

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КІРКОПУЛО КАТЕРИНА ГРИГОРІВНА

УДК 681:51

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ
ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ**

Спеціальність 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Галузь знань: 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник – Тонконогий Володимир Михайлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій проектування в машинобудуванні

Одеса – 2020

АНОТАЦІЯ

Кіркопуло К.Г. Автоматизація процесів керування установкою іонно-плазмового напилення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2020.

Дисертація присвячена актуальній темі розробки систем автоматичного керування процесом іонно-плазмового нанесення покриття на інструмент. Система автоматизації дозволяє покращити якісні властивості та строк експлуатації інструмента за рахунок врахування особливостей технологічного процесу.

В роботі проведена розробка комплексу нелінійних математичних моделей всіх етапів технологічного процесу. Комп'ютерна симуляція проводилась в програмному пакеті Simulink.

Розроблена математична модель динаміки нагріву за лінійною програмою металорізального інструменту в процесі іонного очищення. Джерелом нагріву є плазмова дуга. В установці нагрівання інструменту проводиться як за рахунок потоків тепла іонного бомбардування, так і від нагрітої підкладки, а втрати тепла проходять в результаті випромінювання. Для спрощення модель розроблена з використанням звичайних диференціальних рівнянь. Верифікація цієї моделі проведена за допомогою прецизійного моделювання технологічного процесу з використанням класичного рівняння теплопровідності інструменту в часткових похідних в циліндричних координатах. Процесами, що описуються диференціальними рівняннями у часткових похідних, доволі складно керувати. Проблема в тому, що функція керування частіше за все входить до термінальної умови, а це ускладнює моделювання процесу, яким потрібно керувати. Тому ця

термінальна умова замінена еквівалентною дельта-функцією в правій частині диференціального рівняння у відповідності до теорії синтезу розподілених систем керування. Розв'язання рівняння проводиться з використанням функцій Бесселя 1-го роду 0-го і 1-го порядків.

Розроблена математична модель динаміки теплових процесів в інструменті в процесі нанесення покриття. Вхідною змінною моделі є напруга на підкладці, вихідною – температура інструменту.

Розроблена математична модель динаміки тиску газу в вакуумній камері в процесі нанесення покриття. Вхідною змінною моделі є подача газу, вихідною – тиск в камері.

Розроблена математична модель динаміки процесу охолодження інструменту за допомогою інфрачервоного випромінювання і теплопередачі в опорну касету. Вхідною змінною моделі є подача газу, вихідною – температура інструменту. З використанням розробленого комплексу моделей динаміки основних технологічних процесів установки розроблено сучасні високоякісні системи керування цими процесами.

Розроблена програмно-технічна структура комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки іонно-плазмового напилення «Булат». Розроблене рішення по автоматизації дозволяє спростити завдання розробки і відлагодження нових рецептів за допомогою спеціальних засобів для імітаційного моделювання установки в реальному часі. Також програмне забезпечення системи автоматизації дозволяє проводити синтез і відлагодження систем автоматичного керування для установки з заданими оператором параметрами технологічного процесу і вимогами до якісних показників інструменту. Розроблена система використовується в навчальному процесі.

Ключові слова: металорізальний інструмент, нанесення покриттів, іонне бомбардування, нелінійна математична модель динаміки, система автоматичного керування, розподілена модель динаміки, система автоматизації, комп'ютерно-інтегрована система.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА:

Стаття в SCOPUS

1. Kirkopulo K., Tonkonogyi V., Stopakevych O., Stopakevych A. Design of a set of nonlinear control systems of the ARC PVD ion-plasma installation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. #2(2). P. 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127708>

Статті у наукових фахових виданнях

2. Киркопуло Е.Г. Разработка интерфейса оператора компьютерной системы автоматизации установки ионно-плазменного напыления. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*¹. 2018. №4. Т. 10. С. 54-61. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i4.1234>.

3. Тонконогий В.М., Киркопуло Е.Г. Прецизионное моделирование нагрева инструментов в процессе управления ионно-плазменной очисткой. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*¹. 2019. №2. Т. 11. С. 38-46. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i2.1375>.

4. Киркопуло Е.Г. Разработка программно-технической структуры компьютерно-интегрированной системы управления установкой ионно-плазменного напыления. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*¹. 2019. №3. Т. 11. С. 32-41. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i3.1497>

Матеріали конференцій та інші видання

5. Кіркопуло К. Г. Розробка автоматизованої системи керування установкою для плазмового нанесення покриттів. с.72: Матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2017», м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 року: тези конференції. Київ. 2017. 267с.

¹ Видання входить до міжнародних наукометричних баз DOAJ, Scilit, EBSCO, UlrichWEB, ROAD, DORA, SHERPA/RoMEO, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, BASE, Google Scholar, CrossRef.

6. Киркопуло К.Г. Разработка системы автоматизации ионно-плазменной установки. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конференції, 8-13 червня 2018 р. Одеса. 2018. С.110–113. ISBN 978-966-413-625-6

ABSTRACT

Kirkopulo Kateryna. Automation of control processes of the ARC PVD ion-plasma installation.

Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for Philosophy Doctor degree by specialty 151 – automation and computer- integrated technologies. Odesa National Polytechnic University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2020.

The dissertation is devoted to the actual topic of development of systems of automatic control of the process of ion-plasma coating the tool. The automation system improves the quality of the tools and the lifetime of the tools by taking into account the features of the technological process.

The complex of nonlinear mathematical models of all stages of technological process dynamics is developed in the work. Computer simulation was performed in the Simulink software package.

A mathematical model of heating dynamics to a linear program for metal-cutting tools in the process of ion purification is developed. The source of heat is a plasma arc. In the installation, the heating of the instrument is carried out both by the flow of ion bombardment heat and from the heated substrate, and the heat loss occurs as a result of radiation. For simplicity, the model is designed using ordinary differential equations. Verification of this model was performed using precision process modeling using the classical equation of thermal conductivity of the instrument in partial derivatives in cylindrical coordinates. The problem with controlling partial differential equations is that the control functions are usually

included in a terminal condition, which is not very convenient for modeling. Therefore, this terminal condition is replaced by an equivalent delta function on the right-hand side of the differential equation in accordance with the theory of distributed control systems design. The equation is solved using Bessel functions of 1st type 0th and 1st order.

