

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Дослідження та розробка автоматизованої системи керування  
процесом фрикційного формування деталей»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Анатолій СКРИПНИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Сергій ПЛЄШКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Олег КИСЛУН

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Скрипника Анатолія Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка автоматизованої системи керування процесом фрикційного формування деталей

2. Керівник роботи Плешков Сергій Петрович, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи 1. Проаналізувати сучасні технології фрикційного формоутворення деталей; 2. Дослідити закономірності зміни технологічних параметрів процесу фрикційного формоутворення; 3. Розробити структурну та принципову схеми пристрою; 4. Створити алгоритм керування технологічним процесом; 5. Розробити схему апаратної частини системи б. Провести математичне моделювання процесу.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ               | Консультант       | Підпис, дата   |                  |
|----------------------|-------------------|----------------|------------------|
|                      |                   | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Охорона праці</i> | <i>Жесан Р.В.</i> |                |                  |
|                      |                   |                |                  |
|                      |                   |                |                  |

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи                    | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | <i>Призначення та область застосування пристрою</i>              | 20.10.25                      |          |
| 2     | <i>Аналіз існуючих методів фрикційного формоутворення</i>        | 28.10.25                      |          |
| 3     | <i>Вибір принципу побудови автоматизованої системи керування</i> | 06.11.25                      |          |
| 4     | <i>Розробка структурної схеми</i>                                | 15.11.25                      |          |
| 5     | <i>Математичне моделювання процесу</i>                           | 20.11.25                      |          |
| 6     | <i>Розгляд заходів з охорони праці</i>                           | 26.11.25                      |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ С.П. Плешков «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач \_\_\_\_\_ А.М. Скрипник «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## Анотація

на випускнху кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Скрипника Анатолія Миколайовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Дослідження та розробка автоматизованої системи керування процесом фрикційного формування деталей».

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження технологічного процесу фрикційного формоутворення деталей та розроблено автоматизовану систему керування параметрами даного процесу. Визначено основні регульовані параметри: температуру підшипника формоутворюючого інструмента та осьове зусилля, що виникає в момент контакту інструмента із заготовкою. Встановлено, що ручне керування системою охолодження та відсутність автоматичного контролю осьового зусилля знижують стабільність технологічного процесу, можуть спричинити розпирання станини верстата, поломку елементів конструкції та виготовлення бракованих деталей.

Експериментально досліджено об'єкти управління, отримано розгінні характеристики та шляхом апроксимації визначено їх передаточні функції. На їх основі розроблено та досліджено моделі систем автоматичного регулювання температури та осьового зусилля. Розроблено структурну та електричну принципову схеми цифрової системи автоматичного керування параметрами процесу фрикційного формоутворення, а також алгоритм її функціонування. Проведені розрахунки підтверджують відповідність проєктованої системи технологічним вимогам щодо точності, динамічних характеристик, діапазонів регулювання та надійності. Окремо розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації обладнання.

**Ключові слова:** фрикційне формоутворення, осьове зусилля, температура інструмента, ПІД-регулятор, двохпозиційний регулятор, цифрова система керування.

## Summary

for the final qualification work of the student of the AK-24M group Anatoly Nikolaevich Skrypnyk in the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic: "Research and development of an automated control system for the process of friction forming of parts".

In the master's thesis, a comprehensive study of the technological process of friction forming of parts was carried out and an automated control system for the parameters of this process was developed. The main adjustable parameters were determined: the temperature of the bearing of the forming tool and the axial force that arises at the moment of contact of the tool with the workpiece. It was established that manual control of the cooling system and the absence of automatic control of the axial force reduce the stability of the technological process, can cause the machine frame to bulge, breakage of structural elements and the production of defective parts.

The control objects were experimentally investigated, acceleration characteristics were obtained and their transfer functions were determined by approximation. Based on them, models of automatic temperature and axial force control systems were developed and investigated. A structural and electrical schematic diagram of a digital system for automatic control of parameters of the friction forming process was developed, as well as an algorithm for its functioning. The calculations performed confirm the compliance of the designed system with technological requirements for accuracy, dynamic characteristics, control ranges and reliability. The issues of labor protection and equipment operation safety were separately considered.

**Keywords:** friction forming, axial force, tool temperature, PID controller, two-position controller, digital control system.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 2  |
| 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ .....   | 5  |
| 1.1 Огляд технології.....   | 5  |
| 1.2 Опис технологічного процесу та математичної моделі .....  | 8  |
| 2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ<br>ПОБУДОВИ СИСТЕМИ .....  | 15 |
| 3 ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ<br>УПРАВЛІННЯ .....   | 20 |
| 3.1 Методика отримання розгінних кривих.....  | 20 |
| 3.2 Визначення передаточної функції об'єкта управління осьовим<br>зусиллям .....                                    | 22 |
| 3.3 Визначення передаточної функції об'єкта управління температурою.....  | 29 |
| 4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ<br>ПРОЦЕСОМ ФРИКЦІЙНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ.....                           | 36 |
| 4.1 Розрахунок системи автоматичного управління осьовим зусиллям.....   | 36 |
| 4.2 Розрахунок системи автоматичного управління температурою .....  | 43 |
| 5 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ САУ .....  | 46 |
| 5.1 Опис структурної схеми системи автоматичного управління параметрами<br>процесу фрикційного формоутворення ..... | 46 |
| 5.2 Вибір, обґрунтування та розрахунок окремих вузлів, блоків,<br>елементів .....                                   | 51 |
| 5.3 Вибір, обґрунтування та розрахунок окремих вузлів, блоків,<br>елементів .....                                   | 65 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| ВИСНОВКИ.....          | 68 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... | 70 |
| ДОДАТОК А.....         | 73 |

## ВСТУП

**Актуальність даної теми.** Технічний прогрес сучасного машинобудування визначається впровадженням високопродуктивних технологій, що забезпечують раціональне використання матеріалу при виготовленні деталей. В умовах дефіциту ресурсів та підвищення вартості металу особливої важливості набуває пошук технологій із високим коефіцієнтом використання металу та мінімальними енерговитратами. Одним із перспективних напрямків є метод фрикційного формоутворення, що забезпечує значно вищу ефективність використання металу порівняно з традиційними методами механічної обробки різанням.

Метод фрикційного формоутворення ґрунтується на процесах гарячого пластичного деформування, при якому необхідна температура досягається за рахунок тепла, що виділяється при сухому терті формоутворюючого інструмента із заготовкою. Однак інтенсивна теплогенерація в зоні обробки створює небезпечні термічні умови для підшипникових опор шпинделя та негативно впливає на ресурс обладнання і якість деталей. Крім того, процес супроводжується значними осьовими зусиллями, особливо в початковій стадії циклу, що призводить до пружних деформацій системи, порушення стабільності процесу та можливих аварійних ситуацій.

Вирішення цих проблем можливе шляхом впровадження системи автоматичного моніторингу та керування технологічними параметрами – температурою та осьовим зусиллям, що дасть змогу оптимізувати тепловий режим і стабілізувати силовий вплив на конструкцію. Застосування мікропроцесорних систем дозволить у режимі реального часу контролювати теплові й силові навантаження, прогнозувати відхилення та своєчасно приймати коригуючі дії.

**Метою даної магістерської** є розробка мікропроцесорної системи автоматичного керування температурою та осьовим зусиллям при фрикційному

формоутворенні деталей, яка забезпечуватиме підтримку заданих параметрів на всіх етапах технологічного процесу.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес фрикційного формоутворення деталей у металорізальному обладнанні.

**Предмет дослідження** – теплові та силові параметри процесу та засоби їх автоматичного регулювання.

**Методи дослідження:** включають математичне моделювання теплосилових процесів, аналіз експериментальних даних, методи контролю температури і силових навантажень, засоби мікропроцесорної обробки інформації.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у підвищенні стабільності технологічного процесу, зменшенні браку деталей, збільшенні ресурсу підшипникових вузлів, зниженні енерговитрат та підвищенні техніко-економічної ефективності виробництва. Впровадження системи автоматичного керування підвищує рівень організованості виробничого циклу та дозволяє реалізувати адаптивний моніторинг параметрів у реальному часі.

# 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ

## 1.1 Огляд технології

Трудомісткість виготовлення деталей класу втулок складає помітну частину загальної трудомісткості виготовлення деталей на машинобудівних підприємствах. Тому одним з актуальних напрямків дослідження стала розробка питань автоматизації виробництва деталей форми тіл обертання, що розвивається по різних напрямках. Досліджувалась можливість виготовлення таких деталей на автоматичних переналагоджувальних лініях, зкомпонованих з верстатів універсального призначення та верстатів з ЧПК, розроблялись спеціальні верстати та автоматичні лінії для виготовлення типових деталей класу втулок, а також комплексні автоматичні цехи для виготовлення деталей форми тіл обертання.

Класичним методом виготовлення деталей класу втулок є метод різання на токарних верстатах-автоматах, який забезпечує високу точність та кінцеву готовність виробів. Однак, процес виготовлення дрібних втулок різанням з прутка є малоефективним за наявності великого відсотку відходів. Як показує статистика, при виготовленні дрібних втулок і валів коефіцієнт використання металу (КВМ) дорівнює 0,2-0,3, а в дрібносерійному виробництві справи ще гірші [12, 13, 15].

Значно кращими показниками КВМ характеризується процес виготовлення невеликих деталей форми тіл обертання методом пресування: з холодною або гарячою об'ємною пластичною деформацією [15]. Для підвищення КВМ використовуються методи скручування простої або біметалічної стружки [15,20], точні методи литва [20] та інші.

Фрикційне формоутворення деталей із кольорових металів та сплавів представляє собою порівняно малодосліджений технологічний метод виготовлення пустотілих деталей форми тіл обертання, який заснований на одночасному впливі на заготовку фізичних полів різної природи: теплового та

силового. Технологічний процес, який базується на цьому методі, дозволяє сполучити в просторі та часі істотно різнорідні види робіт, такі як, нагрів металу, гарячу пластичну деформацію, охолодження та негайну, без переустановлення напівфабрикату, доробку різанням.

Технологія фрикційного формоутворення (ТФФ) [13] базується на гарячому пластичному деформуванні матеріалу заготовки. Необхідну пластичність матеріалу забезпечує тепло, що виділяється на поверхні його контакту з тручим і одночасно деформуючим інструментом (ТДІ). Тепловиділення є результатом перетворення механічної роботи сил тертя, які формуються за рахунок відносного обертання заготовки та інструменту під дією осьового тиску. Такий процес може бути корисним при виготовленні вісесиметричних деталей при умові  $0,4 \leq \frac{d}{D} \leq 0,9$  де:  $D < 35$  мм – зовнішній, а  $d$  – внутрішній діаметри втулки.

Рухи інструмента та заготовки при фрикційному формоутворенні деталей [12] можуть бути визначені як головний робочий, основний, допоміжний та додатковий формуючі рухи. Головний робочий рух (ГРР) – це обертальний рух, який споживає основну частку потужності, в процесі формоутворення. Потужність, яка споживається цим рухом, іде на нагрів металу в результаті перетворення в теплову енергію механічної роботи по подоланню сил тертя на робочій поверхні контакту інструмент – заготовка. В різних технологічних схемах цей рух може виконуватися як інструментом, так і заготовкою. Нагрів металу в результаті дії ГРР робить його пластичним.

Під дією осьової сили притискання тручий та деформуючий інструмент (ТДІ) занурюється в заготовку і витискає розігрітий до пластичного стану метал на периферію. Скупчуючись, охолоджуючись і твердіючи навкруги ТДІ, цей метал утворює деталь. Так як основна робота по перетворенню цільного прутка в деталь виконується в результаті цього осьового переміщення (подачі інструмента), то воно називається основним формоутворюючим рухом (ОФР). Робота, яка виконується ТДІ при здійсненні цього руху, також перетворюється в теплову енергію (деформаційний нагрів). Однак потужність, яка споживається

основним формуючим рухом, через його невисоку швидкість, незначна, тому деформаційний нагрів істотно не впливає на хід процесу. Однак, абсолютна величина швидкості цього переміщення має виняткове значення як з точки зору економічної, так і суто технічної.

Поверхню, на якій безпосередньо виконується робота тертя та робота по деформації заготовки в деталь, яка однаковою мірою належить як деформуючому інструменту, так і заготовці, яка деформується, називають робочою поверхнею формоутворення (РП). Тіло заготовки, що безпосередньо примикає до РП називають кореневою зоною формоутворення (КЗФ). На робочій поверхні і в кореневій зоні має місце найвища в оброблюваній системі температура. В залежності від матеріалу контртіл та режиму формоутворення вона різна. Наприклад, для заготовки з латуні ЛС 59-1 температура РП та КЗФ досягає  $650 \div 750^{\circ} \text{C}$ .

Якщо при виготовленні деталі для підвищення точності її необхідно обкатувати по зовнішньому діаметру, то це легше здійснити, якщо надати заготовці обертального руху. Виходячи з того, що обертання заготовки відносно станини істотно впливає на точність виготовлюваних деталей, його розглядають як допоміжний формуючий рух (ДФР). Крім вказаної функції цей рух заготовки може використовуватись при підрізанні торця, проточці канавки, відрізанні готової деталі або напівфабриката і т. п.

В процесі виготовлення фасонних деталей по деяким технологічним схемам переміщують профільні обкатуючі валки, наближуючи або віддаляючи їх від центру обертання заготовки і полегшуючи цим отримання складних зовнішніх фасонних форм. Це радіальне переміщення обкатуючих валків називається додатковим формоутворюючим рухом (ДФР).

Дослідження енергетики та доцільності використання фрикційного формоутворення, показало що застосування цієї маловідхідної технології на виробництві може забезпечити економічний ефект за рахунок підвищення коефіцієнту використання металу при порівняно малих енерговитратах.

## 1.2 Опис технологічного процесу та математичної моделі

В технологічному процесі фрикційного формоутворення деталей можна виділити активні (керовані) та пасивні (некеровані) параметри [14, 15]. До активних параметрів режиму формоутворення відносяться такі, значення яких можна довільно, в межах допустимих норм, змінювати на початку або в процесі виготовлення. До них відносяться:

$\omega_z$  - кутова швидкість заготовки відносно станини верстата, рад/с;

$\omega_{idi}$  - кутова швидкість ТДІ відносно станини верстата, рад/с;

$\omega_{vid}$  - кутова швидкість ТДІ відносно заготовки, яка дорівнює  $\omega_z + \omega_{idi}$ ;

$P, p_o$  - осьове зусилля та питомий тиск на робочій поверхні, з якими заготовка та інструмент стискаються, відповідно Н та МПа;

$d_{idi}, S_{idi}$  - діаметр ТДІ та площа його поперечного перерізу, відповідно мм та мм кв.;

$d_z, S_z$  - діаметр заготовки та площа її поперечного перерізу, відповідно мм та мм кв.;

$k = S_{idi} / S_z$  - відношення площин поперечного перерізу ТДІ та заготовки;

$D$  - зовнішній діаметр деталі, сформований в режимі вільного формоутворення.

До групи пасивних параметрів, які технолог або виробничник в процесі формоутворення напряду змінити не може, а лише через зміну активних параметрів відносяться:

$U, U'$  - швидкість занурення інструменту в тіло заготовки та швидкість (продуктивність) формоутворення;

$M_{tr}$  - момент тертя на робочій поверхні Н\*м;

$N_T, N_o$  - загальна та питома величина потужності тепло генерації на робочій поверхні кВт, кВт/м кв., відповідно;

$T_p$  - температура на робочій поверхні, °С;

$T_{ci}$  - середньо – інтегральна температура маси здеформованого металу, °С.

Спрощена математична модель процесу вільного формоутворення деталі визначається залежністю

$$U(U') = f(d_{idi}, d_z, D, \varpi_{vid}, P(p_o)) \quad (1.1)$$

Модель процесу формоутворення з обмеженням визначається залежністю

$$U(U') = f(S_{idi}, S_z, \varpi_{vid}, p_o) \quad (1.2)$$

Тобто, продуктивність (швидкість)  $U(U')$  процесу формоутворення деталей залежить від геометричних параметрів заготовки та ТДІ ( $d_{idi}, d_z, D, S_{idi}, S_z$ ), відносної кутової швидкості ТДІ і заготовки ( $\varpi_{vid}$ ) та осьового тиску ( $P, p_o$ ) на робочий поверхні.

Використання автоматизованого фрикційного формоутворення [14, 16, 17] показало що:

- на початку технологічного циклу, коли прогрів прутка ще недостатній, нерідко спостерігається поздовжнє проковзування останнього в затискній цангі під дією осьового зусилля, що спричиняє брак через незаповненість проектного об'єму деталі;

- при виготовленні першого десятка деталей в партії, на “холодному” автоматі помітне зменшення зовнішнього діаметра деталі, обумовлене тепловими деформаціями в системі ВПД;

- різкий зріст осьового зусилля в момент дотику формоутворюючого елемента до заготовки спричиняє розпирання станини станка;

- інтенсивний теплоскид та обмеження плинності металу формуємої деталі спричиняє помітні зміни мікромеханічних характеристик та мікроструктури в тілі деталі, що може бути використано як спосіб впливу на її якісні властивості ;

- шпиндель верстата-автомата (модель 1Б140) через дві-три години безперервної роботи перегрівається і верстат приходить зупинити, попереджаючи заклинення шарикових опор.

Теплогенерація за рахунок роботи сухого тертя в технології фрикційного формоутворення є не тільки корисною, а й принципово необхідною. В той же

час, інтенсивна і потужна теплогенерація в безпосередній близькості від передньої опори шпинделя, що несе заготовку (рисунок 1.1), негативно впливає на надійність та працездатність опор останнього [17]. При циклічному повторенні процесу, після виготовлення певної кількості деталей, виникає потреба відводу надлишкового тепла. Це можна забезпечити, наприклад, шляхом прокачування охолоджуючої рідини (з тими чи іншими теплофізичними характеристиками) через конструктивні елементи, безпосередньо контактуючі з підшипником, чи елементи, через які тепло передається до контрольованої опори. Слід зазначити, що штучне охолодження вимагає додаткових енерговитрат і тому завжди діє в зворотному до економічної ефективності напрямку, а його надмірна інтенсивність може утруднити процес формоутворення деталі.

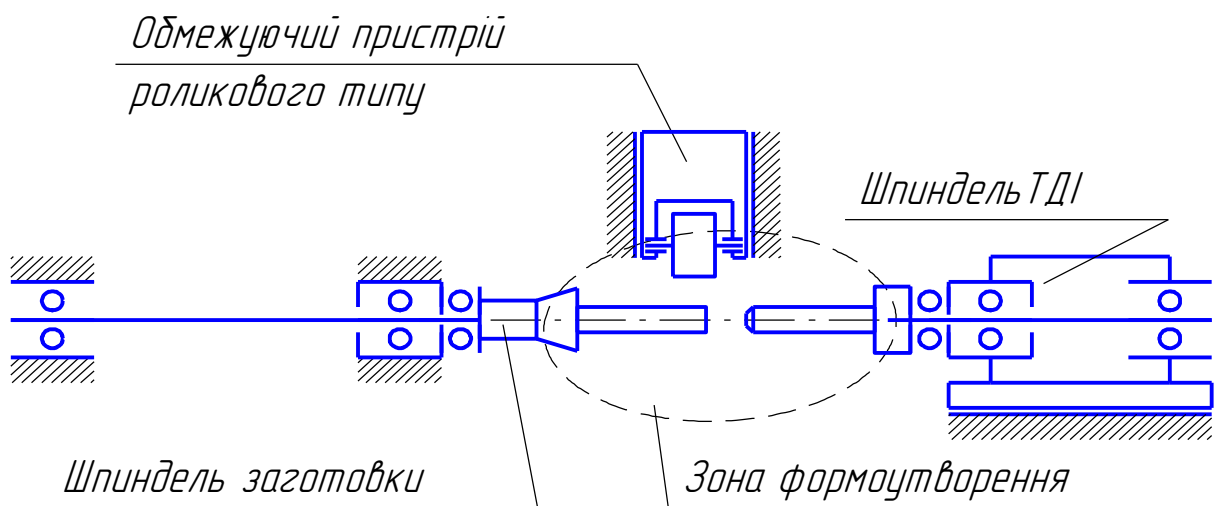


Рисунок 1.1 – Варіант типової компоновки технологічної системи фрикційного формоутворення

У тіло шпинделя, що несе ТДІ, шляхом кондуктивної теплопередачі на перших циклах поступає близько 17% загального тепла, генерованого на робочій поверхні ТДІ. В подальшому ця доля тепла поступово зменшується. Проте, на відміну від шпинделя заготовки, накопичення тепла в інструментальному

шпинделі фактично безперервне. Адже поверхня теплогенерації не змінює свого положення у системі координат опор шпинделя, тепло не виноситься із робочої зони разом із масою сформованої деталі, як це має місце з теплом, що поступає в бік заготовки. Інструмент, накопичивши тепло в робочій фазі нагріву та деформації, віддає його шпинделю в фазі доробок напівфабрикату. Таке тепло відіграє корисну роль на початковій стадії процесу, зменшуючи час, необхідний для початкового прогріву зони формоутворення. Шпиндель ТДІ по визначенню мусить мати невелику масу та об'єм, звідси його мала тепломісткість. В сукупності з нерозвинутими поверхнями теплоскиду це сприяє швидкому перегріву опор інструментального шпинделя, які до того ж самі є джерелом тепла.

