкою отвору у плунжері та, як наслідок, опір витіканню рідини в даному перетині. Це

приводить до модифікації тиску в камері  $A$  і переміщення плунжера 15. Плунжер 15 буде переміщатися доти, доки не встановиться колишній прохідний перетин між голкою 14 і отвором у плунжері 15. Переміщуючись, плунжер 15 відкриває вікна у гільзі 16 золотника. Одна з порожнин гідроциліндра 7 з'єднується з лінією тиску, інша – зі зливом. Швидкість руху штока гідроциліндра 7 і повздовжня подача залежать від величини відкриттів вікон у гільзі 16 золотника.

Таким чином, керуючи подачею  $S$ , здійснюють регулювання сили різання з метою її стабілізації при модифікації зовнішніх умов обробки, що є збуреннями. Змінюючи задавальний вплив  $U_z$ , можна забезпечити модифікацію сили різання в течію усього циклу шліфування деталі за оптимальним законом. Відзначимо, що на рис. 4.1 не показана та частина системи управління, що реалізує циклове управління: переключає напрямки руху гідроциліндра, підводить і відводить шліфувальну бабку і т. ін.

Для складання математичної моделі системи спочатку побудуємо її функціональну схему. При цьому необхідно пам'ятати, що вона відображає не технічні властивості окремих елементів, а функції, які вони виконують в системі управління і зв'язки між ними.

Поділимо САУ на функціональні елементи. Передусім виділимо об'єкт, що управляється, - процес різання, який реалізується в замкненій технологічній системі. Вхідним, керуючим впливом, є повздовжня подача  $S$ , збуренням – задана глибина різання  $H_z$ , а вихідним, регульованим параметром (ціллу управління) – сила  $P$  різання. Беремо лінійну модель, яка враховує, що фактична глибина різання  $H_\phi$  залежить від деформації еквівалентної пружної системи (ЕПС) верстата.

Далі послідовно простежимо проходження сигналів в САУ. Сила різання викликає момент навантаження асинхронного електродвигуна головного руху, що приводить до модифікації струму в ланцюзі живлення. Отже, електродвигун головного руху як елемент функціональної схеми повинен бути поданий елементом, на вході якого момент  $M$  навантаження, а на виході - струм  $I$ . Момент навантаження, без урахування моменту інерції та тертя, приблизно можна визначити за простою формулою:

$$M = P_z \frac{D_k}{2} k_p,$$

де  $P_z$  – тангенціальна складова сили різання;  $D_k$  – діаметр шліфувального круга;  $k_p$  – передаточне відношення клиноремінної передачі.

В ланцюг живлення двигуна ввімкнений перетворювач струму (стру-мовий трансформатор), вхідним сигналом якого є струм  $I$  двигуна, а вихідним - напруга  $U_n$ , пропорційна струму. Ця напруга після

електронного підсилювача подається на порівняльний пристрій як сигнал зворотного зв'язку  $U_o$ .

Сигнал помилки  $\delta U = U_z - U_o$  через другий електронний підсилювач надходить на електромеханічний перетворювач, входом якого є напруга  $U_{em}$ , а виходом – переміщення  $h$  голки гідравлічного підсилювача.

Двокаскадний гідравлічний підсилювач має внутрішній зворотний зв'язок, завдяки якому плунжер золотника стежить за переміщенням голки. Отже, вхідною величиною першого каскаду підсилення необхідно вважати помилку  $\delta h = h - h_z$ , де  $h_z$  – переміщення плунжера золотника (відкриття щілин). Вихідною величиною гідравлічного підсилювача є витрата  $Q$  потоку робочої рідини в лінії навантаження. Шток гідравлічного циліндра переміщає стіл верстата зі швидкістю повздовжньої подачі  $S$ .

З'єднуючи виділені в ході аналізу елементи САУ між собою відповідно до їх функціонального призначення і принципової схеми САУ, будемо її функціональну схему (рис. 4.2).