A mathematical model of the dynamics of thermal processes in a tool in the coating process is developed. The input variable of the model is the voltage on the substrate, the output is the instrument temperature.

A mathematical model of gas pressure dynamics in a vacuum chamber during the coating process is developed. The input variable of the model is gas flow, the output variable is the pressure in the chamber.

A mathematical model of the dynamics of the cooling process of the instrument with the help of infrared radiation and heat transfer to the support cassette is developed. The input change of the model is gas flow, the output is the temperature of the instrument.

Using the developed complex of models of dynamics of the main technological processes of installation, modern high-quality control systems for these processes have been developed.

The software and technical structure of the computer-integrated system of automation of the installation of ion-plasma spraying is developed. The developed automation solution simplifies the problem of developing and debugging new recipes with the help of special tools for simulating real-time installation simulation. Automation system software also enables the design and debugging of automatic control systems for installation with the operator-defined process parameters and requirements for quality instrument performance. The developed system is used in the educational process.

Keywords: metal-cutting tool, coating, ion bombardment, ARC PVD, nonlinear mathematical model of dynamics, system of automatic control, distributed model of dynamics, system of automation, computer-integrated system.

LIST OF PUBLICATIONS

Articles in the SCOPUS

1. Kirkopulo K., Tonkonogyi V., Stopakevych O., Stopakevych A. Design of a set of nonlinear control systems for ARC PVD ion-plasma installation. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2018 # 2 (2). P. 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127708>

Articles in the scientific professional editions

2. Kirkopulo K. Development of an interface for the operator of a computer system for automation of the installation of ion-plasma sputtering. Automation of technological and business processes². 2018. №4. Vol. 10, pp. 54-61. Doi: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i4.1234>.

3. Tonkonogyi V.M, Kirkopulo K.G. Precision modeling of tool heating during control of ion-plasma purification. Automation of technological and business processes². 2019. №2. T. 11. P. 38-46. Doi: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i2.1375>.

4. Tonkonogyi V.M, Kirkopulo K.G. Development of a software-technical structure of a computer-integrated system for controlling the installation of ion-plasma sputtering. Automation of technological and business processes². 2019. №3. T. 11. P. 32-41. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i3.1497>

Conference materials and other publications

5. Kirkopulo K.G. Development of an automated control system for a plasma coating plant. p.72: Proceedings of the XXIV International Conference on Automatic Control «Automation – 2017», Kyiv, Ukraine., September 13-15, 2017: abstracts of the conference. Kiev. 2017. 267 p.

6. Kirkopulo K.G. Development of automation system for ion-plasma installation. Measuring and computing technology in technological processes:

² Journal is included in international scientific reference databases DOAJ, Scilit, EBSCO, UlrichWEB, ROAD, DORA, SHERPA/RoMEO, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, BASE, Google Scholar, CrossRef.

Materials XVIII intern. scientific-technical Conference, June 8-13, 2018 in Odessa.
2018. P.110–113. ISBN 978-966-413-625-6

ЗМІСТ

Вступ.....	11
РОЗДІЛ 1	
Аналіз методів моделювання та автоматизації процесів керування установками іонно-плазмового напилення.....	16
1.1 Огляд та порівняльний аналіз технологій напилення	16
1.2 Огляд технології катодно-іонного бомбардування та основних установок, які її реалізують.....	24
1.3 Аналіз функціональної структури систем автоматизації установок	30
1.4 Аналіз програмно-технічної структури сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації малої інформаційної потужності	33
1.5 Висновки до першого розділу.....	40
РОЗДІЛ 2	
Розробка комплексу математичного моделей динаміки технологічних процесів установки.....	42
2.1 Особливості задачі моделювання технологічного процесу.....	42
2.2 Розробка моделей динаміки установки при іонно-плазмовому очищенні інструменту	45
2.3 Розробка моделей динаміки установки при нанесенні покриття на інструмент	52
2.3.1 Розробка моделі теплових процесів при нанесенні покриття	52
2.3.2 Розробка моделі динаміки тиску при нанесенні покриття	53
2.4 Розробка моделі динаміки установки при охолодженні інструменту ...	54
2.5 Висновки до другого розділу	55
РОЗДІЛ 3	
Розробка комплексу систем автоматичного керування технологічними процесами установки	56
3.1 Розробка системи керування очищенням	56
3.2 Розробка системи керування установкою при нанесенні іонно-плазмового покриття на інструмент.....	66

	10
3.2.1 Керування тепловими процесами в інструменті.....	66
3.2.2 Керування тиском у вакуумній камері.....	69
3.3 Розробка системи керування установкою на етапі охолодження.....	74
3.4 Оцінка прямих показників якості інструменту після роботи системи керування	77
3.5 Висновки до третього розділу.....	78
РОЗДІЛ 4	
Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки.....	79
4.1 Розробка алгоритмічного забезпечення системи автоматизації	79
4.2 Розробка програмно-технічної структури системи автоматизації.....	81
4.3 Розробка інтерфейсу оператора комп'ютерної системи автоматизації установки.....	86
4.4 Розробка програмної реалізації системи автоматизації	93
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	105
Висновки	107
Список використаних джерел	109
Додаток А Діагностика сенсорної мережі та налаштування OPC-серверу...	121
Додаток Б Формування серверу баз даних	124
Додаток В Реалізація показу температури в Simple SCADA	129
Додаток Г Програма автоматичного визначення параметрів рецепту	143
Додаток Д Програма автоматичного регулювання технологічним процесом	148
Додаток Е Програма для ручного управління.....	152
Додаток Ж Копії актів впровадження	154

ВСТУП

Нанесення плазмових покриттів на металорізальний інструмент набуває все більшого поширення в сучасному машинобудуванні, автомобільній, приладобудівній, аерокосмічній та інших галузях. Нанесені плазмою покриття заданого хімічного складу змінюють антикорозійні, зносостійкі, триботехнічні, теплові та інші характеристики робочих поверхонь інструменту. Поверхневий шар визначає властивості інструменту під час його експлуатації. Це дозволяє уникнути виробництва інструменту з дорогих та дефіцитних матеріалів. Нанесенням покриттів на робочу поверхню інструменту можна знизити не тільки вартість виробництва, але й покращити експлуатаційні характеристики, поєднуючи особливості матеріалів покриття та основи. Доцільність використання металорізального інструменту з плазмовим покриттям його робочих поверхонь визначили напрямок досліджень, проведених у цій роботі.