Тому керування тепловими потоками, зокрема в безпосередній близькості від передніх опор шпинделів технологічної машини, є вельми актуальною проблемою. Теплове розвантаження опор такої машини вимагає пошуку оптимальних точок тепловідводу та ефективних, керуємих методів теплоскиду, які здатні забезпечити захист підшипників від надмірних теплових потоків та стабілізації температурного режиму їх роботи в межах, звичайно установлених для опор металорізальних верстатів. Такий захист вимагає збору великої кількості статистичної інформації про тепловий режим їх роботи, яка є унікальною для кожної конкретної конфігурації та розмірів деталі і структури технологічної операції. Якісна діаграма температур у автоматичному циклі виготовлення деталей представлена на рисунку 1.2 [16, 17].

Ключовим фактором, що визначає пружні деформації та відповідні переміщення в системі ВПД є осьова сила.

Деформація відносно холодного металу у перші секунди циклу, при безперервному русі ТДІ, спричиняє її різкий ріст. Керування зусиллям, наприклад, у функції швидкості робочого ходу, величини пройденого шляху чи зворотного зв'язку по осьовому зусиллю є перспективним напрямком з точки зору підвищення стабільності технологічної операції. Звідси виникає необхідність активного адаптивного контролю діючого осьового зусилля, для

чого може бути використаний сигнал про величину напружень у коромислі кулачкового механізму подачі. Обмежуючи максимально допустиме осьове зусилля та програмуючи відрізок часу витримки притискання ТДІ до заготовки, з залученням відповідного адаптивного механізму маємо змогу використати кулачок з постійним кроком спіралі.

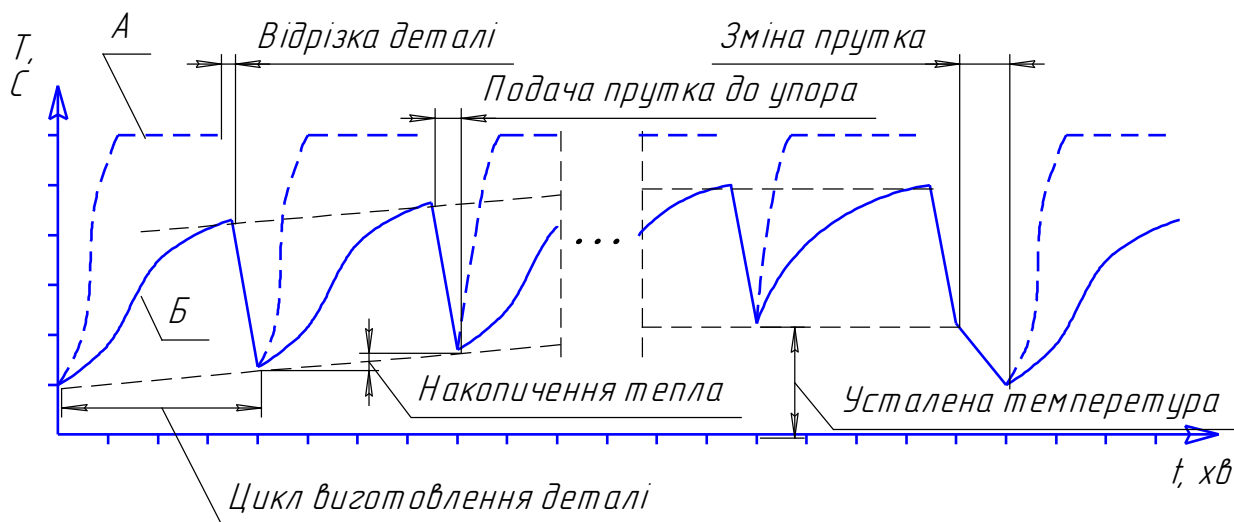


Рисунок 1.2 – Якісна діаграма температур у автоматичному циклі виготовлення деталей: А – на поверхні теплогенерації, Б – на робочій поверхні цанги.

Деформація відносно холодного металу у перші секунди циклу, при безперервному русі ТДІ, спричиняє її різкий ріст. Керування зусиллям, наприклад, у функції швидкості робочого ходу, величини пройденого шляху чи зворотного зв'язку по осьовому зусиллю є перспективним напрямком з точки зору підвищення стабільності технологічної операції. Звідси виникає необхідність активного адаптивного контролю діючого осьового зусилля, для чого може бути використаний сигнал про величину напружень у коромислі кулачкового механізму подачі. Обмежуючи максимально допустиме осьове зусилля та програмуючи відрізок часу витримки притискання ТДІ до заготовки, з залученням відповідного адаптивного механізму маємо змогу використати кулачок з постійним кроком спіралі.

Вищеописаний теплосиловий моніторинг технологічної машини, потребує використання мікропроцесорної техніки, яка дає можливість в реальному часі

аналізувати динаміку розповсюдження тепла, контролювати силові параметри процесу та мікропереміщення в системі і, на базі накопленої статистики, диференційовано вживати заходи по відведенню тепла та керування діючими зусиллями.

З вищевикладеного можна сформулювати функції програмованого модуля контролю та керування, розділивши їх на функціональні контури:

- стабілізація теплового режиму опор шпинделів за інтегральним значенням контрольованої температури у декількох точках або в одній точці, яка характеризує загальну температуру шпинделя, за певний проміжок часу, з метою забезпечення довготривалості опор;

- керування осьовим зусиллям, з метою стабілізації процесу та підвищення його надійності, шляхом безступеневої зміни частоти обертання двигуна приводу розподільчого валу.

Для розв'язання поставлених задач необхідно розробити на сучасному рівні таку систему автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення, яка б забезпечувала довготривалість автоматизованого виробництва деталей шляхом стабілізації температурного режиму опорних механізмів та осьового зусилля в робочій зоні формоутворення.

Проектуєма система автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення повинна забезпечувати температурний моніторинг та підтримку температури формоутворюючого елемента в межах  $45 \div 75^{\circ}\text{C}$ , що забезпечує стабільність процесу, захист підшипників від надмірних теплових потоків та теплове розвантаження опор шпинделів теплової машини. Заданий температурний режим забезпечується шляхом прокачування масла через підшипник формоутворюючого елемента при досягненні ним температури  $75^{\circ}\text{C}$  та вимкнення двигуна насоса при досягненні  $45^{\circ}\text{C}$ .

Також система повинна забезпечувати стабілізацію осьового зусилля в момент дотику формоутворюючого елемента до заготовки для усунення його деформуючої дії на станину теплової машини та стабілізації процесу формоутворення. Величина осьового зусилля задається оператором в залежності

від матеріалу заготовки. Підтримка заданого значення осьового зусилля здійснюється шляхом регулювання швидкості обертання приводу подачі заготовки мікропроцесорною системою автоматичного управління за заданим законом регулювання.

Розроблювана система автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення призначена для автоматичного регулювання температурного режиму процесу фрикційного формоутворення та для обмеження осьового зусилля в момент початку формоутворення.

## 2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ

Верстат можна представити [19] як технологічний комплекс автономно діючих механізмів, зв'язок між якими забезпечується зовнішнім управлінням. Як відмічалось в першому розділі, процес фрикційного формоутворення є результатом дії декількох рухів: головного робочого руху (обертання ТДІ, заготовки або і того, і другого одночасно і зустрічно); основного формоутворюючого руху (осьова подача ТДІ); допоміжного формуючого руху (обертальний рух заготовки, який забезпечує роботу обкатуючих валків) та додаткового формоутворюючого радіального руху обкатуючих валків (фасонна обробка зовнішньої поверхні деталі). Виконання кожного із цих рухів забезпечує окремий автономно діючий механізм. Тому, автоматизація процесу виготовлення деталей методом фрикційного формоутворення полягає в послідовному введенні в дію (включенні і виключенні) того або іншого руху відповідно до заданого алгоритму. Деякі рухи можуть виконуватися одночасно. При цьому автоматизація, яка заміщує впорядковану і логічну дію людини, відноситься до зв'язуючого зовнішнього управління.

Зрозуміло, що найбільш досконалою і гнучкою системою управління є людина. Вона розумно приймає рішення перед виконанням кожної наступної дії, враховуючи при цьому результати попередньої (зворотній зв'язок). Але маючи перевагу в головному, людина програє засобам автоматизації при виконанні циклічної рутинної роботи на виробництві. Саме автоматизація технологічних процесів дає можливість вивільнити людину із самого процесу виробництва, залишаючи за нею лише функції контролю та корегування. Засоби автоматизації можуть бути як жорсткими, так і гнучкими. До жорстких засобів автоматизації можна віднести кінцеві автомати на базі механічних, електромеханічних та електронних пристроїв. Усі дії в цій системі виконуються в жорстко встановленій послідовності і у задані терміни – це система програмного керування. Ніяке корегування в процесі виготовлення деталей ця система не

передбачає. Система програмного керування, на відміну від систем програмного регулювання, крім того, що мають розімкнену схему, повинні згідно із заданою задалегідь програмою ще й забезпечувати відповідну зміну роботи об'єкта. При цьому потрібна робоча інформація може існувати у вигляді кулачків, профільних дисків, програм. В такий спосіб програмуються необхідні зміни технологічного процесу. До жорстких систем автоматичного керування в оброблюваних верстатах відносяться рознесені в просторі кулачкові механізми із жорсткою або змінною конфігурацією поверхні, системи з ЧПК, що містять електромеханічні виконуючі елементи.

До гнучких систем автоматичного керування відносяться системи автоматичного регулювання, керування та самонастроювальні системи, обов'язковим елементом яких є наявність зворотнього зв'язку. Для підвищення якості дотримання технологічного процесу виготовлення деталей необхідно використовувати гнучкі системи автоматичного керування, які враховують зміни внутрішніх параметрів на робочій поверхні та в зоні формоутворення і зовнішніх параметрів (температура шпиндельних опор). Розробка такої системи потребує збільшення кількості точок контролю та обробки вхідної інформації за допомогою мікропроцесорних пристроїв.

При проектуванні систем автоматичного управління процесом фрикційного формоутворення в першу чергу вирішуються найбільш важливі задачі обробки, пов'язані з формоутворенням, шляхом пластичної деформації, та позиціонуванням.

На підставі номограм, технологічних таблиць, теорії фрикційного формоутворення, параметрів заготовки, ТДІ та кінцевої деталі вирішується задача програмування параметрів (кутова швидкість, осьовий тиск, температура в обробляючій системі) та взаємозв'язку описаних вище простих рухів, створюється програма усього циклу виготовлення деталі, яка відтворює складний рух шляхом сумування простих рухів:

При управлінні траєкторією та швидкістю руху використовують форму направляючих, які являються внутрішніми джерелами інформації простого

формування для будь-якого верстата, а проста траєкторія руху являється результатом копіювання форми направляючих.

В кулачкових системах управління в якості програмоносія використовуються моделі-аналоги обробки у вигляді раніше запрограмованих профілів кулачків. Сумування або синхронізація рухів здійснюється за рахунок встановлення і закріплення кулачків на загальному розподільчому валу. При обертанні цього валу рухи від робочих профілів кулачків через ричаг та товкач передаються на виконавчі пристрої, які здійснюють складне формування.

Кулачкові системи, які являються простішими по схемі автоматики контурними системами, відносять до незамкнених систем управління механічного типу через відсутність активного потоку інформації про фактичне місцезнаходження виконавчих пристроїв. Працездатність системи визначається використанням в якості програмоносія кулачків, які моделюють всі рухи робочого органу, тобто вміщують інформацію про величину переміщення.

За один оборот розподільчого валу здійснюється повний цикл обробки. Змінюючи профіль кулачків можна отримати будь-який закон зміни шляху руху робочого органу та швидкості руху. Однак профіль повинен враховувати як динамічні властивості механізму передачі руху, так і можливе заклинювання товкача. Враховуються також обмеження по швидкості обертання кулачка.

Зараз в даному верстаті фрикційного формування застосовується кулачкова система управління. Але вона не в змозі забезпечити поставлених вимог, тобто регулювання швидкості руху формуючого елемента саме в момент дотику до заготовки. Для цього система управління повинна мати датчик, який буде сповіщати систему про дотик формуючого елемента до заготовки і саме тоді повинне мати місце регулювання швидкості руху. А так як кулачкова система не має зворотного зв'язку, тобто є незамкнутою, то вона не може задовольнити висунутим вимогам.

До систем управління механічного типу належать також системи управління з контролем по шляху. Вони конструктивно достатньо прості, забезпечують дистанційне керування та мають необмежене по відстані

переміщення. Ці системи здійснюють контроль по шляху, а вкінці ходу рухаються зі зниженою швидкістю. Однак вони мають значний час переналадки та ускладнений контроль вводу інформації про переміщення та неможливість отримання складного формоутворення. Також мають невелику точність обробки, на яку впливає вільний вибіг виконавчого пристрою.

Також для управління траєкторією та швидкістю руху використовується числове програмне управління. Для його реалізації оператор повинен ввести відповідні дані на мові САП у вигляді послідовності операторів, які визначають геометрію готової деталі і заготовки, точність та шорсткість оброблюваних поверхонь. Тобто для використання такого управління нам потрібно точно знати відстань, яку пройде заготовка до моменту дотику з формоутворюючим елементом, щоб задати її у вигляді операторів. Але даний процес фрикційного формоутворення являється досить непередбачуваним для кожного типу заготовки та формоутворення, тому ми не можемо визначити відстань до моменту дотику заздалегідь. Також станки з ЧПУ є досить дорогими.

З вище сказаного можна зробити висновок, що для даного процесу формоутворення найбільш оптимальною буде така система управління, яка буде здійснювати контроль за процесом, тобто буде замкненою. Саме проектування такої системи являється метою даної дипломної роботи. Ця система оснащена датчиком початку процесу формоутворення, який сповіщає систему про те, коли саме потрібне управління, та датчиком тиску, на основі інформації від якого система управління керує швидкістю руху заготовки, тобто швидкістю обертання двигуна подачі заготовки.

Дана система управління повинна бути мікропроцесорною. Так як порівняно з системами управління на жорсткій логіці, мікропроцесорна система є більш динамічною та адаптивною, тобто для зміни швидкості або траєкторії потрібно буде змінювати лише сталі умовно – постійні параметри.

Всі процеси механічної обробки супроводжуються значними тепловиділеннями. В технологічному процесі фрикційного формоутворення теплота являється необхідною складовою процесу, але в деяких рамках. Тому,

що при виході температури за допустимі межі відбувається перегрівання тримача формоутворюючого елемента. Тому постає задача відводу надлишкової теплоти від формоутворюючого елемента.

В попередніх роботах по дослідженню даного технологічного процесу [7] було встановлено, що температура підшипника шпиндельних опор повинна знаходитись в межах  $45 \div 75^{\circ}\text{C}$  для забезпечення нормального ходу процесу формоутворення та відсутності браку. В вихідній установці охолодження здійснюється вручну, тобто оператор в певні моменти часу вмикає насос прокачки охолоджувальної рідини.

В даній магістерській роботі крім контролю моменту стиковки контр тіл та управління осьовим зусиллям, розроблювана мікропроцесорна система повинна також забезпечувати автоматичне регулювання температури.

### **3. ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ**

#### **3.1 Методика отримання розгінних кривих**

Як відмічалось вище, до основних недоліків діючої системи автоматичного управління процесом виготовлення деталей за методом фрикційного формоутворення було віднесено контроль осьового зусилля ТДІ та заготовки в момент їх початкового стикування та підтримка допустимого температурного режиму в шпіндельних опорах ТДІ. Для усунення цих недоліків і модернізації діючої системи автоматичного управління параметрами формоутворення необхідно спершу визначити динамічні моделі б'єктів управління, а саме: області формоутворення (робочої поверхні та кореневої зони формоутворення) з вихідним параметром - осьове зусилля  $P$  в місці стикування контртіл та підшипники опор формоутворюючого елемента з вихідним параметром – температурою. А для того щоб визначити математичні моделі цих об'єктів у формі передаточних функцій, необхідно провести серію експериментів для отримання їх розгінних кривих.

Як відомо, передаточні функції об'єктів управління параметрами процесу фрикційного формоутворення можна визначити по кривій розгону.

Розгінні криві отримують якщо на вхід досліджуваного об'єкта подається діяння типу „прямокутна сходинка”. Для об'єктів з самовирівнюванням (статичних) перехідний процес закінчується при досягненні вихідною величини нового усталеного значення  $y(\infty)$ . Експеримент планують таким чином, щоб для побудови кривої розгону було відмічено не менше 20 точок. Щоб виключити похибки вимірювання і вплив випадкових дій експеримент необхідно повторити не менше 3 разів.

Для отримання істотних передаточних функцій необхідно зняти розгінні криві об'єктів управління за наступними параметрами: осьові зусилля та температура. Для цього потрібно в реальному масштабі часу на вхід

досліджуваних об'єктів подати ступеневе діяння і зареєструвати залежність осьового зусилля та температури від часу.

Для визначення розгінної кривої об'єкту управління за осьовим зусиллям під'єднаємо до тензометричного мосту з чотирьох тензорезисторів на коромислі кулачкового механізму подачі заготовки тензометричну станцію „Топаз 3–3-01”. Підключемо до тензостанції осцилограф світлопроменевиий Н0712 (використовуємо дзеркальний гальванометр  $f_{\max} = 15$  КГц). Проводимо калібровку вимірювальної системи за допомогою динамометра системи Н. Г. Токаря (максимальне зусилля – 500 кГ, дозволяючи здатність – 1 кГ).

Далі проводимо виміри. Вмикаємо верстат і проводимо виготовлення чотирьох деталей за діючою технологією. При цьому одержуємо 4 осцилограми, які і являються розгінними кривими осьового зусилля.

Для отримання розгінної кривої об'єкту управління температурою вставляємо первинний перетворювач температури приладу DVM890 (діапазон виміру якого  $-50$  °С ÷  $+400$  °С; похибка  $\pm 0.75$  %; дозволяючи здатність – 1 °С) в спеціальний технологічний отвір кріплення підшипника опори шпинделя. Формоутворювача.

Вмикаємо верстат і проводимо виготовлення деталей, контролюючи температуру через кожні 5 хв. Верстат вмикаємо при досягненні усталеного значення температури.

При розігрітому до 100 °С підшипнику і ввімкненому верстаті вмикаємо систему охолодження (прокачка охолоджуючої рідини через кріплення підшипника) до досягнення температури навколишнього середовища. Значення температури фіксуємо кожні 2 хв.

Таким чином одержуємо розгінні криві нагріву та охолодження. Експеримент повторюємо 4 рази.

### 3.2 Визначення передаточної функції об'єкта управління осьовим зусиллям

Результати експерименту по дослідженню об'єкту управління осьовим зусиллям приведені в таблиці 3. 1.

Таблиця 3.1 – Результати виміру осьового зусилля

| Час t, с | Тиск P1, кГ | Тиск P2, кГ | Тиск P3, кГ | Тиск P4, кГ |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0        | 0           | 0           | 0           | 0           |
| 0.1      | 50          | 55          | 45          | 50          |
| 0.2      | 110         | 115         | 105         | 110         |
| 0.3      | 185         | 190         | 180         | 185         |
| 0.4      | 275         | 280         | 270         | 270         |
| 0.5      | 370         | 375         | 370         | 365         |
| 0.6      | 420         | 425         | 420         | 415         |
| 0.7      | 450         | 450         | 445         | 455         |
| 0.8      | 470         | 470         | 465         | 475         |
| 0.9      | 480         | 490         | 475         | 485         |
| 1        | 495         | 495         | 485         | 500         |
| 1.1      | 500         | 495         | 495         | 500         |
| 1.2      | 500         | 500         | 495         | 500         |
| 1.3      | 500         | 500         | 495         | 500         |
| 1.4      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 1.5      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 1.6      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 1.7      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 1.8      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 1.9      | 500         | 500         | 500         | 500         |
| 2        | 500         | 500         | 500         | 500         |

Графіки розгінних кривих осьового зусилля зображені на рисунку 3.1.