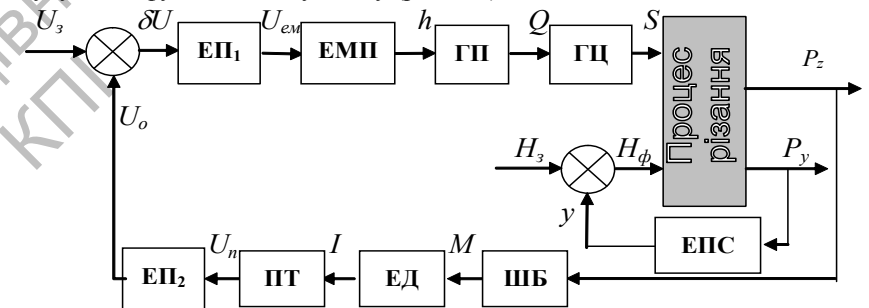


Рис.4.2. Функціональна схема САУ

Наступним етапом є визначення передаточних функцій всіх елементів САУ. Тут необхідно дотримуватися принципів складання математичних моделей, викладених у розділі 3.

Електронні підсилювачі достатньо подати безінерційними елементами з наступними коефіцієнтами передачі: підсилювач в прямому каналі регулювання -  $k_{en1}$  (це значення підлягає визначенню), підсилювач в каналі зворотного зв'язку -  $k_{en2}=10$ . Електромеханічний перетворювач може бути поданий аперіодичним елементом 1-го порядку з постійною часу  $T_{em}=0.01$  с та коефіцієнтом передачі  $k_{em}=0.2$  мм/В.

Гідрравлічний підсилювач характеризується наступними параметрами: коефіцієнти передачі першого і другого ступенів підсилення  $k_{en1} = 15$ ,  $k_{en2} = 2.0 \cdot 10^7 \text{ мм}^2/\text{хв}$  відповідно, постійна часу  $T_{en} = 0.05 \text{ с}$ . Корисна площа поршня гідроциліндра  $F_{en} = 100 \text{ см}^2$ .

Електродвигун головного руху може бути представлений аперіодичним елементом 1-го порядку з коефіцієнтом передачі  $k_0 = 0.5 \text{ А/М}$  та постійною часу  $T_0 = 0.06 \text{ с}$ . Перетворювач струму – безінерційний елемент з коефіцієнтом передачі  $k_n = 0.1 \text{ В/А}$ .

Як видно з функціональної схеми, процес різання має два входи: за керуючим впливом  $S$  і за збуренням  $H_3$ . Тому процес різання може бути представлений лінеаризованим рівнянням:

$$T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y = (K_S)_0 S + (K_H)_0 H_\phi,$$

де, згідно з вихідними даними, постійна часу стружкоутворення  $T_p = 0$ , а коефіцієнти лінеаризованого рівняння:

$$(K_S)_0 = \left( \frac{\partial P_y}{\partial S} \right) = C_p V_\delta^x y H_0^{y-1} S_0^z = 30 \cdot 30^{0.5} \cdot 0.8 \cdot 0.01^{-0.2} \cdot 10^{0.5} = 1044;$$

$$(K_H)_0 = \left( \frac{\partial P_y}{\partial H} \right) = C_p V_\delta^x H_0^y z S_0^{z-1} = 30 \cdot 30^{0.5} \cdot 0.01^{0.8} \cdot 0.5 \cdot 10^{-0.5} = 0.6526.$$

Відповідно до одиниць фізичних величин вихідних даних необхідно узгодити одиниці виміру подачі в формулі розрахунку сили різання (мм/об) з одиницями виміру швидкості переміщення стола – штока гідроциліндра (мм/хв). У вихідних даних було задано: швидкість деталі  $V_\delta = 30 \text{ м/хв}$  і діаметр деталі  $D_\delta = 100 \text{ мм}$ , звідки можна визначити частоту обертання деталі:

$$n = \frac{1000 V_\delta}{\pi D_\delta} = \frac{1000 \cdot 30}{\pi \cdot 100} = 9506 \text{ об/хв}.$$

Отже, хвилинна подача зв'язана з подачею на оберт коефіцієнтом  $k_l = 1/n = 1.05 \cdot 10^{-2}$ .