Актуальність теми. При нанесенні плазмових покриттів на металорізальний інструмент постає питання оптимального проведення технологічного процесу, який забезпечить досягнення заданих властивостей поверхні, відсутність браку та високу продуктивність процесу обробки. Досягнути оптимальних властивостей технологічного процесу можна лише запровадивши якісну комп'ютерно-інтегровану систему керування технологічною установкою, яка забезпечує процес нанесення іонно-плазмових покриттів. Для створення такої системи потрібно здійснити розробку комплексу математичних моделей динаміки основних технологічних процесів установки. Незважаючи на те, що моделювання окремих процесів проводилося і раніше, на сучасному етапі автоматизації треба як моделювати технологічні процеси в комплексі, так і розробляти систему автоматизації установки в комплексі. Виходячи із зазначених обставин, можна стверджувати, що розробка комплексу моделей динаміки установки іонно-плазмового напилення металорізального інструмента та систем автоматизації установки, яка спрямована на забезпечення якості та продуктивності обробки інструмента, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до фундаментальних напрямків науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету «Підвищення ефективності функціонування технічних систем» (№ державної реєстрації 0114U005502), «Розробка компонентів інтелектуальних інформаційних систем для моделювання та проектування складних об'єктів та систем» (№ державної реєстрації 0115U000835).

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є створення математичного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки, яка забезпечує високі якісні та кількісні показники процесів в установці іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент та підвищення продуктивності (за рахунок зниження браку) і ритмічності роботи установки, та конкурентоспроможності металорізального інструменту.

Для досягнення цієї мети в роботі були поставлені та вирішені **наступні задачі:**

- проаналізовано технологічний процес і існуючі системи автоматизації установки іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент;
- розроблено комплекс математичних моделей динаміки основних технологічних процесів установки: очищення, напилення та охолодження;
- створено керовану розподілену математичну модель динаміки радіального переносу тепла в металорізальному інструменті під дією плазмової дуги з метою перевірки точності розробленої математичної моделі динаміки процесу очищення інструменту;
- розроблено комплекс систем керування основних технологічних процесів установки: очищення, напилення та охолодження з використанням розроблених математичних моделей динаміки;
- розроблено інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки у вигляді комплексу комп'ютерних форм оператора установки;
- розроблено програмно-технічну структуру комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки.

Об'єктом дослідження є процес розробки математичного забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки, яка забезпечує високі якісні та кількісні показники процесів в установці іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент.

Предметом дослідження є математичне, алгоритмічне та інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент.

Методи дослідження. Теоретичні методи ґрунтуються на фундаментальних положеннях теплофізики та фізики твердого тіла, теорії автоматичного керування, теорії розподілених систем керування, перетворенні Лапласа, математичному аналізу. Для розв'язку теплової задачі використано метод А.Г. Бутковського, функції Бесселя. Для створення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації використані методи розробки програмно-технічної структури систем реального часу, методи розробки інформаційного забезпечення у вигляді сучасних інтерфейсів систем автоматизації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку комплексу математичних моделей динаміки основних технологічних процесів установки іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент:

- отримала подальший розвиток математична модель радіальної теплопровідності металорізального інструмента під дією плазмового струменя, яка відрізняється тим, що дія струменю замість крайової умови вводиться в праву частину диференціального рівняння в часткових похідних за методом А. Г. Бутковського, що суттєво спрощує моделювання процесу перенесення тепла в інструменті;
- вперше розроблено комплекс нелінійних моделей динаміки основних етапів технологічного процесу нанесення іонно-плазмового покриття на металорізальний інструмент, на базі яких створено комплекс систем керування;

- вперше розроблено комплекс нелінійних систем керування основними етапами технологічного процесу нанесення іонно-плазмового покриття, що дозволяє мінімізувати відхилення заданої температури інструменту, що обробляється, що позначається на міцності інструменту;
- отримало подальший розвиток інформаційне забезпечення оператора-технолога установки та програмно-технічна структура комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки, яка функціонує в реальному часі за рахунок використання нелінійних моделей замість лінеаризованих, а також дозволяє реалізувати зменшення відхилення регламентних показників установки, що призводить до поліпшення якості інструменту з покриттям.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблене програмне забезпечення системи автоматизації установки іонно-плазмового напилення дозволило проводити синтез і налагодження систем автоматичного керування установки з заданими оператором параметрами технологічного процесу і вимогами до якісних показників інструменту.

На базі ХК «Мікрон» було проведено випробування різального інструменту з іонно-плазовими зносостійкими покриттями з використанням розроблених моделей, а також синтез і налагодження систем автоматичного керування установки за допомогою розробленого програмного забезпечення. Запропоновані моделі та методи, а також алгоритми і програми, розроблені для реалізації алгоритмів, впроваджені в навчальний процес в Одеському національному політехнічному університеті і використовуються в дисциплінах, які вивчають системи автоматизації установок нанесення покриттів на металорізальний інструмент, самі автоматизовані установки, а також у курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, представлені до захисту, одержані автором особисто. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать: розробка математичних моделей динаміки, розробка систем керування технологічними процесами та їх дослідження [1].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на XXIV Міжнародній конференції з

автоматичного управління «Автоматика – 2017» (Київ, 2017) та XVIII міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – ВОТТП» (Одеса, 2018).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень викладені в 4 наукових публікаціях, серед яких: 1 стаття в індексована в SCOPUS; 3 статті у наукових фахових виданнях зі спеціального переліку МОН України, які входять до міжнародних наукометричних баз; 2 доповіді на міжнародних наукових конференціях під проводом МОН України та IEEE.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКАМИ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

1.1 Огляд та порівняльний аналіз технологій напилення

Сучасне машинобудування характеризується розширенням та постійним оновленням номенклатури й асортименту сталей й сплавів, підвищуються вимоги до точності та чистоти металообробки. Підвищена увага, при цьому, приділяється розвитку технологій зміцнення металорізальних інструментів і покращенням систем автоматизації установок, які реалізують такі технології. Зараз можна виділити методи зміцнення металорізального інструменту, приведені в таблиці 1.1 [1].