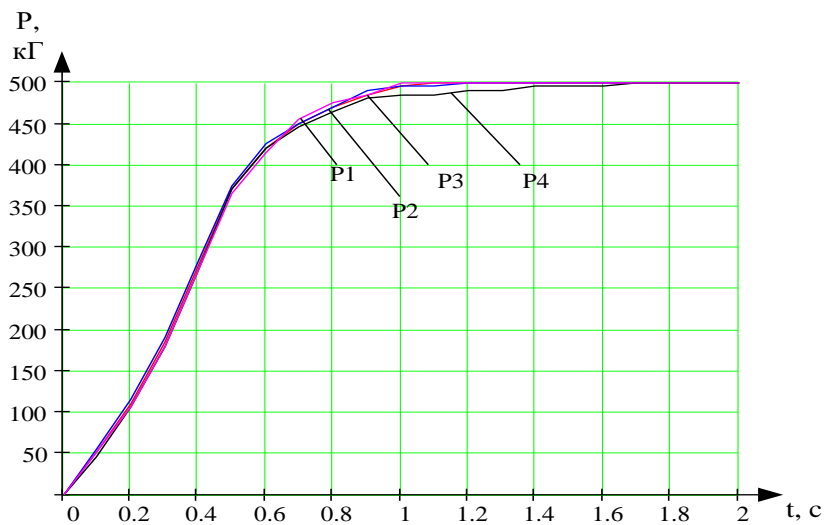


Рисунок 3.1 – Розгінні криві об’єкту управління осьовим зусиллям

Знаходимо усереднені значення розгінних кривих осьового зусилля, як середнє арифметичне ординат всіх кривих розгону для даного значення часу за формулою:

$$\bar{P}(i) = \sum_{j=1}^m \frac{P_j(i)}{m}, \quad (3.1)$$

де  $\bar{P}(i)$  – ордината усередненої кривої розгону в  $i$ -й точці;

$m$  – число кривих розгону ( $m=4$ ).

Результати усереднення наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Усередні результати зміни осьового зусилля

| Час $t$ , с | Тиск $\bar{P}$ , кГ | Час $t$ , с | Тиск $\bar{P}$ , кГ | Час $t$ , с | Тиск $\bar{P}$ , кГ |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| 0           | 0                   | 0.7         | 450                 | 1.4         | 500                 |
| 0.1         | 50                  | 0.8         | 470                 | 1.5         | 500                 |
| 0.2         | 110                 | 0.9         | 485                 | 1.6         | 500                 |
| 0.3         | 185                 | 1           | 495                 | 1.7         | 500                 |
| 0.4         | 275                 | 1.1         | 498                 | 1.8         | 500                 |
| 0.5         | 370                 | 1.2         | 498                 | 1.9         | 500                 |
| 0.6         | 420                 | 1.3         | 498                 | 2           | 500                 |

Перед обробкою розгінної кривої її потрібно спочатку пронормувати. Для цієї мети використаємо вираз:

$$\dot{P}(t_i) = \frac{P(t_i) - P(t_0)}{\Delta P(\infty)}, \quad (3.2)$$

де:  $\dot{P}(t_i)$  – нормоване значення ординати кривої розгону в момент часу  $t$ ;

$P(t_i)$  – значення ординати кривої розгону в момент часу  $t$ ;

$P(t_0)$  – значення ординати кривої розгону в момент часу  $t=0$ ;

$\Delta P(\infty)$  – приріст ординати вихідного діяння від  $t=0$  до  $t=\infty$ .

Нормована розгінна крива осьового зусилля представлена на рисунку 3.2.

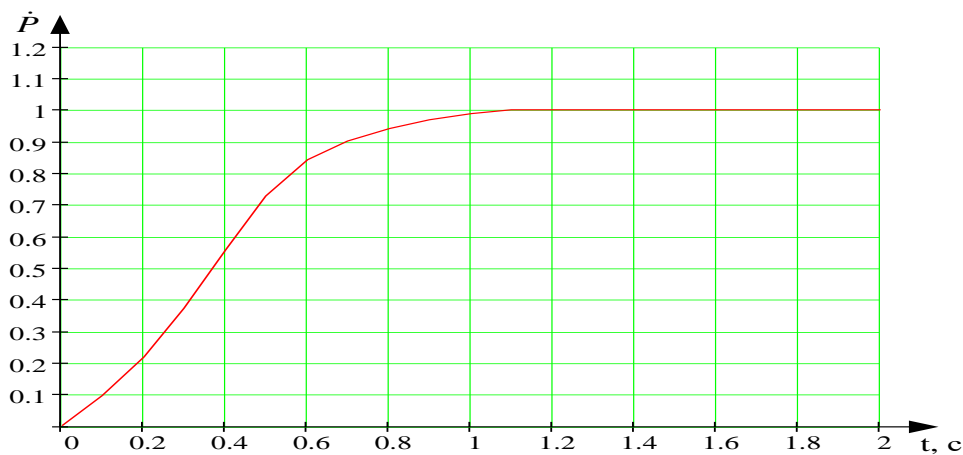


Рисунок 3.2 – Нормована розгінна крива осьового зусилля

При визначенні математичної моделі об'єкту управління за кривою розгону можна користуватися різними методами: методом дотичної до точки перегину кривої розгону ( точка переходу кривої від режиму прискорення до режиму уповільнення) – при визначенні передаточної функції інерційної ланки першого порядку; методом Орманса, який дозволяє знаходити постійні часу  $T_1, T_2$  - при визначенні моделі передаточної функції другого порядку; методом інтегральних площин або так званим методом М. Симою. Так як визначена за першими двома методами величина  $P_4 = 1,7$  нормованої розгінної кривої, що відповідає значенню часу  $t_4 = 0,167c$ , визначене за формулою  $t_4 = t_7/3$ , де  $t_7 = 0,5c$  відповідає значенню

$P_7=0,7$  нормованої кривої, менше фіксованої величини  $0,19$ , тобто  $P_4 < 0,19$ , то для визначення передаточної функції досліджуємого об'єкта необхідно примінити метод інтегральних площин. Таким чином, апроксимацію розгінної кривої осьового зусилля виконаємо за методом інтегральних площин (метод М. Симою). Він є достатньо широко розповсюджений завдяки високій точності. Цей метод дозволяє апроксимувати криву передаточною функцією вигляду:

$$W_{об}(p) = \frac{b_m \cdot p^m + b_{m-1} \cdot p^{m-1} + \dots + b_1 \cdot p + 1}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + 1} \cdot k_{об}, \quad (3.3)$$

де  $a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_m$  – постійні коефіцієнти;

$k_{об}$  – коефіцієнт підсилення об'єкта.

Апроксимацію виконаємо в наступній послідовності:

Розіб'ємо відрізок часу від моменту подачі вхідного діяння до моменту досягнення вихідної величини усталеного значення  $P(\infty)$  на рівні відрізки часу  $\Delta t = 0.1$ с так, щоб на кожній ділянці крива розгону мало відрізнялася від прямої.

Поділивши значення  $\Delta P$  в кінці кожного інтервалу  $\Delta t$  на  $\Delta P(\infty)$  отримаємо безрозмірне значення  $\sigma(i\Delta t)$ , яке заносимо в третю графу таблиці.

Обчислимо значення  $1 - \sigma(i\Delta t)$  і занесемо його в четверту графу таблиці.

Підрахуємо суму чисел четвертого стовпця за формулою:

$$\sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] = 4.381 \quad (3.4)$$

Визначимо площу  $F1$  за формулою:

$$F1 \approx \Delta t \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] - 0.5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right\} = 0.388 \quad (3.5)$$

Змінюємо масштаб часу за формулою (3.6) і заносимо його в таблицю.

$$\Theta(i\Delta t) = \frac{i\Delta t}{F1} \quad (3.6)$$

В шосту графу заносимо значення  $1 - \Theta(i\Delta t)$ , а в сьому - значення  $(1 - \sigma)(1 - \Theta)$ , отримане перемноженням значень четвертого та шостого стовпців.

Підрахуємо суму чисел сьомої граfi за формулою:

$$\sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] \cdot [1 - \Theta(i\Delta t)] = 1.813 \quad (3.7)$$

Визначимо площу F2 за формулою:

$$F2 = F1 \cdot \Delta t \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] \cdot [1 - \Theta(i\Delta t)] - 0.5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right\} = 0.051 \quad (3.8)$$

Розраховуємо і заносимо в восьму графу значення  $1 - 2\Theta + \Theta^2/2$ , а в дев'яту - значення  $(1 - \sigma)(1 - 2\Theta + \Theta^2/2)$ , отримане перемноженням значень величин в четвертому та восьмому стовпцях.

Підрахуємо суму чисел дев'ятого стовпця за формулою:

$$\sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \Theta(i\Delta t) + \frac{\Theta^2(i\Delta t)}{2} \right] = 0.617 \quad (3.9)$$

Визначаємо площу F3 за формулою:

$$F3 \approx F1^2 \cdot \Delta t \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \Theta(i\Delta t) + \frac{\Theta^2(i\Delta t)}{2} \right] - 0.5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right\} = 0.0017 \quad (3.10)$$

На цьому розрахунки можна обмежити.

Таблиця 3.3 – Розрахунки за методом М. П. Симою

| Час t,<br>с | $\Delta \tilde{P}$ | $\sigma(i\Delta t)$ | $1 - \sigma(i\Delta t)$ | $\Theta(i\Delta t)$ | $1 - \Theta(i\Delta t)$ | $(1 - \sigma)(1 - \Theta)$ | $1 - 2\Theta + \Theta^2/2$ | $(1 - \sigma)(1 - 2\Theta + \Theta^2/2)$ |
|-------------|--------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| 0           | 0                  | 0                   | 1                       | 0                   | 1                       | 1                          | 1                          | 1  |
| 0.1         | 48                 | 0.1                 | 0.9                     | 0.25                | 0.75                    | 0.67                       | 0.51                       | 0.46                                     |
| 0.2         | 110                | 0.22                | 0.78                    | 0.51                | 0.49                    | 0.37                       | 0.1                        | 0.08                                     |
| 0.3         | 185                | 0.37                | 0.63                    | 0.77                | 0.23                    | 0.14                       | -0.24                      | -0.15                                    |
| 0.4         | 278                | 0.55                | 0.45                    | 1.03                | -0.03                   | -0.01                      | -0.53                      | -0.23                                    |
| 0.5         | 363                | 0.72                | 0.28                    | 1.28                | -0.28                   | -0.07                      | -0.74                      | -0.2                                     |
| 0.6         | 421                | 0.84                | 0.16                    | 1.55                | -0.55                   | -0.08                      | -0.89                      | -0.14                                    |
| 0.7         | 450                | 0.9                 | 0.1                     | 1.8                 | -0.8                    | -0.06                      | -0.98                      | -0.09                                    |
| 0.8         | 470                | 0.94                | 0.06                    | 2.06                | -1.06                   | -0.04                      | -0.99                      | -0.05                                    |

| Час t,<br>с | $\Delta\tilde{P}$ | $\sigma(i\Delta t)$ | $1 - \sigma(i\Delta t)$ | $\Theta(i\Delta t)$ | $1 - \Theta(i\Delta t)$ | $(1 - \sigma)(1 - \Theta)$ | $1 - 2\Theta + \Theta^2/2$ | $(1 - \sigma)(1 - 2\Theta + \Theta^2/2)$ |
|-------------|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| 0.9         | 485               | 0.97                | 0.03                    | 2.31                | -1.31                   | -0.01                      | -0.94                      | -0.02                                    |
| 1           | 495               | 0.99                | 0.01                    | 2.57                | -1.57                   | 0                          | -0.83                      | -0.01                                    |
| 1.1         | 499               | 1                   | 0                       | 2.83                | -1.83                   | 0                          | -0.75                      | 0  |
| 1.2         | 500               | 1                   | 0                       | 3.09                | -2.09                   | 0                          | -0.4                       | 0  |
| 1.3         | 500               | 1                   | 0                       | 3.35                | -2.35                   | 0                          | -0.08                      | 0  |
| 1.4         | 500               | 1                   | 0                       | 3.6                 | -2.6                    | 0                          | 0.29                       | 0  |
| 1.5         | 500               | 1                   | 0                       | 3.86                | -2.86                   | 0                          | 0.73                       | 0  |
| 1.6         | 500               | 1                   | 0                       | 4.12                | -3.12                   | 0                          | 1.25                       | 0  |
| 1.7         | 500               | 1                   | 0                       | 4.38                | -3.38                   | 0                          | 1.83                       | 0  |
| 1.8         | 500               | 1                   | 0                       | 4.63                | -3.63                   | 0                          | 2.47                       | 0  |
| 1.9         | 500               | 1                   | 0                       | 4.89                | -3.89                   | 0                          | 3.19                       | 0  |
| 2           | 500               | 1                   | 0                       | 5.15                | -4.15                   | 0                          | 3.97                       | 0  |

Знайдемо вигляд передаточної функції. Якщо  $\tilde{P}(0) = 0$  та  $\tilde{P}'(0) = 0$ , то порядок чисельника в формулі () по крайній мірі на дві одиниці менше порядку знаменника. Практично в цьому випадку можна прийняти безрозмірну передаточну функцію об'єкту вигляду:

$$W_{об}^*(p) = \frac{1}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}, \quad (3.11)$$

де  $a_1 = F1$ ,  $a_2 = F2$ ,  $a_3 = F3$ .

Підставивши значення інтегральних площ, отримаємо безрозмірну передаточну функцію виду:

$$W_{об}^*(p) = \frac{1}{0.0017 \cdot p^3 + 0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1} \quad (3.12)$$

Безрозмірна передаточна функція представляє собою коливальну ланку третього порядку, але коефіцієнт при  $p^3$  є малою величиною порівняно з іншими коефіцієнтами, тому ним можна знехтувати. Тоді безрозмірна передаточна функція буде мати вигляд:

$$W_{об}^*(p) = \frac{1}{0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1}, \quad (3.13)$$

тобто представляти собою коливальну ланку другого порядку. Для порівняння на рисунку 3.3 приведені перехідні характеристики обох передаточних функцій.

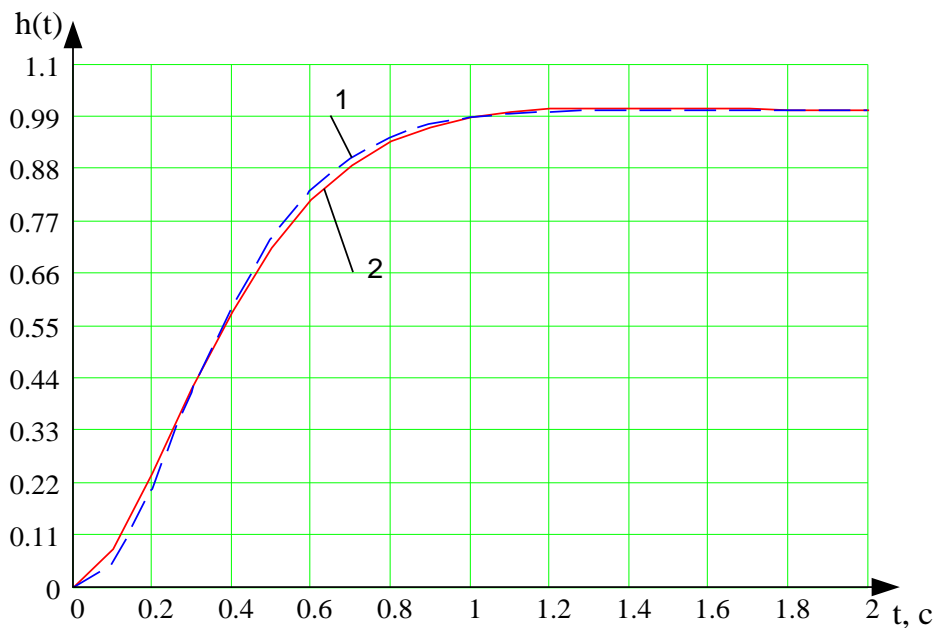


Рисунок 3.3 – Перехідні характеристики коливальних ланок третього (1) та другого (2) порядків.

Як видно з рисунку, перехідні характеристики мало відрізняються одна від одної, тому в подальших розрахунках будемо використовувати передаточну функцію коливальної ланки другого порядку, як безрозмірну передаточну функцію об'єкта управління осьовим зусиллям.

Коефіцієнт підсилення об'єкта визначимо за формулою:

$$k_{об} = \frac{\Delta \tilde{P}(\infty)}{\Delta x} = \frac{500 \text{кГ}}{220 \text{В}} = 2.273 \text{кГ/В}, \quad (3.14)$$

де  $\Delta x$  – значення вхідного діяння.

Тоді передаточна функція об'єкту управління буде мати вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{2.273}{0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1}. \quad (3.15)$$

### 3.3 Визначення передаточної функції об'єкта управління температурою

Результати експерименту по зниженню температури об'єкту управління представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати виміру температури.

| Час $t$ , с | Температура $T1^{\circ}\text{C}$ | Температура $T2^{\circ}\text{C}$ | Температура $T3^{\circ}\text{C}$ | Температура $T4^{\circ}\text{C}$ | Температура $\bar{T}^{\circ}\text{C}$ |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 0           | 100                              | 100                              | 100                              | 100                              | 100                                   |
| 120         | 84                               | 80                               | 87                               | 85                               | 84                                    |
| 240         | 72                               | 68                               | 75                               | 73                               | 72                                    |
| 360         | 62                               | 60                               | 65                               | 61                               | 62                                    |
| 480         | 55                               | 50                               | 57                               | 58                               | 55                                    |
| 600         | 48                               | 44                               | 50                               | 50                               | 48                                    |
| 720         | 42                               | 40                               | 44                               | 42                               | 42                                    |
| 840         | 39                               | 35                               | 42                               | 40                               | 39                                    |
| 960         | 35                               | 33                               | 39                               | 33                               | 35                                    |
| 1080        | 32                               | 31                               | 35                               | 30                               | 32                                    |
| 1200        | 30                               | 28                               | 33                               | 29                               | 30                                    |
| 1320        | 28                               | 26                               | 31                               | 27                               | 28                                    |
| 1440        | 26                               | 24                               | 29                               | 25                               | 26                                    |
| 1560        | 25                               | 24                               | 27                               | 24                               | 25                                    |
| 1680        | 24                               | 23                               | 26                               | 23                               | 24                                    |
| 1800        | 23                               | 23                               | 25                               | 23                               | 23                                    |
| 1920        | 23                               | 22                               | 24                               | 23                               | 23                                    |
| 2040        | 22                               | 22                               | 23                               | 21                               | 22                                    |
| 2160        | 22                               | 22                               | 23                               | 21                               | 22                                    |
| 2280        | 22                               | 21                               | 22                               | 21                               | 22                                    |
| 2400        | 21                               | 21                               | 22                               | 20                               | 21                                    |
| 2520        | 21                               | 20                               | 22                               | 21                               | 21                                    |
| 2640        | 20                               | 20                               | 21                               | 21                               | 21                                    |
| 2760        | 20                               | 20                               | 20                               | 20                               | 20                                    |
| 2880        | 20                               | 20                               | 20                               | 20                               | 20                                    |
| 3000        | 20                               | 20                               | 20                               | 20                               | 20                                    |

Одержані розгінні криві об'єкта управління температурою зображені на рисунку 3.4.

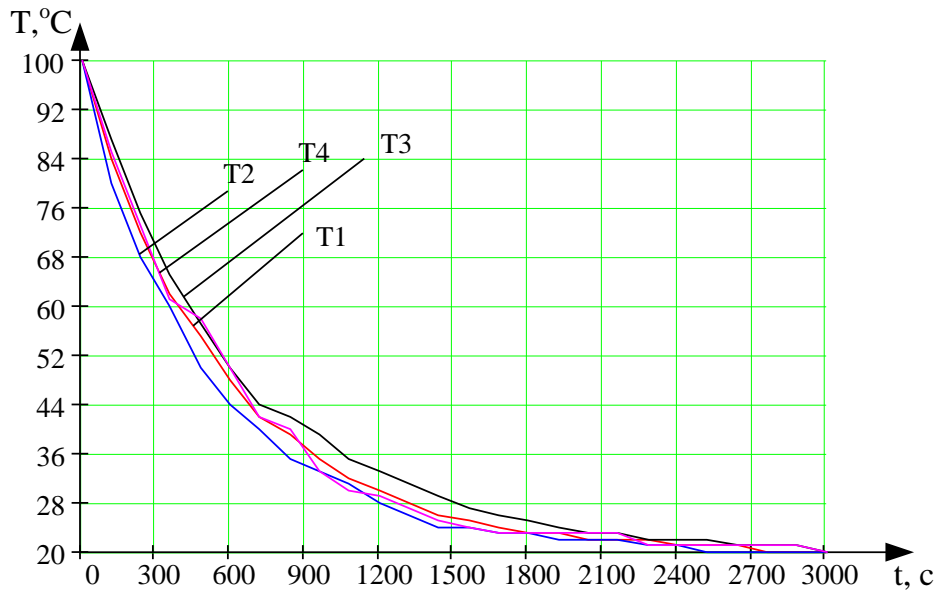


Рисунок 3.4 – Розгінні криві об'єкту управління температурою

Знаходимо усереднені значення температури за формулою (3.16), заносимо їх в таблицю 3.4.

$$\bar{T}(i) = \sum_{j=1}^m \frac{T_j(i)}{m}, \quad (3.16)$$

де:  $\bar{T}(i)$  – ордината усередненої кривої розгону в і-й точці;

m – число кривих розгону (m=4).