Еквівалентна пружна система описується коливальним елементом з передаточною функцією, що, згідно з прийнятими вихідними даними ( $\omega_0 = 600 \text{ рад/с}$ ,  $\xi = 0.2$ ,  $c = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$ ), має такий вигляд:

$$W_{EPC}(s) = \frac{Y(s)}{P_y(s)} = \frac{1/c}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + 2\xi \frac{s}{\omega_0} + 1} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2.78 \cdot 10^{-6} s^2 + 6.67 \cdot 10^{-4} s + 1}.$$

Після визначення передаточних функцій всіх елементів САУ, користуючись функціональною схемою, складаємо структурну схему (рис. 4.3). Враховуючи, що САУ призначена для стабілізації сили різання, беремо як вихідну величину складову  $P_y$ , а складову  $P_z$  знайдемо з простого співвідношення, яке відоме з теорії шліфування  $P_y = 2.5 P_z$ .

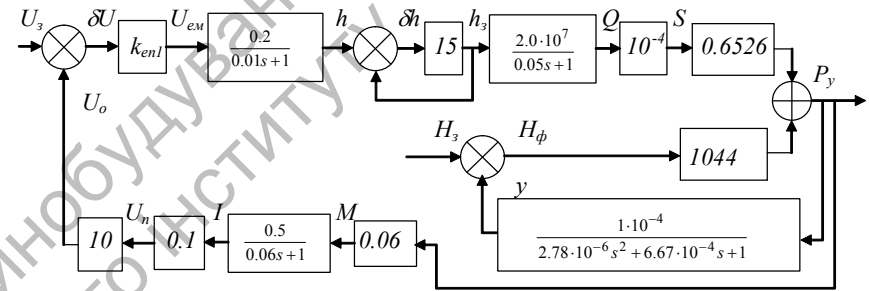


Рис.4.3. Структурна схема САУ

В САУ можна виділити прямий канал регулювання: від задавального сигналу  $U_z$  до складової  $P_y$  сили різання (враховуючи місцеві зворотні зв'язки) і канал зворотного зв'язку від складової  $P_y$  до напруги  $U_o$ , що надходить на елемент порівняння. При цьому принципово важливо, що місце додатка збурення охоплене головним зворотним зв'язком. В іншому випадку ефекту регулювання не було б, бо величина, що управляється, – сила різання, перевернувшись впливом збурення, не коректувалася б за рахунок зворотного зв'язку.

Визначимо сталість САУ та виберемо таке значення коефіцієнта підсилення першого електронного підсилювача  $k_{en1}$ , що забезпечує потрібний запас сталості за амплітудою і за фазою. Зі структурної схеми рис. 4.3 випливає, що САУ містить 3 замкнені контури, отже, кожний з них повинен бути перевірений на сталість окремо. Однак аналіз замкненого контура, який подає процес різання в замкненій технологічній системі, показує, що він завжди є сталим. Очевидно, не виникає проблем сталості і в контурі, що подає перший каскад гідрравлічного підсилювача. Тому спочатку, користуючись правилами перетворення структурних схем, визначимо передаточну функцію процесу різання в замкненій технологічній системі:

$$W_{np}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1044 \cdot 10^{-4}}{2.78 \cdot 10^{-6} s^2 + 6.67 \cdot 10^{-4} s + 1}}} = \frac{2.78 \cdot 10^{-6} s^2 + 6.67 \cdot 10^{-4} s + 1}{2.78 \cdot 10^{-6} s^2 + 6.67 \cdot 10^{-4} s + 1.1044}.$$

Визначення сталості САУ будемо проводити за критерієм Найквіста, тому необхідно скласти передаточну функцію розімкненої системи і подати її в стандартній формі, що дозволить скористатися програмами побудови перехідної і частотних характеристик на ЕОМ. Отже, передаточна функція розімкненої за головним зворотним зв'язком системи має такий вигляд:

$$W_p(s) = k_{\text{звл}} \cdot \frac{0.2}{0.01s+1} \cdot \frac{15}{1+15} \cdot \frac{2 \cdot 10^7}{0.05s+1} \cdot 10^{-4} \cdot 0.0105 \cdot 0.6526 \cdot W_{np}(s) \cdot 0.06 \cdot \frac{0.5}{0.06s+1} \cdot 0.1 \cdot 10.$$