Вибір методу зміцнення залежить як від типу інструментального матеріалу, так і від способу покриття: поверхнєве покриття другим матеріалом, обробка поверхового шару матеріалу, об'ємна обробка та ін. Також треба зазначити, що класифікація не є виключною, оскільки обробка деяких інструментів вимагає застосування декількох методів послідовно.

Приведені вище методи відрізняються вимогами до якості попередньої обробки інструменту. Так, найменш вимогливими є методи, які зміцнюють інструмент великою питомою енергією на його поверхні, наприклад термомеханічні методи, електроіскрове легування, лазерна обробка, методи об'ємного зміцнення.

Найбільше поширення отримали наступні методи нанесення зносостійких покриттів [2, 3]:

- методи хімічного осадження в вакуумі з газової фази (CVD);
- методи фізичного осадження з газової фази (PVD).

Таблиця 1.1 – Методи зміцнення металорізального інструменту

Група методів					
Термічні	Хімічні	Хіміко-термічні	Термо-механичні	Механічні	Електро-фізичні
Пайка	Обробка активними речовинами	Дифузійне насичення азотом	Плазмове напилення,	Антифрикційні покриття	Магнітне оброблення
Закалювання в розчинах солей в вакуумі	Хімічне осадження з газової фази	Дифузійне насичення азотом й вуглецем	Детонаційне напилення	Дробеструйна обробка	Електроіскрове легування
Вакуумна термообробка		Дифузійне насичення бором, бромом та ін.		Вібраційна обробка	Лазерна обробка
Звичайна термообробка					Ультразвукова обробка
					Іонно-плазмове напилення

Основною перевагою цих методів є можливість створення високого рівня фізико-механічних властивостей матеріалів в тонких поверхневих шарах, нанесення щільних покриттів з тугоплавких хімічних з'єднань. Крім того, ці методи дозволяють:

- забезпечити високу адгезію покриття до підкладки;
- здійснювати рівномірність покриття по товщині на великій площі;

- варіювати склад покриття в широкому діапазоні, в межах одного технологічного циклу;
- отримувати високу чистоту поверхні покриття;
- забезпечувати екологічну чистоту виробничого циклу.

Проведемо більш докладний аналіз вказаних методів [4–12].

Основною особливістю технологічних методів CVD є протікання хімічних реакцій між газовими складовими робочої атмосфери, що призводить до утворення тонких шарів на поверхні основного матеріалу. Це можливо в першу чергу при високих температурах і відповідному тиску в суворо визначених термодинамічних умовах. Покриття, що отримані методами хімічного осадження з газової фази, формуються при високих температурах і з'єднуються з основним матеріалом на основі механізму дифузійного розчинення.

Розглянемо основні методи CVD.

1. APCVD (Atmospheric Pressure CVD) [13]. Найпростіша технологія. Реалізується при температурі від 1170K до 1370 K, формуючи шар карбідів, нітритів, боридів чи оксидів. Атмосфера в камері складається з вуглеводню, азоту, водню чи аргону, які дифундують в з'єднання. Схема установки показана на рис. 1.1. Використання печі забезпечує стабільність температури і рівномірність покриття. Основний недолік – занадто висока температура, яка обмежує застосування лише твердими сплавами.

2. MTCVD (Medium Temperature CVD) [14]. Реалізується при більш низьких температурах за рахунок використання придатних для цього реагентів.

3. LPCVD (Low Pressure CVD). Реалізується при малому тиску (1-5 кПа), який також впливає на зниження робочої температури.

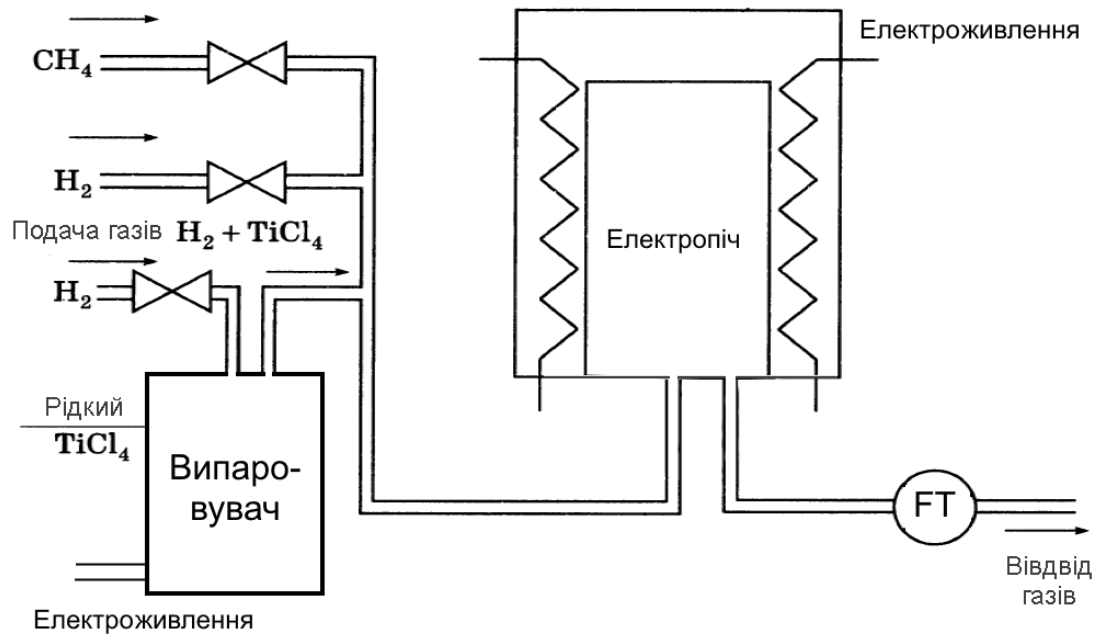


Рисунок 1.1 – Схема установки нанесення покриттів методом ARCVD

4. PACVD (Plasma Assisted CVD) [15]. Електрична активація газових реагентів за рахунок електричного розряду чи пропускання струму високої частоти допомагає знизити температуру в камері ще більше. Установка в цьому випадку додатково оснащена джерелом високої напруги. Вплив плазми допомагає очищати поверхні, що забезпечує добру адгезійну взаємодію покриття з основним матеріалом і високу потужність процесу. Робочий діапазон температур 680-870 К, тиску – 1-13 ГПа. Технологія використовується для нанесення покриттів на інструменти з швидкоріжучих сталей і твердих сплавів підвищеної в'язкості.