Усереднена розгінна крива зображена на рисунку 3.7. На підставі усереднених значень виконуємо розрахунок зглаженої розгінної кривої температури і представляємо її рисунком 3.8..

Нормування розгінної кривої виконуємо за формулою

$$\dot{T}(t_i) = \frac{\bar{T}(t_i) - \bar{T}(t_0)}{\Delta \bar{T}(\infty)}, \quad (3.17)$$

де  $\dot{T}(t_i)$  – нормоване значення ординати кривої розгону в момент часу t;

$\bar{T}(t_i)$ ,  $\bar{T}(t_0)$  – значення ординати кривої розгону в момент часу t та t=0;

$\Delta\bar{T}(\infty)$  – приріст ординати вихідного діяння від  $t=0$  до  $t=\infty$ .

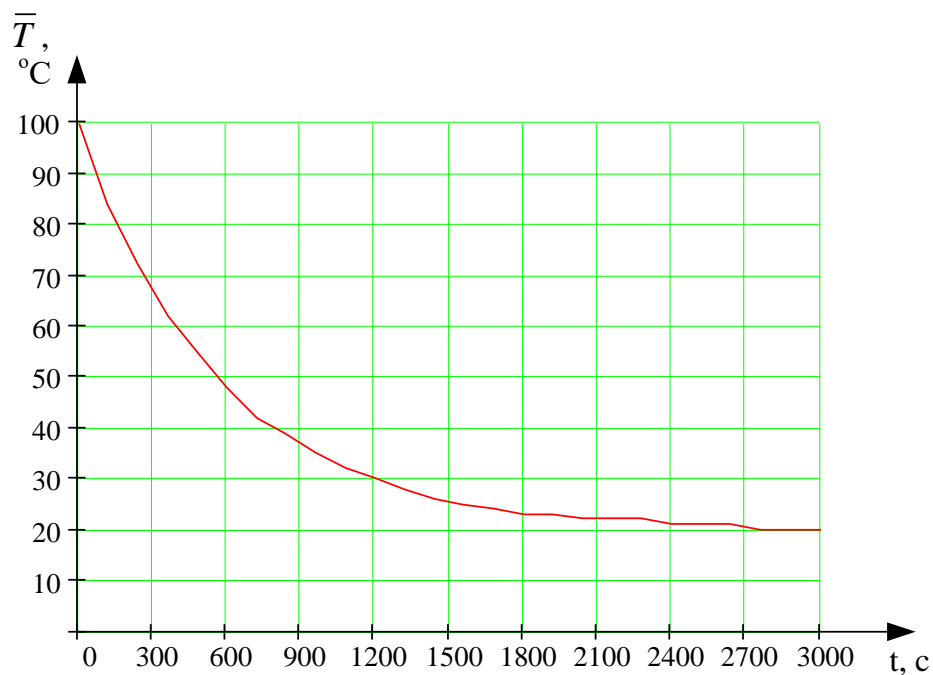


Рисунок 3.5 – Усереднена розгінна крива об'єкта управління температурою

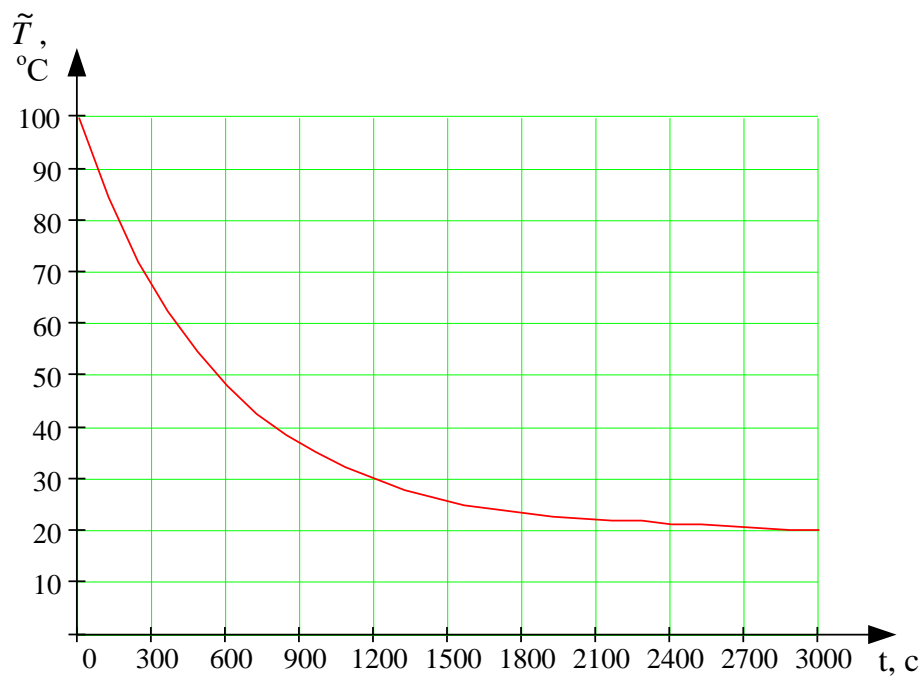


Рисунок 3.6 – Згладжена розгінна крива об'єкта управління температурою

Результати нормування заносимо в таблицю 3.5. Побудуємо графік віднормованої розгінної кривої температури і представимо його на рисунку 3.7.

Таблиця 3.5 – Результати нормування кривої температури

| Час $t$ , с | Температура $\dot{T}$ , °C | Час $t$ , с | Температура $\dot{T}$ , °C | Час $t$ , с | Температура $\dot{T}$ , °C |
|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| 0           | 0                          | 1080        | 0.87                       | 2160        | 1                          |
| 120         | 0.19                       | 1200        | 0.9                        | 2280        | 1                          |
| 240         | 0.36                       | 1320        | 0.92                       | 2400        | 1                          |
| 360         | 0.48                       | 1440        | 0.95                       | 2520        | 1                          |
| 480         | 0.58                       | 1560        | 0.96                       | 2640        | 1                          |
| 600         | 0.66                       | 1680        | 0.97                       | 2760        | 1                          |
| 720         | 0.73                       | 1800        | 0.98                       | 2880        | 1                          |
| 840         | 0.79                       | 1920        | 0.99                       | 3000        | 1                          |
| 960         | 0.83                       | 2040        | 1                          |             |                            |

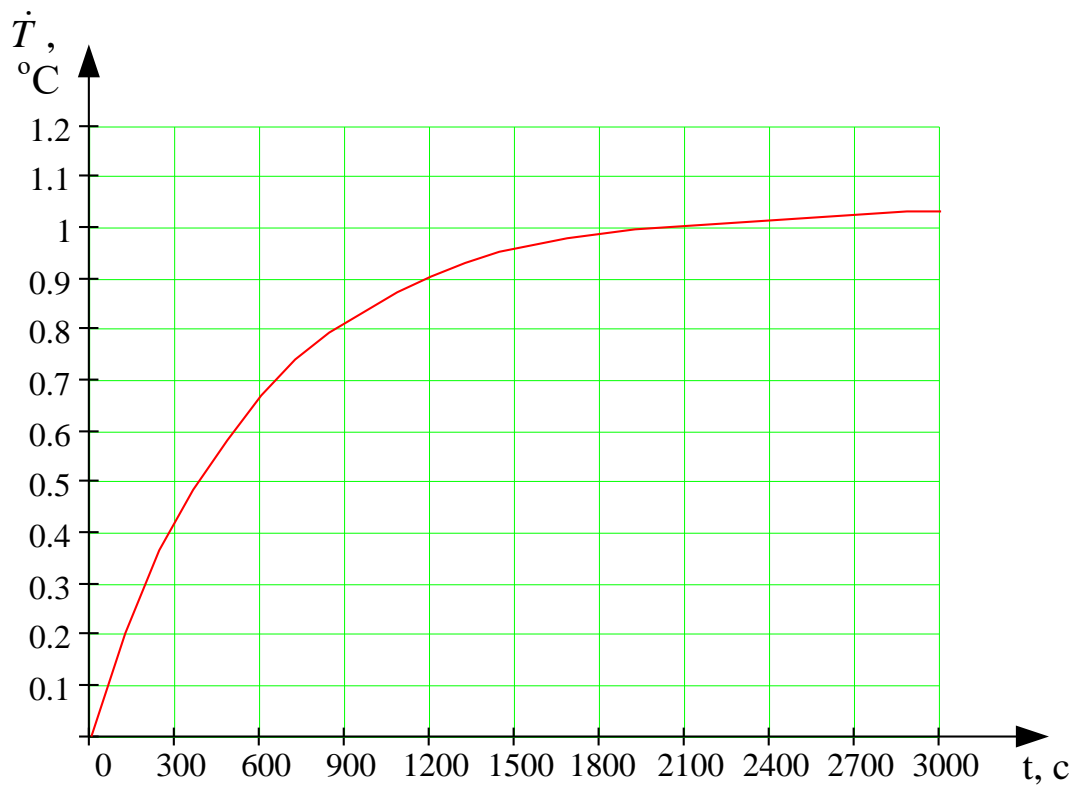


Рисунок 3.7 – Нормована розгінна крива об'єкта управління температурою.

Апроксимацію розгінної кривої об'єкта управління температурою проведемо графічно-аналітичним методом, а саме, методом дотичної до розгінної кривої в точці перегину. Він дозволяє визначити параметри передаточної функції інерційної ланки 1-го порядку:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} \cdot e^{-p \cdot \tau}}{T \cdot p + 1}, \quad (3.18)$$

де  $k_{об}$  – коефіцієнт підсилення об'єкта;

$\tau$  – час чистого запізнювання;

$T$  – постійна часу об'єкта.

Виходячи з нормованої кривої можна прийти до висновку, що даний об'єкт управління запізнення не має –  $\tau=0$ .

Постійну часу визначимо за формулою:

$$T = -\frac{t_A - \tau_D}{\ln(1 - \dot{T}_A)} \quad (3.19)$$

де  $t_A$  – час який відповідає відмітці часу в точці перегину нормованої кривої розгону;

$\dot{T}_A$  – значення температури в момент часу  $t_A$ ;

$\tau_D$  - величина динамічного запізнення.

Максимальний приріст ординати спостерігається на ділянці  $\Delta t=0...120$ с.

Тому приймаємо точку перегину  $t_A=120/2=60$ с. Тоді  $\dot{T}_A = 0.11$ ,  $\tau_D = 0$ .

Підставивши ці значення в формулу (3.19) отримаємо:

$$T = -\frac{t_A - \tau_D}{\ln(1 - \dot{T}_A)} = -\frac{60}{\ln(1 - 0.11)} = 522\text{с} \quad (3.20)$$

Коефіцієнт передачі розрахуємо по формулі:

$$k_{об} = \frac{\Delta \tilde{T}(\infty)}{\Delta x} = \frac{(20-100) \text{ } ^\circ\text{C}}{380\text{В}} = 0.211 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{В} \quad (3.21)$$

Тоді передаточна функція об'єкта управління температурою буде мати вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{0.211}{522 \cdot p + 1}. \quad (3.22)$$

Результати експерименту по одержанню кривої нагріву представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати експерименту по одержанню кривої нагріву

| Час t, с | Температура T1, °C | Температура T2, °C | Температура T3, °C | Температура T4, °C | Температура $\tilde{T}$ , °C |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 0        | 20                 | 20                 | 20                 | 20                 | 20                           |
| 300      | 38                 | 37                 | 38                 | 39                 | 38                           |
| 600      | 53                 | 51                 | 53                 | 54                 | 53                           |
| 900      | 62                 | 60                 | 63                 | 64                 | 62                           |
| 1200     | 68                 | 65                 | 69                 | 70                 | 68                           |
| 1500     | 74                 | 71                 | 75                 | 76                 | 74                           |
| 1800     | 79                 | 76                 | 80                 | 81                 | 79                           |
| 2100     | 82                 | 80                 | 83                 | 84                 | 82                           |
| 2400     | 85                 | 82                 | 86                 | 87                 | 85                           |
| 2700     | 88                 | 85                 | 89                 | 90                 | 88                           |
| 3000     | 90                 | 87                 | 91                 | 92                 | 90                           |
| 3300     | 92                 | 90                 | 92                 | 94                 | 92                           |
| 3600     | 94                 | 92                 | 94                 | 96                 | 94                           |
| 3900     | 95                 | 93                 | 95                 | 97                 | 95                           |
| 4200     | 96                 | 94                 | 97                 | 97                 | 96                           |
| 4500     | 97                 | 95                 | 97                 | 98                 | 97                           |
| 4800     | 97                 | 95                 | 97                 | 98                 | 97                           |
| 5100     | 98                 | 95                 | 98                 | 98                 | 98                           |
| 5400     | 98                 | 96                 | 98                 | 99                 | 98                           |
| 5700     | 98                 | 96                 | 98                 | 99                 | 98                           |
| 6000     | 99                 | 97                 | 99                 | 99                 | 99                           |
| 6300     | 99                 | 98                 | 99                 | 99                 | 99                           |
| 6600     | 99                 | 98                 | 99                 | 100                | 99                           |
| 6900     | 99                 | 99                 | 99                 | 100                | 99                           |
| 7200     | 100                | 100                | 100                | 100                | 100                          |
| 7500     | 100                | 100                | 100                | 100                | 100                          |

Одержані в результаті експерименту криві нагріву мають вигляд, зображений на рисунку 3.8.

Аналогічно знаходимо усереднені та згладжені значення кривої нагріву, які приведені в таблиці 3.6.

Усереднена та згладжена крива нагріву представлена на рисунку 3.9.

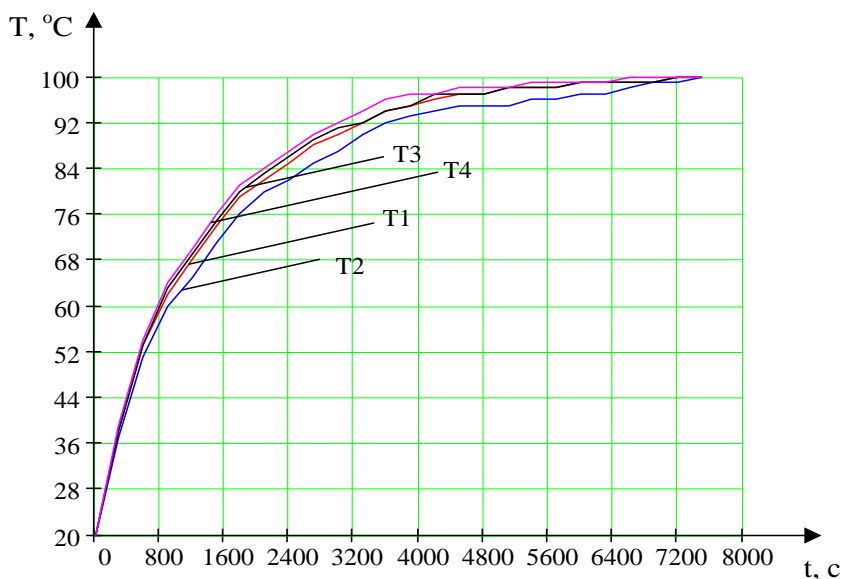


Рисунок 3.8 – Графік експериментальних кривих нагріву

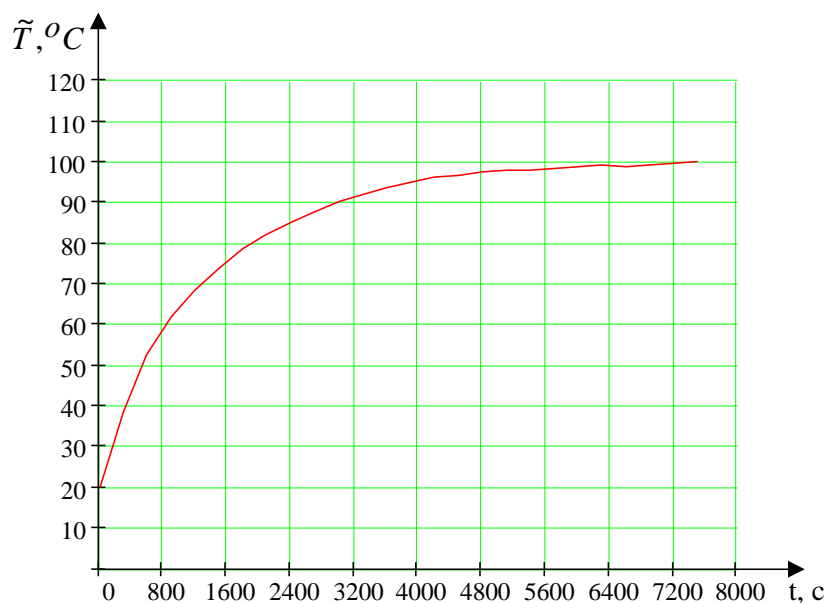


Рисунок 3.9 – Усереднена та згладжена крива нагріву

## 4. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ФРИКЦІЙНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

### 4.1 Розрахунок системи автоматичного управління осьовим зусиллям

Функціональна схема САУ осьовим зусиллям зображена на рисунку 4.1

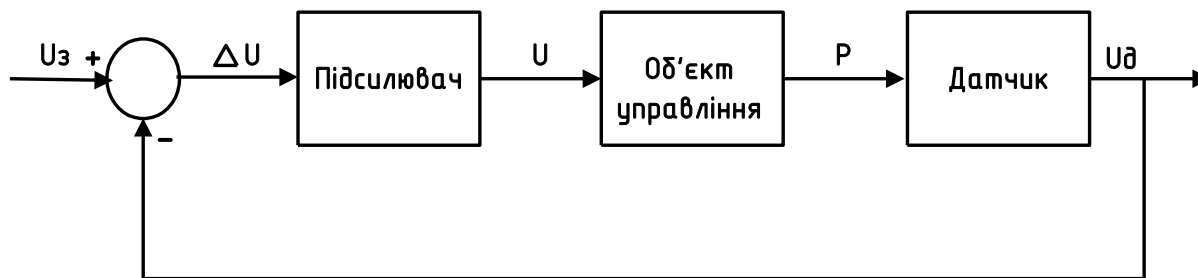


Рисунок 4.1 – Функціональна схема САУ осьовим зусиллям.

Де об'єкт управління має передаточну функцію вигляду:

$$W_{об}(p) = \frac{2.273}{0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1} \quad (4.1)$$

Підсилювач має коефіцієнт передачі  $k_n = 44$ , так як діапазон значень, які надходять на датчик  $0 \div 5\text{В}$ , тобто сигнал розузгодження на виході елемента порівняння також змінюється в цих межах. А на вхід об'єкта управління подається сигнал з граничним значенням  $220\text{В}$ , тобто коефіцієнт передачі масштабуючого підсилювача визначимо як:

$$k_n = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{220\text{В}}{5\text{В}} = 44 \quad (4.2)$$

Датчик має коефіцієнт передачі  $k_{д} = 0.01 \frac{\hat{\text{А}}}{\hat{\text{еА}}}$ . Так як на вхід елемента порівняння подається сигнал в діапазоні  $0 \div 5\text{В}$ , а вихідна величина об'єкта управління змінюється в діапазоні  $0 \div 500\text{кГ}$ , то коефіцієнт передачі датчика визначиться за формулою:

$$k_{\partial} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{5B}{500кГ} = 0.01 B/кГ \quad (4.3)$$

Тобто сигнал з виходу датчика можна напряму подавати на схему порівняння.