Спочатку беремо значення коефіцієнта підсилення  $k_{enl} = 500$  і після елементарних алгебраїчних перетворень одержуємо передаточну функцію в стандартній формі так, щоб вільний член полінома знаменника дорівнював 1:

$$W_p(s) = \frac{9.69 \cdot 10^{-5} s^2 + 2.33 \cdot 10^{-2} s + 34.9}{7.55 \cdot 10^{-11} s^5 + 2.84 \cdot 10^{-8} s^4 + 3.28 \cdot 10^{-5} s^3 + 4.17 \cdot 10^{-3} s^2 + 0.12s + 1}.$$

Визначення АФЧХ розімкненої системи проводимо із застосуванням прикладної програми, головний інтерфейс з введеними даними, що відповідають передатній функції, представлений на рис.4.4.

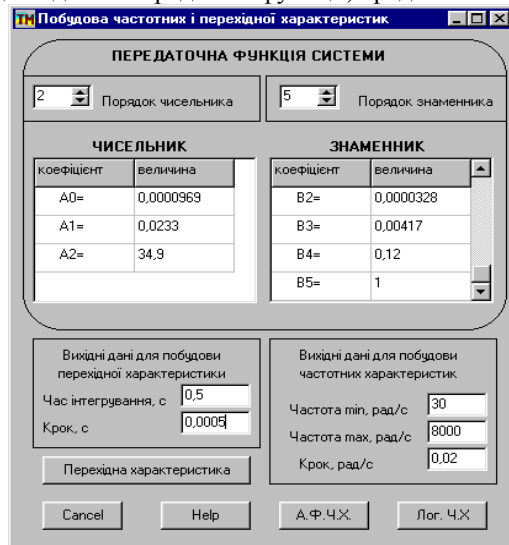


Рис. 4.4. Головний інтерфейс прикладної програми

Моделювання за допомогою прикладної програми, дозволило побудувати графік АФЧХ розімкненої системи (план Найквіста), який зображений на рис. 4.5, а.

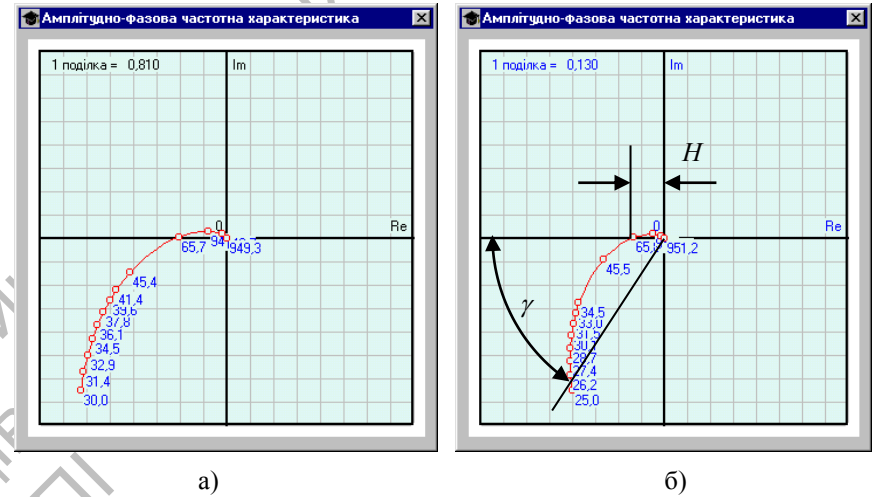


Рис. 4.5. Плани Найквіста для дослідження сталості системи: а – нестала система; б – стала система

Аналіз показує, що система з вибраним значенням коефіцієнта підсилення першого електронного підсилювача є нестійкою, оскільки графік її АФЧХ в розімкненому стані охоплює критичну точку з координатами [-1.0]. Зменшивши коефіцієнт до  $k_{enl}=50$ , розраховуємо передаточну функцію розімкненої системи із змінним коефіцієнтом і знов проводимо моделювання. Результати (рис. 4.5, б) свідчать про сталість САУ. Запас сталості за амплітудою -  $L_1 = 20 \lg(1/H) = 20 \lg(1/0.175) = 5.2 \text{ дБ}$ , запас сталості за фазою -  $\gamma = 50^\circ$ . Такі величини показників сталості (за амплітудою) недостатні для задовільної роботи системи на практиці, однак, для навчальних цілей можна обмежитися вибраним значенням коефіцієнта підсилення.