Не всі зносостійкі матеріали можуть існувати в газоподібному стані, а режим підвищеної температури робить неможливим обробку покращених сталей. При обробці твердих сплавів методом CVD також можливі труднощі, які пов'язані зі зниженням в'язкості поверхні та її охрупчуванням. Методи MTCVD і LPCVD дозволяють нейтралізувати проблему охрупчування, однак швидкоріжучий і штамповий інструмент за їх допомогою обробляти не доцільно. Метод PACVD дозволяє знизити робочу температуру, що робить його придатним для застосування для покращених сталей.

Методи PVD формують покриття при відносно низьких температурах. Покриття з'єднуються з основним матеріалом завдяки адгезії, іноді одночасно адгезії і дифузії.

Зараз використовуються декілька технологічних методів PVD:

- плазмове напилення (PAVD, Plasma Assisted PVD);
- активоване реактивне напилення (ARE, Activated Reactive Evaporation);
- активоване реактивне напилення при від'ємній поляризації основного матеріалу (BARE – Bias Activated Reactive Evaporation);
- тріодне реактивне іонне плакування (TRIP – Triode Reactive Ion Plating);
- реактивне дугове іонне плакування (RAIP, Reactive ARC Ion Plating);
- конденсація з іонним бомбардуванням (КІБ, Sputtering deposition);
- напилення в магнітному полі.

Плазмове напилення [11]. В звичайних умовах при відносно низьких температурах (біля 770 К) неможливо отримати покриття без додаткової активації взаємодіючих вихідних речовин. Така активація можлива при нагріванні вихідних матеріалів в результаті пропускання електричного струму, індукційного розігріву, нагріву лазерним випромінюванням чи бомбардуванням електронним пучком. Вид джерела теплоти залежить від температури плавлення матеріалу, його хімічної подібності з основним матеріалом і бажаною швидкістю нанесення покриття. В результаті активації газове середовище іонізується і утворюється низькотемпературна плазма. Карбіди, нітриди і другі речовини формуються в результаті кристалізації з плазми при відсутніх хімічних реакціях. Для забезпечення стабільності плазми необхідні зовнішні джерела енергії. На процес осадження покриття впливають складні процеси енергетичного обміну між частинками плазми, зокрема:

- передача енергії електричного поля вільним електронами;
- передача енергії від електронів іншим частинкам плазми, що підвищує їх внутрішню енергію;

- хімічні реакції між частинками з високою внутрішньою енергією.

Метод активованого реактивного напилення [16] базується на вводиті в робочу камеру допоміжного електроду. Іонізація газу проходить внаслідок прискорення електронів, які є емітовані з поверхні розплавленого металу під впливом допоміжного електроду з додатковим потенціалом. Електрони в результаті взаємних ударів передають свою енергію нейтральним частинками, що викликає їх збудження чи іонізацію В таких умовах з високою ймовірністю проходять співудари між частинками випареного матеріалу і газової плазми.

Активоване реактивне напилення при від'ємній поляризації основного матеріалу засновано на збільшенні ступеню іонізації і кінетичній енергії частинок, які осаджуються шляхом додаткової поляризації основи електричним зарядом 2000-3000 В.

Метод тріодного реактивного іонного плакування є модифікацією попереднього методу. Одиночний електрод в цьому випадку замінено системою електродів, що викликає електричний розряд і утворення плазми в просторі між катодом (джерелом парів металу) і анодів (основним матеріалом). Для забезпечення високої швидкості осадження покриття необхідний тиск реактивних складових газової атмосфери в межах 0,1-1 Па. Однак це призводить до скорочення середнього шаху пробігу іонів металу, тобто дистанція між джерелом випаровування і основним матеріалом не може перевищувати 40 см.

Метод реактивного дугового іонного плакування [17] для випаровування матеріалу використовує постійні чи імпульсні електричні розряди великої сили при зниженому тиску. Плазма, яка утворилась в електричній дузі, значно більш іонізована (ступінь іонізації 90%) в порівнянні з плазмою, що виникла між джерелом парів металу і основним матеріалом. Для кращого направлення потоку плазми і підвищення кінетичної енергії частинок використовується від'ємна поляризація основного матеріалу (біля 100 В). Анодом може бути будь-який елемент

пристрою, в тому числі вакуумна камера цілком. При високій напрузі на катоді (1000 В) забезпечується попереднє очищення поверхні, при більш низькому (120 В) – нанесення покриття. При використанні декількох катодів можливо нанесення покриттів на великогабаритні предмети.

Метод катодно-іонного бомбардування (КІБ) чи конденсації з іонним бомбардуванням характеризується тим, що частинки осажденного матеріалу вибиваються внаслідок бомбардування іонами з енергією 100..1000 еВ. Іони утворюються при електричному розряді постійного струму чи струму високої частоти. Анодом є заземлений основний матеріал, катод виготовляються з матеріалу, що розпиляється. Швидкість напилення залежить від густини струму в розряді. Струм, в свою чергу, залежить від напруги між електродами і тиску в камері (не може перевищувати 10 Па). Збагачення робочої атмосфери аргоном покращує інтенсивність випаровування катоду і потужність процесу напилення.

Напилення в магнітному полі забезпечує зростанням густини іонізованого струму в 10-100 разів в порівнянні з традиційним напиленням. Це відбувається за рахунок збільшення довжини пробігу вільних електронів.

Таким чином, можна зробити наступні висновки.

Метод CVD практично не має обмежень за хімічним складом покриттів. Всі присутні частинки можуть бути осажені на поверхні матеріалу. Які покриття при цьому утворюються залежить від комбінації матеріалів і параметрів процесу. Склад покриття залежить від парціального тиску газу і швидкості осадження покриття.

При використанні CVD-методу хімічні реакції проходять в безпосередній близькості чи на поверхні матеріалу, що обробляється.