Звідси структурна схема САУ буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.2

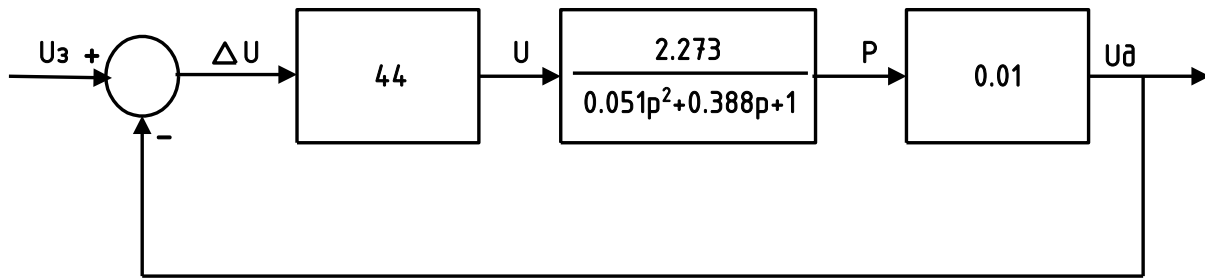


Рисунок 4.2 – Структурна схема САУ осьовим зусиллям.

Передаточна функція розімкнутої системи управління осьовим зусиллям буде мати вигляд:

$$W_p(p) = K_n \cdot W_{об}(p) \cdot K_{\partial} = \frac{1}{0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1} \quad (4.4)$$

Знайдемо передаточну функцію замкнутої системи за формулою:

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 2} \quad (4.5)$$

та побудуємо її перехідний процес за допомогою пакету математичних розрахунків MATCAD 14. Перехідна характеристика зображена на рисунку 4.3.

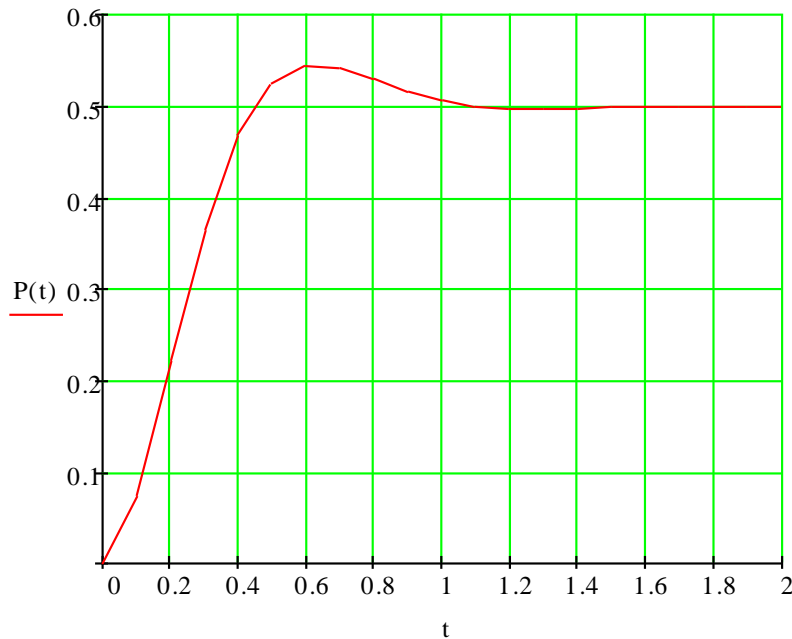
$$T1 := 0.1с \quad T2 := 0.19с \quad k := 0.5 \quad t := 0, 0.1..2 \quad X1 := 1 \quad a := \frac{T2}{2 \cdot T1^2}$$

$$\omega := \left( \frac{1}{T1} \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{T2^2}{4 \cdot T1^2}}$$

Рисунок 4.3 –

$$P(t) := k \cdot X1 \cdot \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{a^2}{\omega^2}} \cdot e^{-a \cdot t} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \operatorname{atan}\left(\frac{\omega}{a}\right)\right) \right)$$

Перехідна



характеристика системи автоматичного управління осьовим зусиллям.

Реакцією системи на зовнішнє діяння є перехідний процес. Ступінчате діяння є самим тяжким діянням для системи, тому якісні показники системи визначаємо саме при такому діянні.

Усталене значення, якого досягає регульована величина  $P_{уст}(t)=0.5$ .

Час, на протязі якого регульована величина досягає усталеного значення з заданою точністю  $\Delta=0.015$ , тобто час регулювання дорівнює  $t_p=1.2$ с.

Перерегулювання – максимальне відхилення вихідної величини від усталеного значення – визначимо за формулою:

$$\delta = \frac{P_{\max} - P_{уст}}{P_{уст}} \cdot 100\% = \frac{0.55 - 0.5}{0.5} \cdot 100\% = 10\% \quad (4.5)$$

Як бачимо з перехідної характеристики, система має статичну помилку  $\Delta P_{ст}$  – відхилення усталеного значення регульованої величини  $P_{уст}(t)$ , яке виникає після закінчення перехідного процесу  $P(t)$ , від заданого значення, коли всі

параметри в системі збурення є сталими величинами. Так як заданим значенням є одинична ступенева функція  $1(t)$ , статична помилка системи дорівнює  $\Delta P_{ст}=0.5$ .

При відповідному виборі постійної часу включення ізодромної ланки [15] не впливає або майже не впливає на запас стійкості системи.

Передаточну функцію розімкнутої системи управління осьовим зусиллям можна представити у вигляді:

$$W_p(p) = \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot p + 1}, \quad (4.6)$$

тобто:

$$W_p(p) = \frac{1}{0.226^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.86 \cdot 0.226 \cdot p + 1}, \quad (4.7)$$

де  $\zeta = 0.86$  – коефіцієнт демпфірування;

$T=0.226$ с – постійна часу.

Вибираємо постійну часу ізодромної ланки рівною постійній часу коливальної, тобто передаточної функції розімкнутої системи:  $T=T_{із}=0.226$ с. Для забезпечення швидкодії системи коефіцієнт передачі ізодромної ланки візьмемо рівним  $k_{із}=2$ . тоді передаточна функція коректуючої ізодромної ланки буде мати вигляд:

$$W_{3\zeta}(p) = \frac{2 \cdot (0.226 \cdot p + 1)}{p} \quad (4.8)$$

Тоді передаточна функція розімкнутої скоректованої системи буде мати вигляд:

$$W_{\tilde{n}\hat{e}.p}(p) = \frac{2 \cdot (0.226 \cdot p + 1)}{p \cdot (0.051 \cdot p^2 + 0.388 \cdot p + 1)} \quad (4.9)$$

Побудуємо логарифмічні амплітудну та фазову частотні характеристики за допомогою пакету математичних розрахунків MATLAB6.5. Вони будуть мати вигляд, зображений на рисунку 4.4.

По даним ЛАЧХ та ЛФЧХ визначимо запаси стійкості системи по фазі та по амплітуді. Запас стійкості по фазі:  $\varphi_3 = 70^\circ$ , що задовольняє вимогам до системи. Запас стійкості по амплітуді:  $L_3 > 60$  дБ, що також є задовільним.

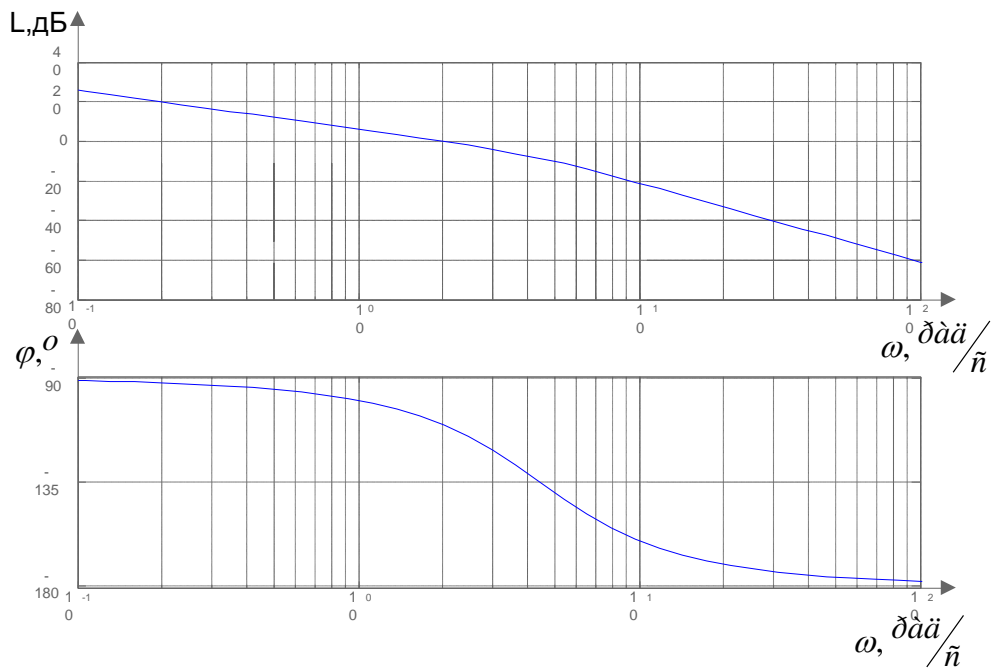


Рисунок 4.4 – Логарифмічні амплітудна та фазова частотні характеристики розімкненої скоректованої САУ осьовим зусиллям

Даний коректуючий алгоритм реалізуємо за допомогою мікроконтролера. Обчислювальні можливості керуючих мікроконтролерів (КМК), тобто таких мікроконтролерів, які на основі даних про процес або об'єкт виробляють сигнали керування, дають змогу реалізувати більш складні функції керування при більш високому ступені надійності. Також вони малогабаритні, мають малі енергетичні та вартісні показники. Функціональна схема скоректованої цифрової системи автоматичного управління осьовим зусиллям буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.5

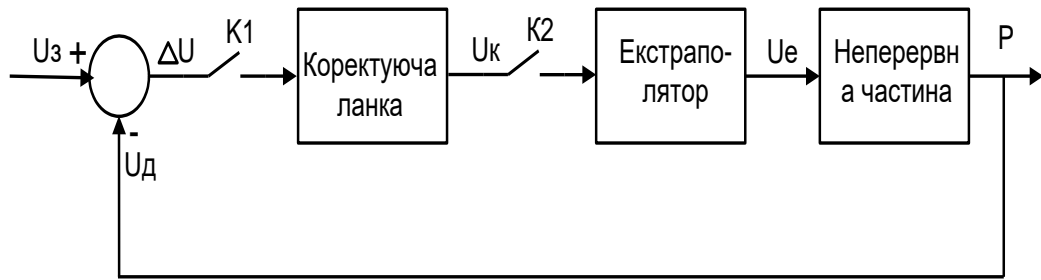


Рисунок 4.5 – Функціональна схема ЦСАУ осьовим зусиллям з коректуючою ланкою

Де K1 та K2 – ідеальні імпульсні елементи. Екстраполятор нульового порядку – формуючий елемент, який фіксує вихідний сигнал елемента квантування на період квантування неперервного сигналу. Тоді структурна схема ЦСАУ буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.6.

Перетворення неперервних сигналів у дискретні пов'язано з наявністю в системі дискретного елемента, на виході якого утворюється послідовність імпульсів. Таким елементом є ключ K1, який замикається через кожен період квантування  $T_k$ .

Задачу вибору оптимального періоду квантування  $T_k$  [24] можна віднести до однієї з основних проблем оптимальних витрат машинного часу під час реалізації систем цифрового управління. При зменшенні  $T_k$  точність керування і завантаженість мікроЕОМ збільшується, але при цьому неекономно витрачається машинний час. При збільшенні періоду квантування погіршується якість управління системи. Тому виникає проблема пошуку компромісного рішення для задоволення цих суперечливих вимог.

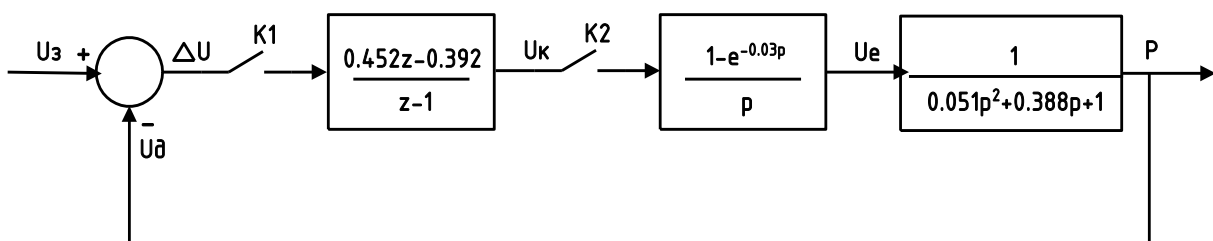


Рисунок 4.6 – Структурна схема ЦСАУ осьовим зусиллям з дискретною коректуючою ланкою

Залежно від спектра неперервної функції вибір періоду квантування здійснюється на підставі теореми Котельникова.

Теорема Котельникова. Функція часу, яка не містить гармонічних складових з частотами, вищим від частоти  $\omega_{\max}$ , повністю визначається своїми значеннями в моменти часу  $nT_k$ , що відстоять один від одного на періоди:

$$T_k = \frac{2\pi}{2\omega_{\max}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}}, \quad (4.10)$$

де частота квантування має бути вибрана відповідно до умови  $\omega \geq 2\omega_{\max}$ . У цьому випадку дискретна решітчаста функція відобразить неперервну функцію.

Максимальну частоту  $\omega_{\max}$  у спектрі вихідного сигналу  $\beta(j\omega)$  за амплітудно-частотною характеристикою замкненого контуру цифрового управління можна визначити за допомогою критерію Джурі. Якщо на вхід регулятора подавати гармонічний одиничний сигнал  $\alpha(t)=\sin(\omega t)$ , то вихідний сигнал замкненого контуру можна подати як функцію:

$$|\beta(j\omega)| = \left| \frac{W_p(j\omega)}{1+W_p(j\omega)} \right| = \theta_{0m}, \quad (4.11)$$

де  $\theta_{0m}$  – потрібна точність управління об'єктом в усталеному режимі ( $\theta_{0m} = 3\%$ ).

Звідси можна визначити частоту  $\omega_{\max}$ , при якій  $\beta(j\omega)$  матиме мале значення, тому що замкнена система згладжує високочастотні складові сигналу. Підставивши числові значення отримаємо, що  $\omega_{\max}=80$  рад/с і період дискретизації  $T_k=0.03$  с.

Проаналізувавши перехідну характеристику бачимо, що перерегулювання система не має, час регулювання  $t_p=1.2$ с, усталене значення  $h_{уст}(t)=1$ . Тобто дана система повністю задовольняє поставленим вимогам.

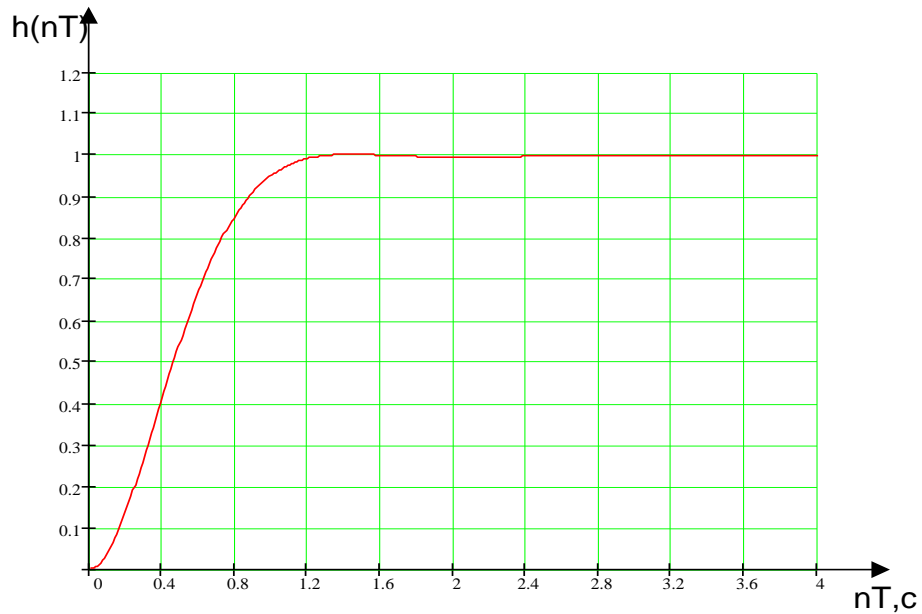


Рисунок 4.7 – Перехідна характеристика ЦСАУ осьовим зусиллям

## 4.2 Розрахунок системи автоматичного управління температурою

Функціональна схема системи управління температурою буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.8.

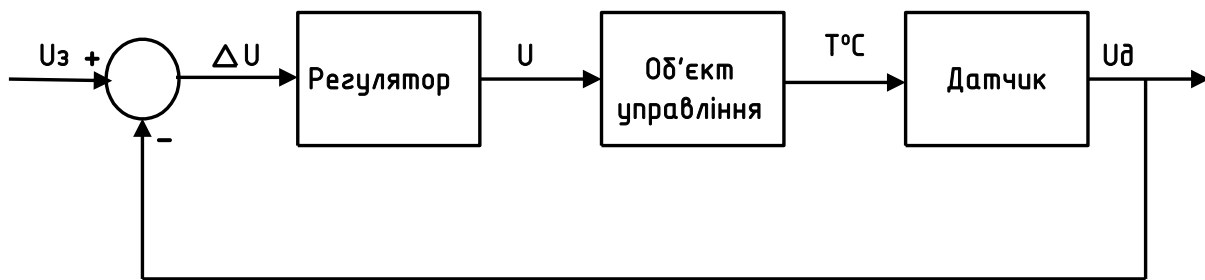


Рисунок 4.8 – Функціональна схема САУ температурою

Де об'єкт управління має передаточну функцію вигляду:

$$W_{об}(p) = \frac{0.21 \cdot k_n}{522 \cdot p + 1} \quad (4.12)$$

Де  $k_i$  – коефіцієнт передачі підсилювача.  $k_i = 76$ , так як діапазон значень, які надходять на датчик  $0 \div 5В$ , тобто сигнал розузгодження на виході

елемента порівняння також змінюється в цих межах. А на вхід об'єкта управління подається сигнал з граничним значенням 380В, тобто коефіцієнт передачі масштабуючого підсилювача визначимо як:

$$k_n = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{380В}{5В} = 76 \quad (4.13)$$

Тоді передаточна функція об'єкта управління буде мати вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{16}{522 \cdot p + 1} \quad (4.14)$$

Датчик має коефіцієнт передачі  $k_{д} = 0.05 \text{ } \hat{A} / \text{ } ^\circ\text{C}$ . Так як на вхід елемента порівняння подається сигнал в діапазоні 0 ÷ 5В, а вихідна величина об'єкта управління змінюється в діапазоні 0 ÷ 100°C, то коефіцієнт передачі датчика визначиться за формулою:

$$k_n = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{5В}{100^\circ\text{C}} = 0.05 \text{ } B / \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.15)$$

Тоді структурна схема САУ буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.9.

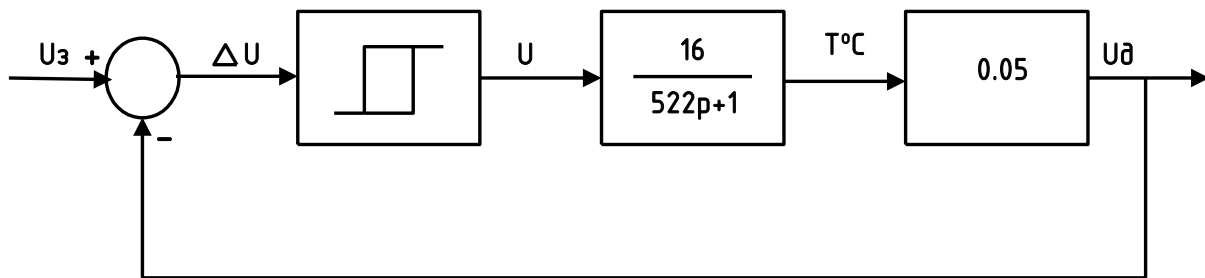


Рисунок 4.9 – Структурна схема САУ температурою

Так як нам потрібно підтримувати температуру в широких межах – 45÷75 °С і передаточна функція об'єкта управління має вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1}, \quad (4.2.5)$$

де  $T=522\text{с}$ , тобто виконується умова  $\tau/T < 0.2$  ( $\tau=0$  – час чистого запізнення), то вибираємо двохпозиційний регулятор.

В результаті досліджень в процесі проведення експериментів були отримані дві криві: нагріву формуючого елемента та його охолодження за допомогою прокачки охолоджувальної рідини. Тому суміщаючи ці криві в заданому діапазоні температур отримаємо криву регулюємої величини [18], зображену на рисунку 4.10.