Для побудови перехідної характеристики необхідно розрахувати передатну функцію САУ в замкненому, тобто робочому стані. Користуючись правилами перетворення структурних схем, знаходимо:

$$W_{CAV}(s) = \frac{4.32 \cdot 10^{-4} s^3 + 1.11 \cdot 10^{-3} s^2 + 1.57s + 25.91}{1.68 \cdot 10^{-11} s^5 + 6.33 \cdot 10^{-9} s^4 + 7.3 \cdot 10^{-6} s^3 + 9.32 \cdot 10^{-4} s^2 + 2.73 \cdot 10^{-2} s + 1}.$$

Результати моделювання за допомогою прикладної програми представлені на рис. 4.6.

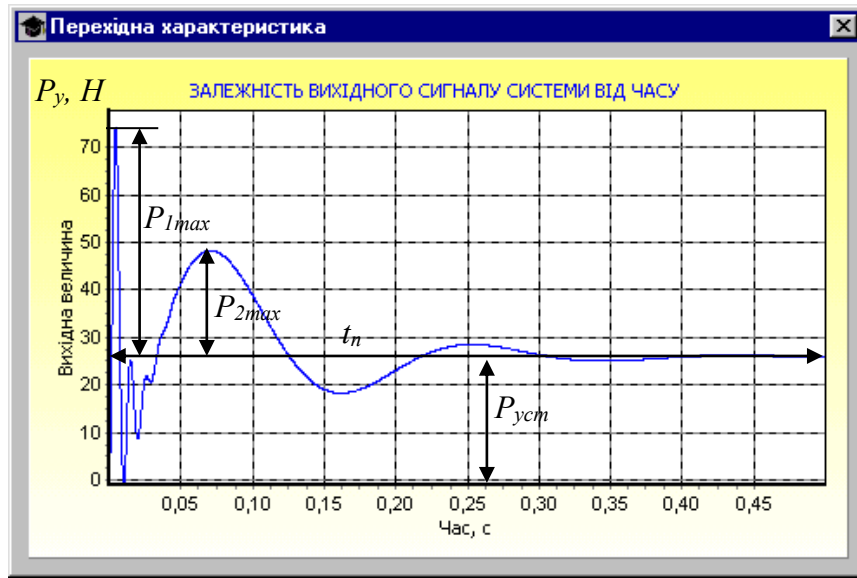


Рис. 4.6. Графік перехідної характеристики САУ

Вихідною величиною за перехідною характеристикою є складова  $P_y$  сили різання. Очевидно, що система стабілізує силу різання на рівні, відповідному  $P_y=26$  Н. Однак, як і слід було очікувати з аналізу плану Найквіста, якість перехідного процесу не може вважатися задовільною.

Очевидною є наявність двох основних гармонік у перехідній кривій. Перша, високочастотна, зобов'язана своєю появою вільним коливанням технологічної пружної системи, що характеризується за прийнятими вихідними даним низьким коефіцієнтом згасання коливань ( $\xi=0.2$ ). Друга складова подає реакцію самої системи регулювання на східчастий сигнал. За перехідною характеристикою можуть бути визначені всі показники якості регулювання (див рис.4.6):

- ✓ час перехідного процесу (швидкодія)  $t_n=0,5$  с;
- ✓ відносне перерегулювання  $\sigma = \frac{P_{1max}}{P_{уст}} 100\% = 185\%$ ;
- ✓ згасання за період  $\zeta = \frac{P_{1max} - P_{2max}}{P_{1max}} 100\% = 54\%$ .