В протилежність процесам PVD, при яких тверді матеріали покриття переходять в газоподібну фазу випаровуванням чи розпилюванням, при CVD-процесі в камеру для нанесення покриттів подається суміш газів, причому для протікання необхідних хімічних реакцій необхідна температура до 1300 К. Ця умова істотно обмежує число матеріалів, на які можливо

нанести CVD-покриття. Однак існують різновиди методу CVD (наприклад PAPVD), що дозволяють знизити температуру нанесення до 770 К. Практично такі різновиди є поєднанням двох методів – хімічне нанесення (CVD) проходить в середовищі плазми (як в PVD).

На відміну від PVD процеси CVD проходять при більш високих тисках: 100-1000 Па. Покриття наноситься на всю поверхню інструменту. Відпадає необхідність обертання інструменту, як в методі PVD.

Установки CVD як правило мають достатньо великі габарити. Для запобігання викидів небезпечних газів в атмосферу використовується спеціальна система фільтрів. Однак в той же час CVD менш чутливі до якості обробки матеріалу перед нанесенням покриття.

З точки зору потенційної якості продукту можливо зробити висновок, що технологія застосування PACVD дозволяє досягнути майже такий результат, як і застосування технологій класу PVD. Однак, з економічної точки зору, технології PVD більш ефективні. Дослідження [18] виявило, що при використанні методики іонно-плазмового напилення витрачено 112 кВт·год при осадженні TiN, а при осадженні за допомогою методу CVD витрачено 974 кВт·год при осадженні TiCN / Al₂O₃. Процес PVD, особливо процес розпилення, не вимагає дуже високих температур, що робить його значно ефективнішим при нанесенні покриттів на металорізальний інструмент. Більш докладно про перспективи розвитку PVD технологій, зокрема з точки зору економічної ефективності описано в огляді [19].

Технології PVD є універсальними для всіх матеріалів, крім того саме установки цього типу найбільш поширені в Україні, тому в дисертаційній роботі присвяtimo увагу саме технологічним процесам технології найбільш поширеній і одній з найбільш розвинутих технологій PVD – технології КІБ.

1.2 Огляд технології катодно-іонного бомбардування та основних установок, які її реалізують

В роботі [20] розробником методу КІБ надано докладний огляд цієї технології та історії її розвитку.

Для процесів КІБ надзвичайно важлива густина іонного потоку і енергія іонів при бомбардуванні інструментальної основи і подальшого осадження покриття. Кінетична енергія іона в момент удару по поверхні інструментальної основи визначається атомною будовою речовини, що випарюється, значенням прискорювальної напруги, що подається на інструментальну основу і кратністю заряду іонів. Залежно від часу дії енергія іонів визначає температуру на робочих поверхнях інструменту, величина якої надзвичайно важлива з точки зору створення необхідного рівня термічного активування поверхні інструментальної основи перед нанесенням покриття і сприятливого протікання плазмохімічної реакції з утворенням тугоплавких, термодинамічно стійких з'єднань стехіометричного складу. Якісні характеристики покриттів, а, отже, і ефективність інструменту з покриттям, багато в чому визначається умовами отримання покриттів. Зокрема, оптимальний рівень термоактивації і іонної очистки, який залежить від типу, кількості та енергії іонів (електронів або фотонів), робочих поверхонь інструменту визначає рівень адгезійної потужності зчеплення покриття з інструментальною основою. Енергетичний рівень іонів при осадженні покриття сильно впливає на структурно-фазовий склад і властивості покриття, що, в кінцевому підсумку, визначає ріжучі властивості інструменту з покриттям, його ефективність для різних операцій різання.

Для досягнення великої густини іонного потоку використовують спеціальні плазмооптичні пристрої, які називаються холлівськими ерозійними плазмовими прискорювачами. Прискорювачі дозволяють ефективно керувати як швидкістю, так і плазменно - фізичними характеристиками іонного потоку. У прискорювачі є дві зони: зона генерації

(область катодних мікроплям), процеси в якій не залежать від магнітного поля і визначаються лише властивостями матеріалу катода, і зона прискорення (в обсязі системи), на процеси в якій сильно впливає магнітне поле. Для процесів КІБ характерна висока продуктивність процесів осадження покриттів, яка в десятки разів перевищує продуктивність процесів CVD. Це пов'язано з можливістю прискорення високо іонізованого потоку іонів шляхом створення негативного потенціалу (щодо корпусу камери) на інструментальній основі або значного підвищення його густини і гомогенності шляхом застосування прискорюючих магнітних систем (холлівських прискорювачів).

Вакуумно-дугові технології є екологічно чистими, так як процеси синтезу покриттів здійснюються в вакуумі. Крім того, їх переваги – це висока продуктивність, економічність, можливість розробки ефективних систем автоматизованого керування технологічними процесами.

Нанесення покриттів методом КІБ здійснюється наступним чином:

- формується плазмовий потік іонів металу за допомогою вакуумної дуги з холодним катодом;
- потік прискорюється прикладенням від'ємного потенціалу до інструменту;
- проводиться очищення поверхні інструменту шляхом інтенсивного бомбардування поверхні іонами речовини, яка розпилюється-і створює умови для високої адгезії покриття до підкладки;
- іони металу конденсуються на інструменті;
- здійснюються-плазмохімічні реакції потоку з реактивним газом.

Подаючи в вакуумну камеру газ-реагент під час електродугового випаровування тугоплавкого металу, можливо отримати покриття на основі нітридів, карбідів і інших з'єднань металів IV-VI груп.

При високому потенціалі підкладки розпилюється не тільки метал, який осаджується, але і частково поверховий шар підкладки. Так здійснюється іонне травлення підкладки, яке забезпечує очищення поверхні.

Одночасно, прискорені іони впроваджуються в підкладку і насичують її тонкий поверховий шар.

Глибина проникнення іонів є достатньою для забезпечення надійної адгезії покриття. Регулюючи потік енергії іонів можна безперервно створювати в процесі осадження нові центри конденсації, перериваючи зростання крупних зерен і отримувати мікрокристалічну структуру покриття.

Іонним бомбардуванням можна проводити випал конденсату, який осаджується, і отримувати крупнозернисту структуру покриття.

Метод КІБ повністю виключає вплив підкладки на структуру покриття по товщині шару, який покриває інструмент.