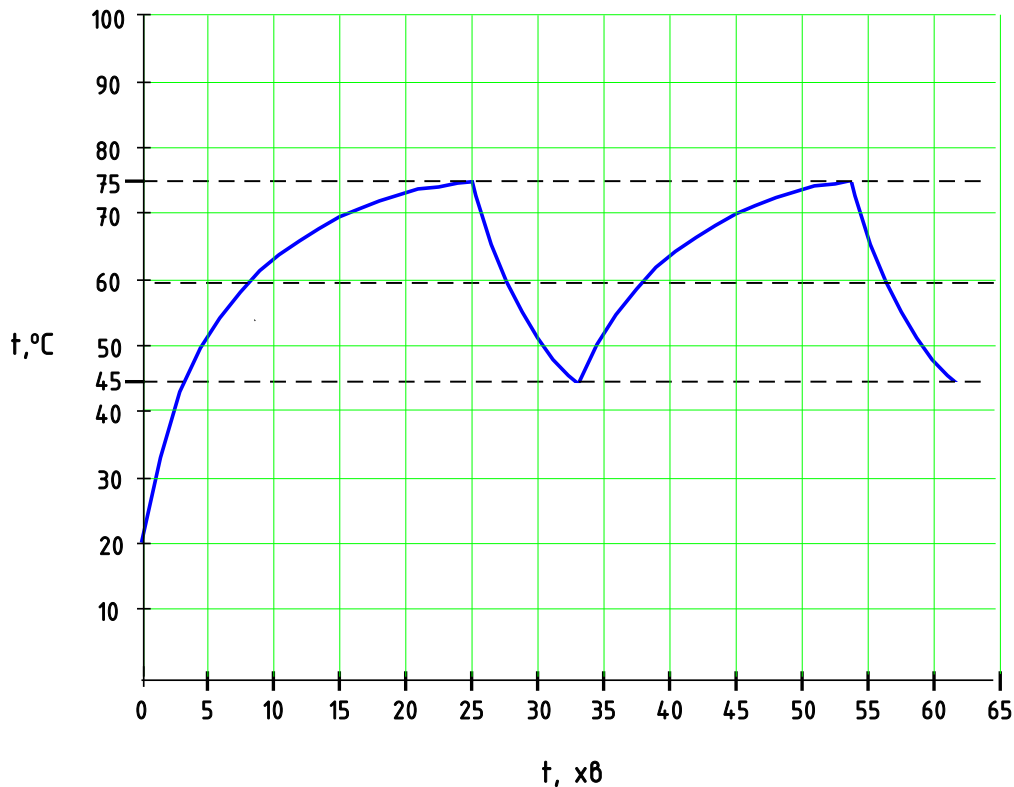


Рисунок 4.10 – Графік зміни регулюємої величини

Динаміка зміни регульованої величини представляє собою автоколивання. Як видно з графіку, амплітуда автоколивань складає  $A=15^\circ\text{C}$ , а період автоколивань дорівнює  $T_{\text{ак}}=27.5$  хв.

## 5. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ САУ

### 5.1 Опис структурної схеми системи автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення

Система автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення представляє собою окремий виріб, котрим до оснащується верстат фрикційного формоутворення. Структурна схема системи приведена на рисунку 5.1.

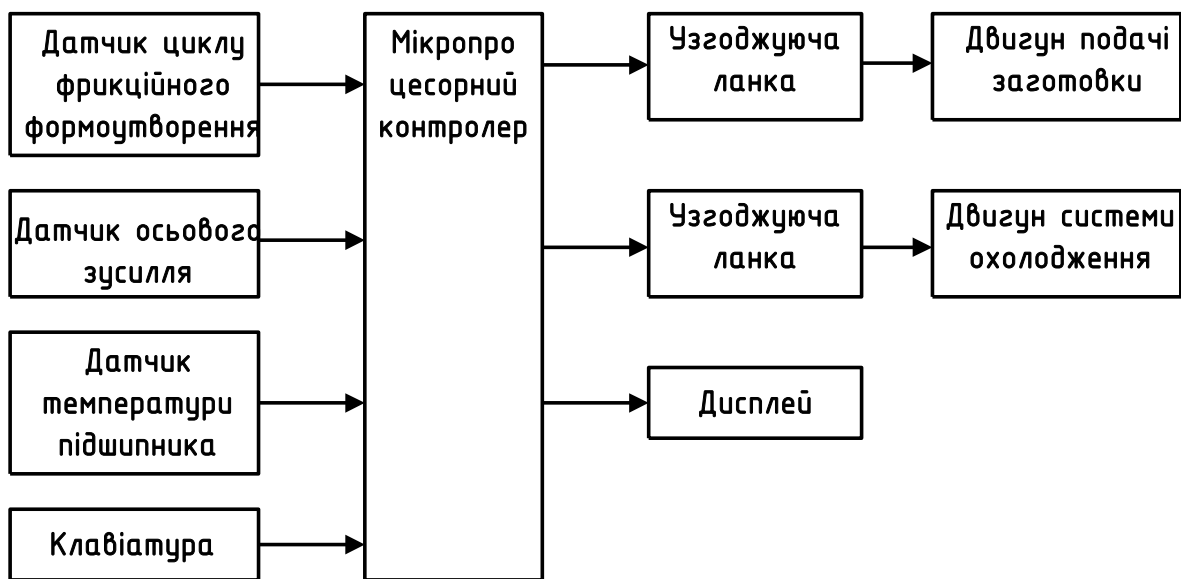


Рисунок 5.1 – Структурна схема САУ параметрами процесу фрикційного формоутворення

Система за приведеною структурною схемою забезпечує:

- підтримку температури підшипника шпинделя в межах, що забезпечують оптимальність процесу фрикційного формоутворення з точки зору технологічних вимог ( $45 \div 75^{\circ}\text{C}$ );

- обмеження величини осьового зусилля на рівні, який унеможливилює просадку заготовки та позамежеву деформацію станини верстата (задається в залежності від матеріалу заготовки).

Ядром системи являється мікропроцесорний контролер фірми ATMEЛ AT90S4433, який забезпечує прийом та обробку інформації з датчиків і видачу керуючих сигналів на виконавчі пристрої.

До складу системи входять:

- датчик циклу фрикційного формоутворення;
- датчик осьового зусилля;
- датчик температури підшипника;
- клавіатура;
- узгоджуюча ланка керування двигуном подачі заготовки;
- узгоджуюча ланка керування двигуном системи охолодження;
- дисплей.

Система може знаходитись в одному з трьох станів:

- контроль працездатності системи (самотестування);
- введення граничних значень температури підшипника та осьового зусилля;
- робочий режим.

Введення інформації в систему здійснюється за допомогою 16-ти клавiшної клавіатури, а відображення введеної інформації та поточного стану системи здійснюється на рідкокристалічному дисплеї, який має 2 рядки та 8 знакомиць в рядку.

Схематичне зображення клавіатури приведенe на рисунку 5.2.

Де 0 ÷ 9 – цифрова клавіатура для вводу та коректування граничних значень регулюємих параметрів;

С – скид помилково набраного числа;

В – активізація дії (введення);

П – перевірка системи;

Т – задання значення граничного осьового зусилля;

Тв – задання значення верхньої границі температури;

Тн – задання значення нижньої границі температури.

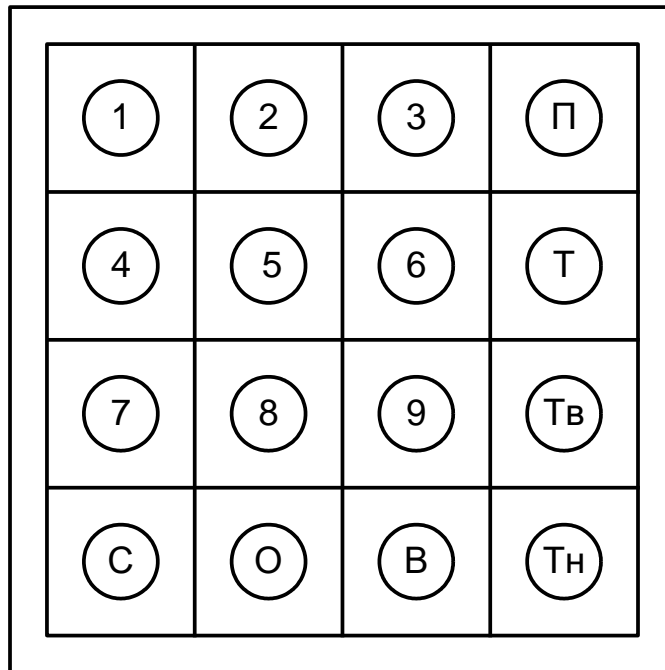


Рисунок 5.2 – Схематичне зображення клавіатури

В залежності від стану системи інформація, яка відображається на дисплеї може приймати вигляд, приведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Варіанти вигляду дисплея.

| Інформація на дисплеї  | Стан системи   |
|------------------------|--|
| Перевірка системи...   | Перевірка системи на працездатність. Перевіряється наявність обривів та коротких замикань в ланках датчика осьового зусилля та виміру температури. |
| Система справна        | Результат перевірки. Пошкоджень не виявлено.   |
| Не справний датчик P   | Результат перевірки. Виявлено пошкодження в ланці виміру осьового зусилля.   |
| Не справний датчик t°C | Результат перевірки. Виявлено пошкодження в ланці виміру температури.  |
| Перевірка системи      | Індикація стану системи перед натисканням клавіші „В”.   |
| Робочий режим          | Індикація стану системи перед натисканням клавіші „В”.   |
| Задання Pгр<br>—       | Режим задання граничного значення осьового зусилля. Від значення здійснюється з цифрової клавіатури. Число відображається з позиції курсора.       |
| Задання t°в<br>—       | Режим задання верхньої границі значення температури. Від значення здійснюється з цифрової клавіатури. Число відображається з позиції курсора.      |
| Задання t°н<br>—       | Режим задання нижньої границі значення температури. Від значення здійснюється з цифрової клавіатури. Число відображається з позиції курсора.       |

| Інформація на дисплеї   | Стан системи  |
|---|---|
| $P = 400 \text{ кг}$<br>$t^{\circ} = 50^{\circ}\text{C}$                                      | Робочий режим. Відображається поточне значення осьового зусилля, на якому було проведено обмеження в попередньому циклі фрикційного формоутворення. |
| $P = 400 \text{ кг}$<br>$t^{\circ}_H = 45^{\circ}\text{C}$ $t^{\circ}_B = 75^{\circ}\text{C}$ | Відображення заданих установок граничної величини осьового зусилля, нижньої та верхньої границі температури після само тестування.                  |

**Опис роботи системи.** Після вмикання системи спершу перевіряється її працездатність. В результаті перевірки стану системи можливі варіанти:

- тестування пройшло успішно (з'являється повідомлення на екрані дисплея №2);
- при виявленні несправності системи з'являється одне з повідомлень №3 або №4.

Далі встановлюються параметри управління - граничні значення осьового зусилля та температури (в залежності від конкретних вимог технологічного процесу).

**Робочий режим.** Робота системи тісно пов'язана з алгоритмом роботи самого верстата. Часова діаграма роботи системи в складі верстата приведена на рисунку 5.3.

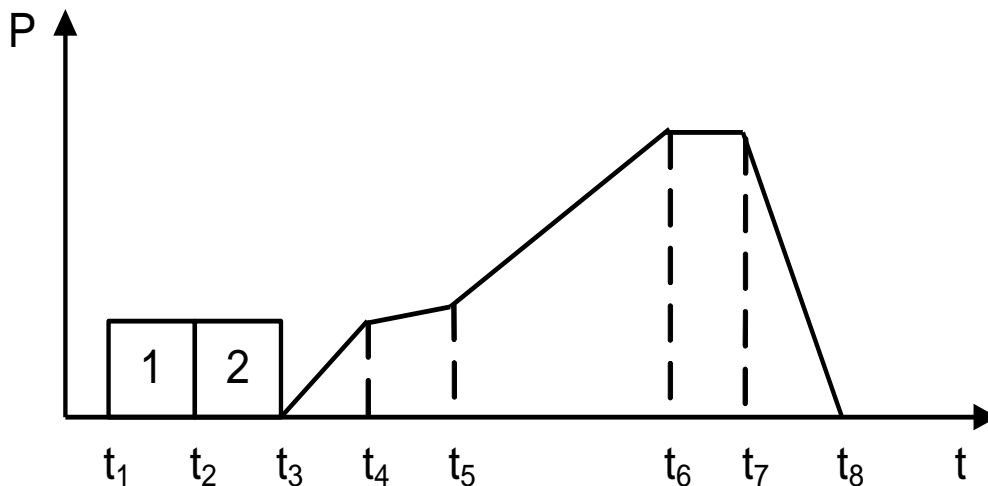


Рисунок 5.3 – Часова діаграма роботи системи

Де:

$$\begin{aligned}t_2 - t_1 &= \Delta\tau_1; & t_6 - t_5 &= \Delta\tau_5 \\t_3 - t_2 &= \Delta\tau_2; & t_7 - t_6 &= \Delta\tau_6 \\t_4 - t_3 &= \Delta\tau_3; & t_8 - t_7 &= \Delta\tau_7 \\t_5 - t_4 &= \Delta\tau_4; & t_6 - t_3 &= \Delta\tau_8\end{aligned}$$

$\Delta\tau_1$  – вмикання системи самотестування, введення граничних уставок, перехід в робочий режим, вмикання електромеханічної частини верстата.

$\Delta\tau_2$  – програмні операції верстата, не пов'язані з процесом фрикційного формоутворення, робота підпрограми регулювання температури.

$\Delta\tau_3$  – поступальний рух заготовки до моменту дотику з формоутворюючим інструментом.

$\Delta\tau_4$  – момент дотику заготовки з формоутворюючим інструментом, притирка вибір шорсткостей, розвинення максимального осьового зусилля, обмеження його на допусковому рівні системою управління та пластифікація заготовки.

$\Delta\tau_5$  – робочий ход процесу формоутворення, падіння осьового зусилля нижче рівня, на якому відбувається обмеження.

$\Delta\tau_6$  – зупинка поступального руху заготовки відносно формоутворюючого інструмента, калібровка форми.

$\Delta\tau_7$  – зворотній поступальний рух заготовки відносно формоутворюючого інструмента.

$\Delta\tau_8$  – одержання сигналу від датчика циклу фрикційного формоутворення, виконання підпрограми регулювання величини осьового зусилля.

Далі цикл повторюється починаючи з  $\Delta\tau_2$ .

## **5.2 Вибір, обґрунтування та розрахунок окремих вузлів, блоків, елементів**

Принципова схема САУ приведена на ДП – 8.091401.09.01.21.06.00.ЕЗ

Конструктивно система складається з трьох окремих блоків, сполучених з'єднувальними кабелями.

Базовий блок, в якому розташовані: мікропроцесорний контролер; клавіатура; дисплей; перетворювач R/U; інструментальний підсилювач сигналу розбалансу тензометричного моста; вторинні джерела живлення +5В, -5В. Живлення базового блоку здійснюється змінним струмом промислової частоти напругою 24В від службового трансформатора, який входить в стандартне обладнання верстата.

Датчик циклу фрикційного формоутворення.

Силовий блок, де розташовані узгоджуючі елементи керування: двигуна подачі та двигуна системи охолодження. Живлення силового блоку здійснюється від 3-х фазної мережі змінного струму промислової частоти напругою 380В.

Увесь електромонтаж блоків виконано на трьох окремих друкованих платах.

*Базовий блок.* Мікроконтролер AT90S4433 забезпечує функціонування блока та системи в цілому. AT90S4433 - економічний 8 бітовий КМОП мікроконтролер, побудований з використанням розширеної RISC архітектури AVR. Виконуючи по одній команді за період тактової частоти, AT90S4433 має продуктивність близько 1MIPS на Мгц, що дозволяє створювати системи оптимальні по швидкодії і споживаній потужності.

В основі ядра AVR лежить розширена RISC архітектура, що поєднує розвинений набір команд і 32 регістра загального призначення. Усі 32 регістра безпосередньо підключені до арифметико-логічного пристрою (АЛП), що дає доступ до будь-яких двох регістрів за один машинний цикл. Подібна архітектура забезпечує десятикратний виграш в ефективності коду в порівнянні з традиційними CISC мікроконтролерами.

AT90S4433 пропонує наступні можливості: 2кб завантажуючої флеш пам'яті; 128 байт EEPROM; 15 ліній вводу/виводу загального призначення; 32

робочих регістра; таймери-лічильники, що налагоджуються, з режимом збігу; зовнішні і внутрішні переривання; програмований універсальний послідовний порт; програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором; SPI послідовний порт для завантаження програм; два обираємих програмно режими низького енергоспоживання. Холостий режим (Idle Mode) відключає ЦПП, залишаючи в робочому стані регістри, таймери/лічильники, SPI порт і систему переривань. Економічний режим (Power Down Mode) зберігає вміст регістрів, але відключає генератор, забороняючи функціонування всіх вбудованих пристроїв до зовнішнього переривання або апаратного скидання.

Архітектура AVR-мікроконтролера представлена на рисунку 5.4

Арифметико-логічний пристрій (ALU), у якому виконуються всі обчислювальні операції, має доступ до 32-х оперативних регістрів, об'єднаних у регістровий файл. Вибірка вмісту регістрів, виконання операції і запис результату назад у регістровий файл виконуються за один машинний цикл.

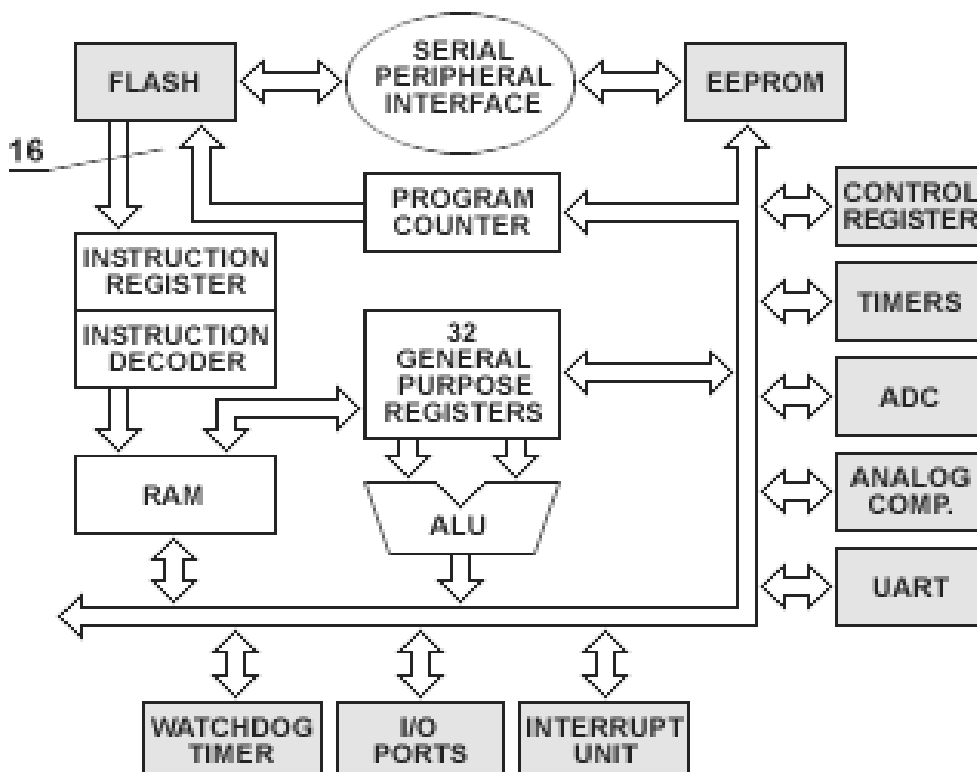


Рисунок 5.4 – Архітектура AVR-мікроконтролера

Організація пам'яті AVR виконана за схемою Гарвардського типу, у якій розділені не тільки адресні простори пам'яті програм і пам'яті даних, але також і шини доступу до них.

Уся програмна пам'ять AVR-мікроконтролерів виконана за технологією FLASH і розміщена на кристалі. Вона являє собою послідовність 16-розрядних комірок і має ємність від 512 слів до 64К слів у залежності від типу кристала.

В FLASH-пам'ять, крім програми, можуть бути записані постійні дані, що не змінюються під час функціонування мікропроцесорної системи. Це різні константи, таблиці знакогенераторів, таблиці лінеаризації датчиків і т.п.

Перевагою технології FLASH є високий ступінь упакування, а недоліком те, що вона не дозволяє стирати окремі комірки. Тому завжди виконується повне очищення всієї пам'яті програм. При цьому для AVR гарантується, як мінімум, 1000 циклів перезапису FLASH-пам'яті.

AT90S4433 містить АЦП 10-розрядного послідовного наближення. АЦП зв'язаний з 6 канальним аналоговим мультиплексором який дозволяє кожному виводі порту C використовуватися як вхід для АЦП. АЦП містить підсилювач вибірки і збереження, що гарантує, що вхідна напруга АЦП буде підтримана на постійному рівні протягом перетворення.