Поверховий характер нагріву конденсату пучком іонів (при відводі тепла від підкладки) повністю виключає процеси рекристалізації і дифузії, не погіршуючи при цьому умов формування відповідної структури конденсату.

Характерною особливістю електродугових випарювачів, які використовуються в методі КІБ, є практично безінерційний початок випаровування при подачі напруги на випарювач. При одночасному використанні декількох випарювачів можна отримати покриття складної структури. Фізичні основи вказаного процесу докладно описані в літературі [21–29].

Технічні характеристики основних установок, які використовують метод КІБ, приведені в таблиці 1.2 [32].

Таблиця 1.2 – Характеристика установок для покриття інструментів методом КІБ

Показник	Булат-3Т	Булат-6К	Булат-9	ННВ6.6	Пуск 83
1	2	3	4	5	6
Габарити вакумної камери, мм	500x500	500x500	600x650	600x650	360x250

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6
Число генераторів плазми	3	4	5	4	2
Швидкість росту покриття, мкм/с	до 10–20	40	до 40	60–90	20–30
Час типового технологічного циклу, хв.	120-150	90	60-90	60-90	20-30
Діапазон регулювання напруги на деталі, В	0-250	0-380	30-1700	0-280	0-1200
Діапазон регулювання середньої енергії однократних йонів, еВ	до 1200	До 1700	до 1700	до 1700	до 1200
Габарити установки, м	2.17х 1.95х 2.16	2.4х 1.7х 2.1	2.2х 2.1х 2.2	3.9х 3.6х 2.07	1.87х 0.69х 1.85

Як обладнання для нанесення покриття по методу КІБ в першу чергу використовуються установки типу Булат (Харків) і ННВ6-6-И1 (Саратов і Новосибірськ). Розглянемо принципову схему установки типу Булат (рисунок 1.2). [30, 31].

З початку серійного випуску вказаних установок крупними підприємствами почали розроблятися їх модифікації для розв'язання окремих технологічних задач. Прикладом таких модифікацій є установки Пуск (НДІТаптопром), Юніон (ЦНДТІ) та установки фірми Multi ARC (США), які випускаються під торговою маркою Jon Bond.

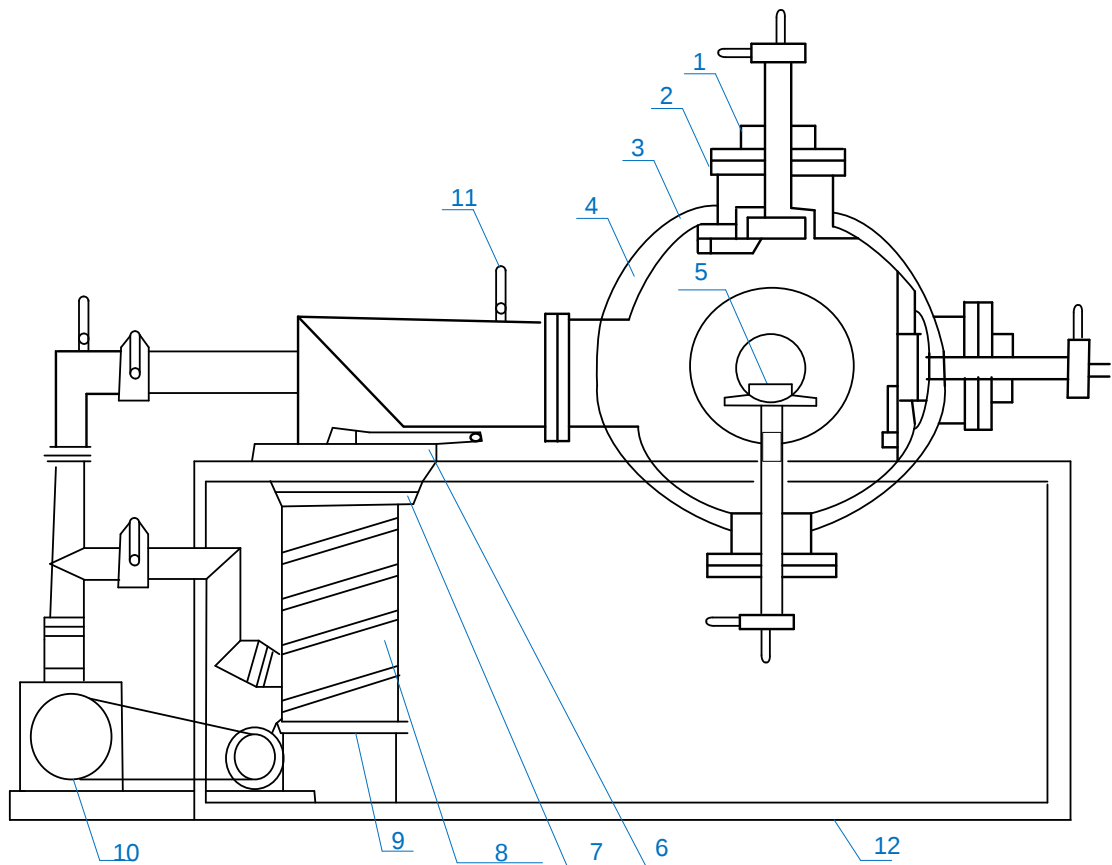


Рисунок 1.2 – Схема установки Булат: 1 – фокусирующая катушка, 2 – катод, 3 – подпалюющий электрод, 4 – вакуумная камера, 5 – подкладка, 6 – азотная пастка, 7 – водяная пастка, 8 – высоковакуумный агрегат, 9 – нагреватель, 10 – форвакуумный насос, 11 – манометрическая лампа, 12 – система водяного охлаждения

Подальшим шляхом розвитку установок є використання покращеного методу КІБ, який отримав назву КІНТ – конденсація іонна низькотемпературна [33].

Цей метод має наступні переваги:

- можливість нанесення покриття на інструменти, які не допускають нагрівання;
- можливість одночасного нанесення покриття на деталі різних типів;
- стабільність покриттів з часом;
- скорочення циклу осадження;
- спрощення конструкції установки для нанесення.

Але серійні установки, які використовують метод КІНТ, наразі не відомі.

Розглянемо вітчизняні типові установки, які реалізують іонно-плазмове бомбардування методом КІБ – установки «Булат».