АЦП може використовувати режим однократного або безперервного перетворення. У режимі однократного перетворення, кожне перетворення повинне бути ініційоване користувачем. У режимі безперервного перетворення АЦП постійно робить вибірки і модифікує регістр даних АЦП. Біт ADFR у ADCSR вибирає між двома доступними режимами. Регістр ADMUX вибирає один із шести каналів аналогового вхідного сигналу, використовуваних як вхід АЦП.

Мікроконтролер включений за схемою рекомендованою підприємством-виробником. Живлення цифрової частини +5В подано на контакт 7. Живлення аналогової частини здійснюється тією самою напругою через П-подібний фільтр C3,C6,L1. Вона ж використовується як опорна напруга для АЦП. Стабілізація частоти внутрішнього тактового генератора здійснюється кварцовим

резонатором на частоту 4МГц, підключеним до виводів 9 та 10. Конденсатори C4 та C5 забезпечують оптимальні умови збудження кварцового резонатора. Ланка R36, C7 забезпечує скид мікропроцесора в момент подачі напруги живлення.

Чотири біти PC2, PC3, PC4, PC5 порту C та чотири біти PB2, PB3, PB4 та PB5 порту B використовуються для програмного сканування клавіатурної матриці 4x4 та ідентифікації натиснутої клавіші. Шість біт PD2, PD3, PD4, PD5, PD6, PD7 обслуговують рідиннокристалічний дисплей HD44780, мікросхема DD2, на два рядки та 16 знакомісць.

PKI за допомогою стандартного 14-контактного роз'єму обмінюється інформацією з керуючим мікроконтролером. AVR-мікроконтролер посилає в PKI команди, керуючі режимами його роботи, і ASCII-коди виведених символів. У свою чергу, PKI може посилати AVR-мікроконтролеру по його запиті інформацію про свій стан і дані зі своїх внутрішніх блоків пам'яті.

Три виводи 14-контактного роз'єму призначені для подачі живлячої напруги і напруги зсуву, що керує контрастністю дисплея.

З тих, що залишилися 11 виводів 8 (DB0 - DB7) використовуються для організації мультиплексованої шини "команди / дані", і на 3 виводи (RS, R/W, E) AVR-мікроконтроллер виставляє керуючі сигнали. За допомогою сигналу на лінії RS мікропроцесор повідомляє контролеру індикатора про те, що саме передається по шині: команда або дані. Сигнал на лінії E є стробом, що супроводжує сигнали на шині "команди / дані". Запис інформації в PKI відбувається по спаду цього сигналу. Потенціал на керуючому виводу R/W задає напрямок передачі даних: запис у RAM індикатора (R/W=0) або зчитування відтіля (R/W=1). Якщо під час циклу запису AVR-мікроконтролер передає в контролер індикатора код команди, то цей код записується в регістр команд контролера PKI, і команда відразу ж починає виконуватися. Якщо AVR-мікроконтролер передає в контролер PKI дані, що являють собою ASCII-коди відображуваних символів, то вони записуються в буфер даних (DDRAM), що звичайно містить 80 комірок. При записі або зчитуванні буфера даних звертання

здійснюється до комірки, на яку в даний момент указує курсор. Резистор R28 служить для регулювання контрастності зображення.

На цій платі також розташований перетворювач R/U. Вхідним сигналом для нього являється сигнал первинного перетворювача – терморезистора. В даній схемі використано платиновий термоопір R3 ПТС-10, діапазон вимірюваних температур якого  $0 \div 6300$  °С, а  $R_0=100\text{Ом}$  – опір при  $t = 0$  °С. Платиновий терморезистор характеризується підвищеною чутливістю до зміни температури, відтворюваністю, стабільністю та зручністю при експлуатації. ці властивості залежать від опору чутливого елемента, визначальною величиною якого являється опір при  $0$  °С. Збільшення опору чутливого елемента призводить до збільшення його розмірів та інерційності, спрощуючи однак його роботу, так як з'являється можливість використання більш простих вимірювальних схем. Тому найбільш оптимальним є терморезистор з опором  $R_0=100\text{Ом}$ .

Термометр опору і проводи що з'єднують його з вторинним приладом, включені послідовно. Звичайно використовуються мідні проводи, опір яких залежить від їхньої температури. Температурні зміни опору проводів приводять до погрішності виміру температури. Чуттєві елементи зі сполучними проводами називаються вимірювальними пакетами. Сполучні проводи вимірювального пакета повинні бути електрично ізольовані один від одного. При вимірі температури до  $300^\circ\text{C}$  с метою забезпечення надійної ізоляції пакетів ТО застосовуються ізоляційні лакотканини, емалі, оплітки й ін.; при вимірі температури вище  $300^\circ\text{C}$  — намісто з електроізоляційної кераміки.

Для усунення впливу температури на опір сполучних проводів їхній власний опір вибирають малим у порівнянні з опором чуттєвого елемента. При  $0^\circ\text{C}$  не повинно перевищувати  $0,1\%$  для платинових ТО. З цією же метою ТО підключають до трьох провідної схеми. Трьох провідна вимірювальна схема представлена на рисунку 5.5

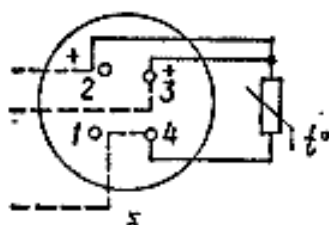


Рисунок 5.5 – Схема трьох провідного вимірювального пакету

Для компенсації зміни опору сполучних проводів промисловістю випускаються також ТО із додатковими сполучними проводами. Сполучні проводи вимірювального пакета підключаються до клем контактної колодки чи контактам корпусу пластмасової голівки ТО.

Підключення сполучних проводів вимірювальних пакетів до чуттєвого елемента здійснюється за допомогою зварювання. При вимірі температури вимірювальні пакети вставляються в захисний чохол ТО, що охороняє їх від ушкоджень і забруднень. Внутрішній простір чохла засипається інгібіторним порошком.

З'єднання первинних перетворювачів  $t^{\circ}/R$  з перетворювачем  $R/U$  здійснюється трьох провідною лінією, перевагою якої, в порівнянні з двох провідною, є наявність можливості автоматично компенсувати втрати в з'єднувальній лінії. Причому дані лінії можуть досягати довжини до 300 м.

Функціональна схема перетворювача  $R/U$  приведена на рисунку 5.6

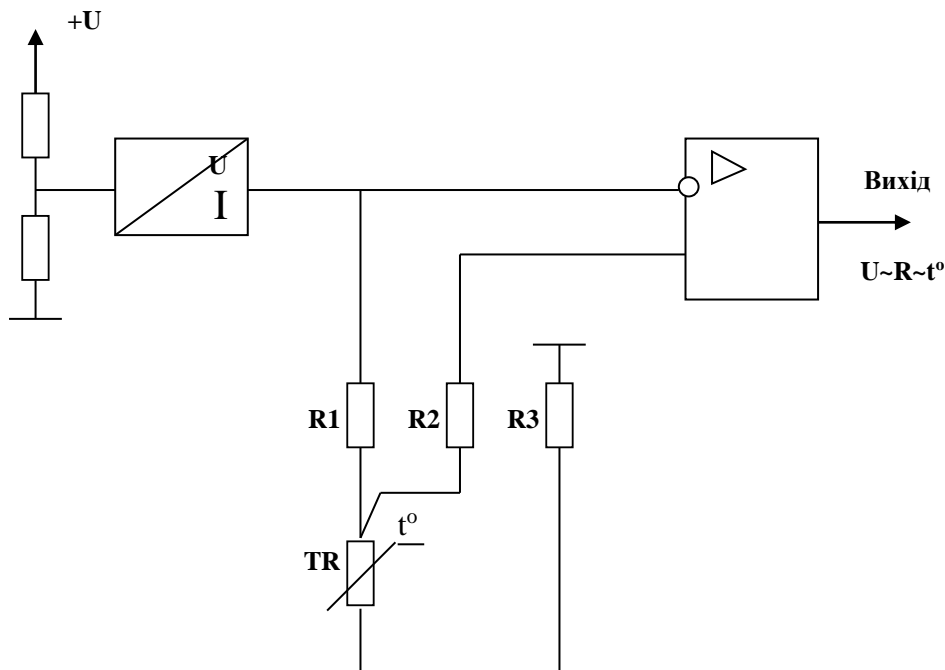


Рисунок 5.6 – Функціональна схема перетворювача  $R/U$

Він складається з генератора стабільного струму, який керується опорною напругою. Величина струму визначається типом використовуваного терморезистора і складає близько 2.5 мА. Струм протікає через терморезистори. Напруга джерела живлення подається також на інвертуючий вхід диференційного підсилювача. На прямий вхід подається потенціал з цього ж виводу терморезистора. Оскільки довжина з'єднувальних проводів однакова, то падіння напруги теж однакове. Завдяки такій схемі включення різниця потенціалів на прямому та інверсному входах диференційного підсилювача не буде залежати від довжини з'єднувальної лінії. А вихідний сигнал підсилювача буде залежати тільки від опору терморезистора.

Таким чином вимірювання температури зводиться до вимірювання вихідної напруги підсилювача.

Фрагмент принципової схеми перетворювача R/U представлений на рисунку 5.7

Перетворювач працює на чотирьох операційних підсилювачах К140УД25. Терморезистор через з'єднувальну лінію підключений до входу DA2, який відповідно являється перетворювачем R/U. Резистори R1, R2, R3 мають однаковий опір  $R1=R2=R3=100\text{кОм}$ . Резистор R2 служить для діагностування системи на обрив датчика.

DA4 – диференційний підсилювач з одиничним коефіцієнтом підсилення, який служить для зміщення діапазона вимірювання на 100мВ. Тому резистори R7, R8, R11, R12 мають однаковий опір  $R=100\text{кОм}$ .

DA9 являється джерелом опорної напруги 100мВ для DA4. Опори дільника R17, R18 визначимо із співвідношення 1/20. Загальний опір візьмемо як 5.1кОм, тоді струм дільника буде рівний  $I=1\text{мА}$ . З дільника нам необхідно отримати напругу 100мВ, тоді по закону Ома  $R18=U/I=100\text{Ом}$ .  $R17=5.1\text{кОм}$ .

DA8 – неінвертуючий масштабуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення  $K=125$ . Із співвідношення [25]  $K=1+R19/R16$ , задаючись опором  $R16=1\text{кОм}$  знайдемо  $R19=124\text{кОм}$ , обираючи з ряду приймемо  $R19=130\text{кОм}$ .

$R_{15}=R_{16}=1\text{кОм}$ .  $R_{23}$  також рівний  $1\text{кОм}$ .  $DA1$  являється буфером.  $DA3$  – генератор струму для роботи перетворювача. Значення струму визначається по падінню напруги на резисторі  $R3$ .

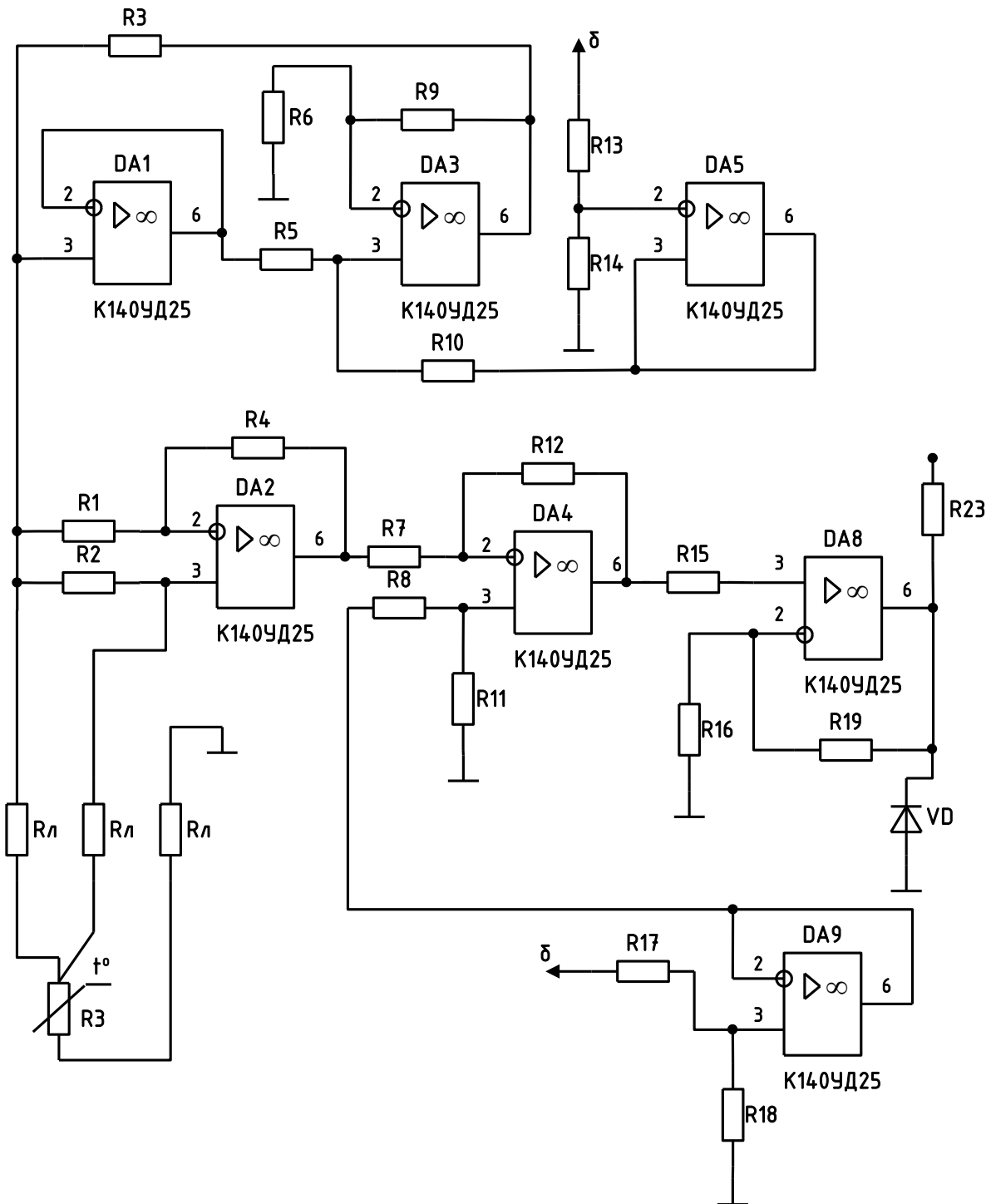


Рисунок 5.7 – Принципова схема перетворювача R/U

Тому для отримання струму  $I=1\text{мА}$  при падінні напруги  $U=1\text{В}$  опір  $R3=1\text{кОм}$ . Решта резисторів повинні мати однакові опори, візьмемо  $R5= R6= R9= R10=47\text{кОм}$ .

DA5 являється формувачем опорної напруги генератора струму 1В. Тому опори ділянки R13, R14 визначимо із співвідношення 1/5. Загальний опір візьмемо як 10кОм, тоді струм ділянки буде рівний  $I=0.5\text{мА}$ . З ділянки нам необхідно отримати напругу 1В, тоді по закону Ома  $R14=U/I=2\text{кОм}$ . Вибираючи з ряду  $R14=2.2\text{кОм}$ , а  $R13=8.2\text{кОм}$ .

Вимірювання осьового зусилля здійснюється за допомогою тензометричного мосту.

Всі чотири тензорезистори приклеєні в певному місці кінематичної схеми верстата таким чином, щоб при рості осьового зусилля напруга розбалансу моста зростала. Сам міст живиться напругою постійного струму +5В. Підсилювач сигналу розбалансу тензомоста виконаний за схемою класичного вимірювального підсилювача [28]. Фрагмент принципової схеми тензометричного підсилювача представлений на рисунку 5.8

Вхідний каскад виконаний на двох операційних підсилювачах [27] DA6, DA7, який забезпечує великий коефіцієнт підсилення та одиничний коефіцієнт підсилення синфазних сигналів. Сигнал з диференційного виходу представляє собою сигнал з суттєво зменшеною синфазною складовою і застосовується для збудження схеми звичайного диференційного підсилювача DA10. Його задача – одержання однополюсного сигналу та придушення залишкового синфазного сигналу.

Під шкідливим сигналом мається на увазі наводки струму промислової частоти 50Гц на з'єднувальні проводи та виділення значної напруги на високоомних входах операційних підсилювачів.

Значення опорів R20, R21, R25, R27 визначимо із співвідношення:

$$K = \left(1 + \frac{2 \cdot R20}{R21}\right) \cdot \frac{R27}{R25},$$

де коефіцієнт підсилення  $K=100$ , візьмемо  $R20=50\text{кОм}$ ,  $R25$  та  $R27=10\text{кОм}$ . Тоді  $R21=1\text{кОм}$ . Решта резисторів мають такі опори:  $R22= R20=50\text{кОм}$ ,  $R24= R25=10\text{кОм}$ ,  $R29= R27=10\text{кОм}$ .

Внаслідок того, що при приклеюванні тензорезисторів вони дещо змінюють свій опір і міст з однакових резисторів не буде збалансований в схему підсилювача DA11 додатково введено резистор балансування R35.

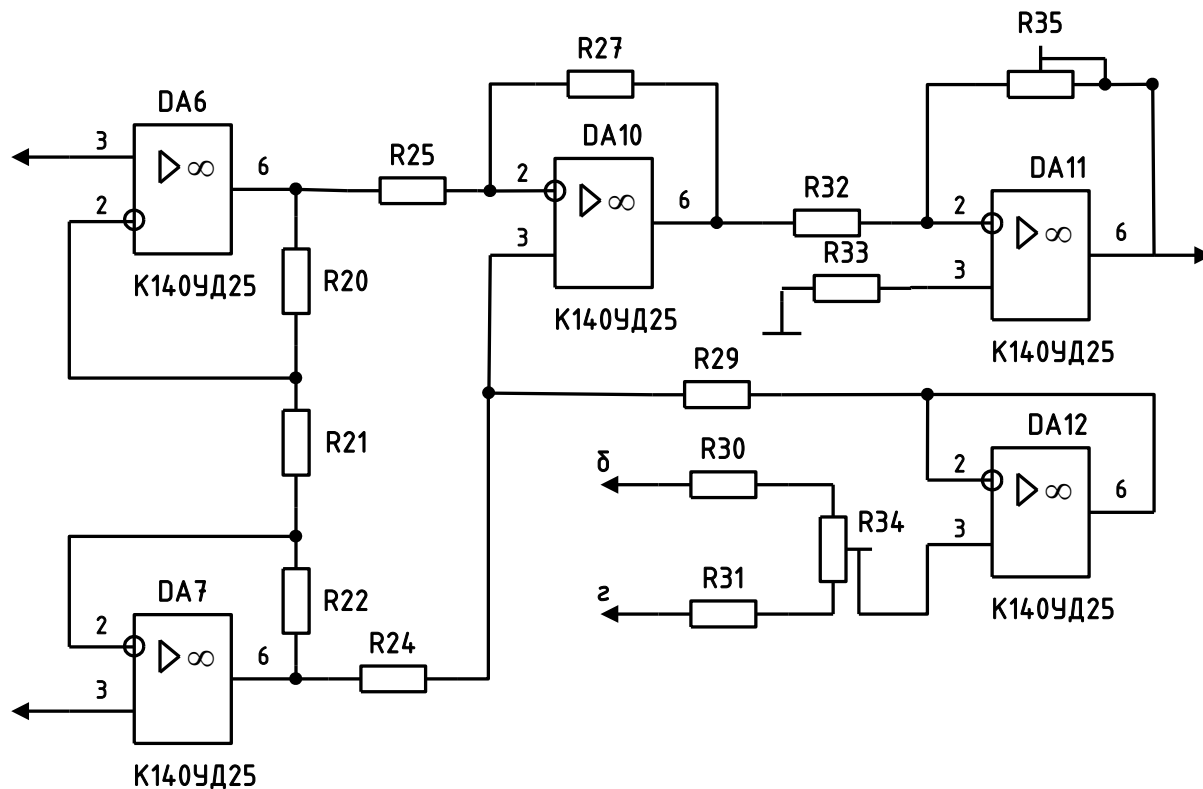


Рисунок 5.8 – Принципова тензометричного підсилювача

На DA11 виконаний кінцевий масштабуючий підсилювач. він має коефіцієнт підсилення  $K=10$ , тоді номінали резисторів визначимо із співвідношення:

$$K = R35 / R32. \text{ Приймавши } R32=10\text{кОм}, R35=100\text{кОм}. R33= R32=10\text{кОм}.$$

На операційному підсилювачі DA12 виконане джерело віртуальної землі [30] для зміщення диференційного підсилювача DA10. Резистори R30, R31 та R34 мають однакові опори, рівні 4.7кОм.

Вихідні сигнали перетворювача R/U та тензометричного підсилювача приведені до діапазону 0...5 В для подачі на входи інтегрованого в мікро

контролер АЦП. Діоди VD5, VD6, VD10 та VD11 являються захисними для кіл АЦП.

На друкованій платі базового блоку знаходяться вторинні джерела живлення. За допомогою спеціалізованих імпульсних перетворювачів DD1, DD4 здійснюється формування напруги +5В та -5В.

Формування напруги +5В здійснюється за допомогою стабілізатора MAX724. Дана інтегральна схема являється монолітним, імпульсним, біполярним, DC/DC стабілізатором з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), оптимізованою для схем зі зниженням напруги. ІС MAX724 має навантажувальну здатність 5А. MAX724 вимагає підключення мінімального числа зовнішніх компонентів при реалізації стандартних схем, так як має вбудовані: силовий ключ, тактовий генератор та ланки управління. Даний стабілізатор призначений для високо-навантажених схем з перетворенням напруги вниз.

MAX724 має відмінні динамічні та перехідні характеристики при забезпеченні обмеження струму в кожному циклі перетворення для захисту від перевантаження по струму при короткому замиканні в вихідній ланці. Дана ІС також має широкий діапазон вхідних напруг (8 ÷ 40В) в стандартній конфігурації знижуючого перетворювача.

Формування напруги -5В здійснюється за допомогою стабілізатора MAX759. Інтегральна схема MAX759 являється імпульсним, інвертуючим, CMOS стабілізатором напруги. Споживає мий струм спокою складає 1.7мА і знижується до 1мкА в режимі Shutdown. Дана функція економії енергоспоживання сумісно з високою ефективністю перетворення та схемним рішенням, направленим на мінімізацію, робить дані стабілізатори досить широко використовуваними для великого діапазону схемних рішень.

Даний перетворювач використовує високоефективну ШІМ – перетворення в токовому режимі для забезпечення жорстких рамок стабілізації вихідної напруги і низького рівня шумів. Тактовий генератор має фіксовану робочу частоту 165кГц, що дозволяє просту реалізацію ланцюгів фільтрації. Похибка

вихідної напруги гарантується в діапазоні  $\pm 5\%$  при специфікованих значеннях вхідної напруги, навантаження та температури.

Сигнали PB0 та PB1 порту В керують двигуном приводу заготовки та двигуном системи охолодження підшипника. Буферні елементи DD4 служать для підвищення навантажувальної здатності ліній порту.

#### *Блок датчика процесу.*

Датчик циклу фрикційного формоутворення виконаний у вигляді окремого блоку і знаходиться безпосередньо в області кулачкового механізму верстата. На кулачок верстата прикріплена пластинка з світонепроникаючого матеріалу, що затулює відкритий оптичний затвор датчика на момент фрикційного формоутворення.

Схемотехнічно датчик представляє собою компаратор DA1, між диференціальними входами якого знаходиться фотодіод VD1 з ланками зміщення R1, R2. Ланка R3, C1 – фільтруюча за живленням. Світлодіод HL1 живиться напругою +5В через струмообмежуючий резистор R4.

Конструктивно датчик виготовлений на друкованій платі спеціальної форми, наведеної на рисунку 5.9

Вихідними сигналами датчика являються логічні рівні „0” та „1”, сумісні с ТТЛ. Заходи щодо схемотехнічного та конструктивного рішення направлені на максимальну завадостійкість роботи датчика в цехових умовах.

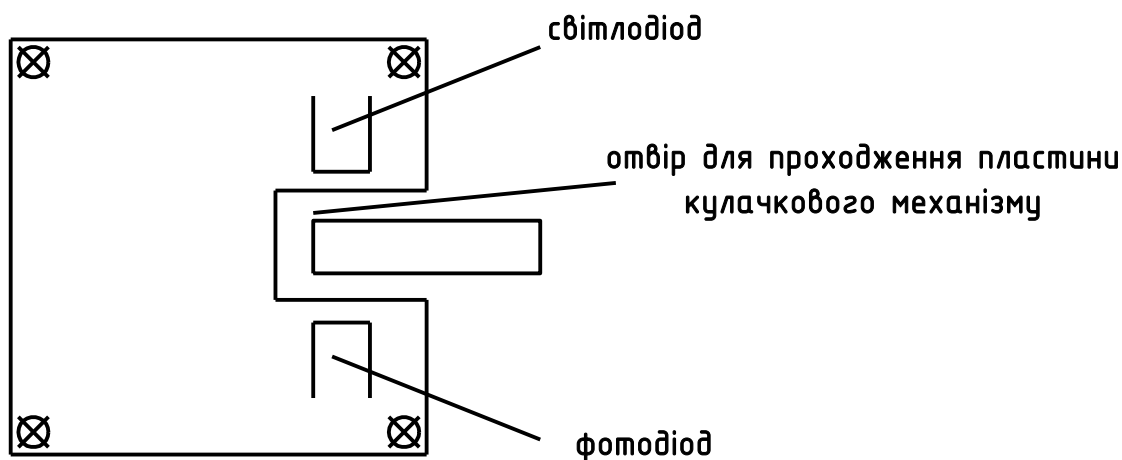


Рисунок 5.9 – Вигляд друкованої плати датчика процесу фрикційного формоутворення.

*Силовий блок.*

Силова частина системи також виконана у вигляді окремого блоку. В ній розташовані твердотільні реле S1, S2, S3, які забезпечують вмикання та вимикання двигуна системи охолодження підшипника, комутуючи напругу 380В промислової частоти, якою живиться двигун M2.

Для комутації двигуна прокачки охолоджувальної рідини використовуємо твердотільне реле, яке має суттєві переваги перед електромеханічними. Якщо для сучасних електромеханічних реле ресурс 500000 – 1000000 спрацювань, то для твердотільних реле цей параметр втратив значення через відсутність зношуваних частин. Комутуєма потужність для твердотільних реле лежить в інтервалі 1 ÷ 15000 Вт.

Твердотільні реле представляють собою сильнотимові ключі з гальванічною розв'язкою між входами управління та навантаженням. Напруга ізоляції вход-вихід не менше 1кВ. Вхідним елементом являється світлодіод, вихідним – симістор.

Двигун M2 входить до складу системи охолодження типу ПА22, яка використовується для прокачки охолоджувальної рідини. Потужність двигуна M2 складає 0.12 кВт.

Керування двигуном подачі заготовки здійснюється ключуванням кола постійної напруги 220В живлення двигуна польовим транзистором VT1. Сигнал на базу транзистора надходить з буферного підсилювача DD1. Буферний підсилювач живиться від параметричного паралельного стабілізатора R1, VD5.

Сигнальні кола керування двигунами мають гальванічні розв'язки (оптопара U1) та оптопари, які знаходяться безпосередньо в твердотільних реле.

Випрямляючий міст VD1...VD4 використовується для живлення двигуна M1. Двигун M1 являється двигуном постійного струму типу 2П22 потужністю 1 кВт.

### 5.3 Опис алгоритму роботи системи управління

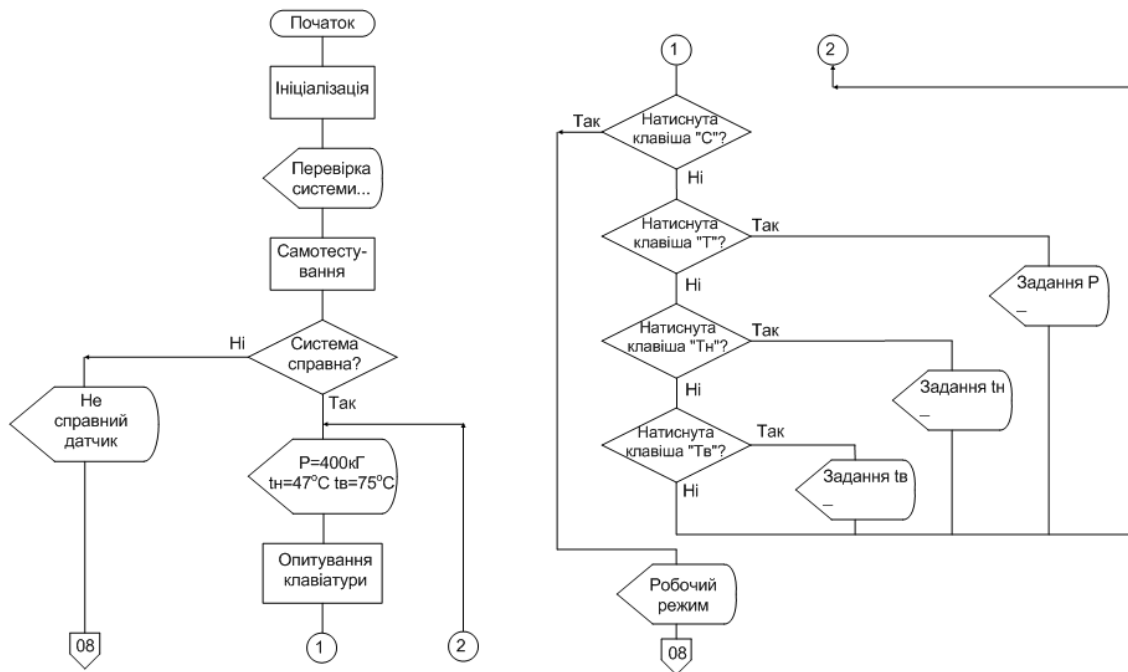


Рисунок 5.1 – Блох-схема алгоритму роботи системи 1

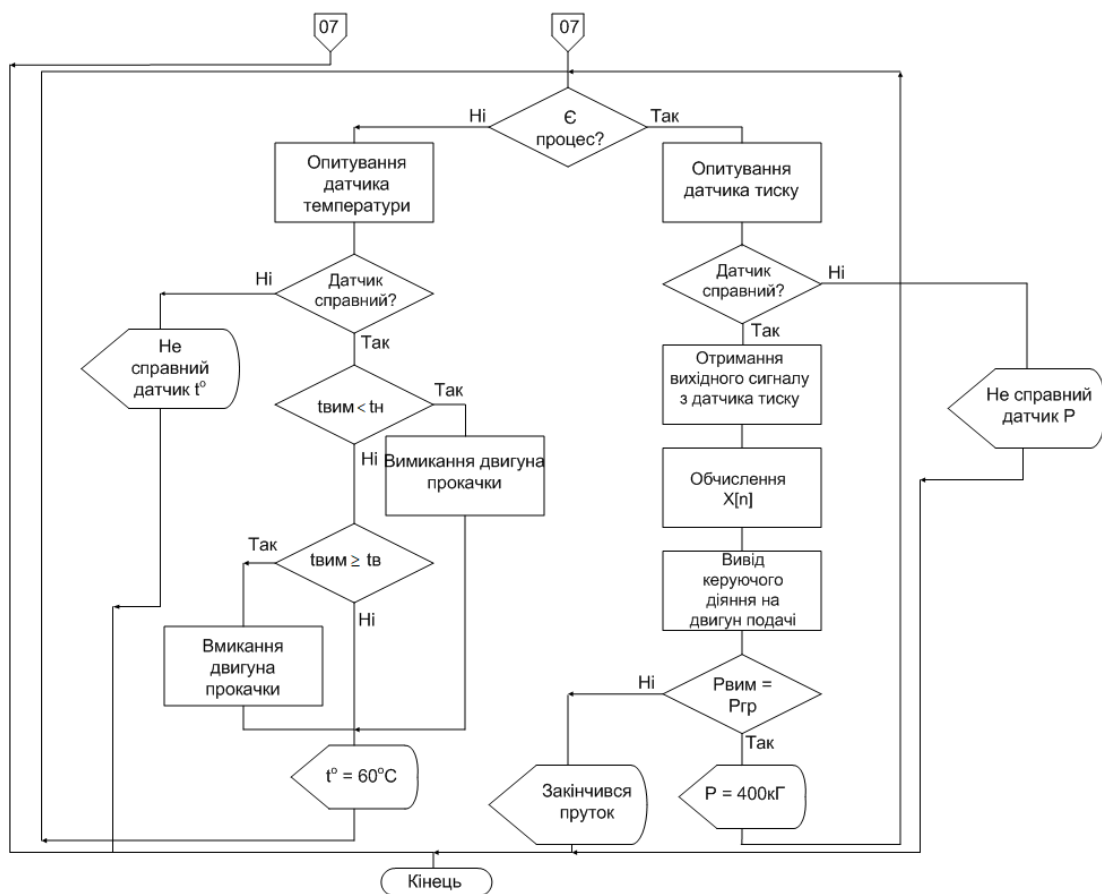


Рисунок 5.2 – Блох-схема алгоритму роботи системи 2

При подачі живлення на схему системи управління відбувається її апаратний скид, в процесі якого програмний лічильник встановлюється в нуль, тобто переходе на адресу \$000. По цій адресі записана команда RJMP - відносний перехід на підпрограму обробки скидання, тобто підпрограму ініціалізації.

В процесі ініціалізації відбувається скид всіх регістрів та встановлення початкових значень регістрів прапорців. Ініціалізується покажчик стеку та порти мікроконтролера (порт D настраюється на ввід, порт В – на вивід). Проходить ініціалізація таймерів/лічильників, таймер/лічильник1 настраюється на режим ШІМ. При ініціалізації АЦП відбувається вибір каналу АЦП та запуск перетворення. При ініціалізації РКІ обирається 4-бітний інтерфейс, 2 рядки та шрифт 5x7 точок. Вмикається дисплей та курсор, далі дисплей очищується, а курсор встановлюється в початкове положення.

Вкінці блоку ініціалізації встановлюється глобальний біт дозволу переривань командою sei.

Після ініціалізації на дисплей виводиться текст: „ПЕРЕВІРКА СИСТЕМИ...”. В цей час відбувається самотестування системи, тобто перевірка її на обрив проводу датчиків тиску та температури. Якщо система несправна, тобто є обрив проводу, то на дисплеї виводиться повідомлення про неполадку: „НЕ СПРАВНИЙ ДАТЧИК” і система зупиняється.

Якщо система справна, то на дисплей виводяться поточні граничні значення тиску та температури і запускається підпрограма опитування клавіатури. Якщо натиснута клавіша „Т”, то переходимо в режим вводу граничного значення тиску, якщо натиснута „Т<sub>н</sub>”, то переходимо в режим вводу значення нижньої границі температури, якщо „Т<sub>в</sub>” – верхньої. Якщо ж натиснута клавіша „В”, тобто ввід, то переходимо в робочий режим, при цьому на дисплеї виводиться текст: „РОБОЧИЙ РЕЖИМ”.

Далі система чекає сигналу з датчика процесу, який сповіщає її про початок процесу фрикційного формоутворення. Якщо сигналу з датчика немає, тобто

процес формоутворення ще не почався, а проводяться підготовчі операції, тоді опитується датчик температури. Якщо датчик не справний, тобто виміряні значення температури більше або менше допустимих значень (обрив проводу датчика або коротке замикання), то на дисплеї виводиться повідомлення „НЕ СПРАВНИЙ ДАТЧИК t°C” і система зупиняється.

Якщо ж датчик справний, то виміряне значення температури порівнюється з нижнім граничним значенням, якщо поточне значення менше граничного, то вимикається двигун прокачки охолоджуючої рідини в тому випадку, коли він був ввімкнений. Якщо ж двигун не був ввімкнений, то на дисплей виводиться поточне значення температури і система далі очікує надходження сигналу з датчика процесу.

У випадку, коли виміряне значення більше нижньої границі, воно порівнюється з верхнім граничним значенням. Якщо поточне значення температури більше або рівне верхній границі, то вмикається двигун прокачки охолоджувальної рідини. Якщо ж ні, то на дисплеї виводиться поточне значення температури підшипника і система переходить в стан чекання сигналу з датчика процесу.

Якщо ж мікроконтролер надійшло переривання від датчику процесу, тобто почався процес фрикційного формоутворення, то система починає опитування датчика тиску. Якщо датчик не справний, тобто виміряні значення тиску більше або менше допустимих значень (обрив проводу датчика або коротке замикання), то на дисплеї виводиться повідомлення „НЕ СПРАВНИЙ ДАТЧИК P” і система зупиняється.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було детально досліджено технологічний процес фрикційного формоутворення деталей. Визначено, що регулюванню підлягають такі параметри даного процесу, як температура підшипника формоутворюючого інструмента та осьове зусилля, яке розвивається в момент дотику формоутворюючого інструмента та заготовки.

В діючій системі надмірне зростання температури формоутворюючого інструмента усувається за рахунок ручного вмикання системи охолодження опорного механізму, шляхом прокачування рапи, в певні моменти часу. А зростання осьового зусилля в момент формоутворення призводить до розпирання станини верстата, можливої її поломки та випуску бракованих деталей.

Було досліджено об'єкти управління даними параметрами. Експериментально зняті розгінні криві об'єктів управління температурою та осьовим зусиллям. Шляхом їх апроксимації було визначено передаточні функції даних об'єктів управління.

Були створені та досліджені моделі систем автоматичного управління температурою та осьовим зусиллям. На основі отриманих передаточних функцій об'єктів управління були проведені розрахунки цих систем. Було визначено, що для управління температурою достатньо двохпозиційного регулятора. В систему автоматичного управління осьовим зусиллям була введена ізодромна ланка, яка визначає ПД – закон регулювання.

Була розроблена структурна схема системи автоматичного управління та, на основі проведених розрахунків, електрична принципова схема цифрової системи автоматичного управління параметрами технологічного процесу фрикційного формоутворення деталей. Елементи та вузли електричної принципової схеми обрані згідно з вимогами технологічного процесу та результатами розрахунків, тому дана система здатна здійснити потрібні закони регулювання. Був розроблений алгоритм роботи системи.

Спроектована цифрова система автоматичного управління параметрами процесу фрикційного формоутворення повністю задовольняє висунутим вимогам, щодо точності, діапазонів, швидкодії та зручності роботи.

Розглянуті заходи з охорони праці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ельхавад Алі Ельфакі Ахмед Енергетична ефективність процесу фрикційного формоутворення порожнистих деталей форми тіл обертання. / Автореф. Дис. канд. техн. наук. – Кіровоград, 2001, –20с.
2. Криськов О.Д. Технологія фрикційного формоутворення. Навчальний посібник – Кіровоград, РВЛ КНТУ, 2008. – 303с.
3. Криськов О.Д., Косматенко К.Є., Пархоменко Ю.М. Передумови вибору конструкції шпindelного вузла верстату автомата фрикційного формоутворення. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць, вип. 11 - Кіровоград, КДТУ 2002.
4. Косматенко К. Є., Криськов О.Д., Пархоменко М.Д. Шляхи стабілізації автоматизованого процесу фрикційного формоутворення. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб-к, вип. №32 - Кіровоград: КДТУ, 2002. С. 150 -153.
5. Мартыненко И. И., Лысенко В. Ф. Проектирование систем автоматизации – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 243 с.
6. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
7. Стеклов В. К. Проектирование систем автоматичного керування: Навч. посібник. – К.: Вища школа, 1995. – 231 с.
8. Бойко В.І., Гуржій А.М., Жуйков В.Я. та ін. *Схемотехніка електронних систем. Книга 1: Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої.* — К.: Вища школа, 2004. — 366 с
9. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: Держстандарт України, 2015.
10. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Київ: Держстандарт України, 2015.

11. Гринчук П. Основи автоматизації виробничих процесів. Київ: Політехніка, 2022. 312 с.
12. Бойко В.І., Гуржій А.М., Жуйков В.Я. та ін. *Схемотехніка електронних систем. Книга 2: Цифрова схемотехніка.* — К.: Вища школа, 2004. — 423 с.
13. Бойко В.І., Гуржій А.М., Жуйков В.Я. та ін. *Схемотехніка електронних систем. Книга 3: Мікропроцесори та мікроконтролери.* — 2-ге вид., доповн. і переробл. — К.: Вища школа, 2004. — 399 с.
14. Мілих В.І., Шаволкін О.О. *Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка.* — підручник, 2008. — охоплює основи мікропроцесорних систем, електроніки та базове програмування/схемотехніку. [web.kpi.kharkov.ua](http://web.kpi.kharkov.ua)
15. Nielsen C.V., Bay N. *Review of friction modeling in metal forming processes.* Journal of Materials Processing Technology, 255 (2018), pp. 234–241.
16. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. : Афіша, 2004. 250 с.
17. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
18. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
19. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.
20. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 20.10.2024).
21. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 02.11.2024).
22. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 02.11.2024).
23. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 04.11.2024).

24. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 20.10.2024).
25. Кодекс цивільного захисту України. URL:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 29.10.2024).
26. Кодекс законів про працю України. URL:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 29.10.2024).
27. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
28. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 04.11.2024).