Першою серійною установкою, яка стала прототипом для усіх подальших модифікацій є установка «Булат-3» [20]. Ця установка оснащена трьома випарювачами. До складу установки включається датчик температури, натікач газу-реагенту з тонким регулюванням кількості газу, який подається. Завантаження проводиться вручну збоку за горизонтальною віссю. Креслення цієї установки відомі багатьом спеціалістам в машинобудуванні, що призвело до розвитку великої кількості модифікацій.

Установка «Булат-6» оснащена випарювачем з магнітним фокусуванням іонного пучка і електронним підпалом дуги, однак ця установка випускалась нетривалий час і наразі випуск її припинено.

Установка «Булат-9» описана в статті [34]. Установка має 4 вакуумно-дугові джерела плазми, одне з яких включає в себе плазмовий фільтр, 4-х каналне джерело живлення вакуумно-дугових розрядів, джерело від'ємної напруги зміщення, яке подається на вироби, що оброблюються, систему автоматичного завантаження-розвантаження виробу, що обробляється. Установка оснащена системою програмного керування. Програма відкачки забезпечує керування операціями переключення клапанів вакуумної системи, вивантаження-завантаження виробів, розгерметизації камери. Ця програма реалізована на ПЗПП K155PE3 ємністю 256 біт. Також система оснащена комплектом ППЗП, що реалізує 10 програм для керування виконавчими елементами. Передбачена цифрова індикація параметрів. Про кінець технологічного процесу інформують мигаючий світовий й переривчатий звуковий сигнали. Установка не є предметом серійного виробництва.

В цілому моделі установок методу КІБ з точки зору керування є вразливими. Основні параметри технологічного процесу контролюються оператором візуально, тому ефективність процесу залежить від кваліфікації й

уваги оператора. Майже всі існуючі моделі установок фактично керуються в ручному режимі, а існуючі реалізації програмного керування побудовані без можливості адаптації системи керування до конкретного інструмента. Винятком є лише установки фірми Multi Arc, що використовують запатентований алгоритм керування за статистичними даними, що, на наш погляд, не є оптимальним. Крім того, установки фірми Multi Arc є занадто дорогими навіть для ринку США, тому їх застосування не є економічно доцільним для виробництва України.

Отже, зараз розробка якісних системи комп'ютерної автоматизації іонно-плазмових установок, що реалізують метод КІБ, які дозволяють досягти якісний результат незалежно від професійних якостей апаратника, є актуальною.

1.3 Аналіз функціональної структури систем автоматизації установок

Огляд систем автоматизації надруковано в роботі [35]. Фундаментальним дослідженням систем автоматизації установок іонно-плазмового покриття металорізального інструмента є робота [36], в якій розроблено ряд моделей всіх трьох етапів обробки інструмента і відповідні системи управління. Недоліком роботи є розробка і моделювання систем управління з використанням лінеаризованих моделей об'єктів управління при тому, що поведінка реальних об'єктів управління є істотно нелінійною. Не всі системи управління промодельовані. Не розроблено інтегрованої системи автоматизації установки. Ряд прийнятих технічних рішень в області автоматизації зараз є застарілим і допускає покращення якості обробки металорізального інструменту.

Окрім вказаної, відомий ряд робіт, які присвячені вдосконаленню локальних систем управління установок, близьких за принципом дії.

В роботі [37] розглядається система комп'ютерної автоматизації, яка включає контури підтримки вакууму і температури. Особливістю роботи є те, що вимірюється товщина покриття. Але стабілізація товщини покриття за допомогою системи управління не проводиться і, окрім того, точність вимірювання є невідомою. Система автоматизації є застарілою і замість використання сучасних сенсорних мереж, використовуються керуючі контролери, які через інтерфейс USB підключені до комп'ютера, що виконує основні розрахункові функції і відображення інформації. Недоліком системи є використання датчиків з інтерфейсами RS-232C і USB з перетворювачами між ними. Зазначені інтерфейси забезпечують передачу сигналу тільки на коротку відстань, а наявність проміжних перетворювачів знижує надійність системи.

В роботі [38] розглядаються системи автоматичного управління температурою і витратою газів в камеру хімічного нанесення покриттів за допомогою ПД - регуляторів. Але в роботі немає комплексного рішення для управління установкою.

В роботі [39] розроблена система управління, яка підтримує напругу дуги зміною подачі реакційного газу. Система є експериментальною і використовується для покриття оксидом алюмінію, що не представляє інтересу при вирішенні задачі покриття металорізального інструменту.

В роботі [40] розглянута система автоматичного керування установкою нанесення срібного покриття. Стабілізуються витрати газів, які подаються в установку, і товщина покриття. Однак зростання товщини покриття при розрахунку системи управління моделюється дуже спрощено, лінійною моделлю першого порядку без обліку фізики процесу нанесення покриття.

В роботі [41] розглянута залежність якості покриття від стабільності температури нанесення. Однак дослідження проведено тільки для установки хімічного осадження.

В роботі [42] описано вплив регульованих параметрів установок нанесення іонно-плазмових покриттів на цільові параметри інструмента. Нажаль, залежності описані тільки якісно – немає кількісних моделей.

В роботі [43] проведено співставлення роботи ПІД [44–46] та LQR [47–49] регуляторів для установки нанесення нікель-мідно-сріблених покриттів. Спрощена модель об'єкта керування співпадає з наведеною в роботі [40]. Показано, що невеликі переваги в якості перехідних процесів властиві системі з LQR регулятором.

В роботі [50] описана система керування струмом дуги з використанням ПІД-регулятора, який адаптується за допомогою фазифікованих правил. Модель дуги представлена спрощено в вигляді лінійного диференціального рівняння другого порядку. Система орієнтована на підтримання дуги при сварці.

В роботах [51, 52] спрощено описана структура системи керування установкою. Розглянуті два контури регулювання: концентрації газу в камері і розрідження. Концентратомір і вакуумметр підключені за допомогою інтерфейсу RS-232C. Особливістю системи є підсистема дистанційного керування живленням модулів установки, яка реалізується контролером за допомогою інтерфейсу RS-485.

В роботі [53] проведена розробка системи комп'ютерного керування установкою МАП-2, яка використовується для іонно-плазмового напilenня в авіаційній промисловості. Технічним ядром системи є промисловий панельний комп'ютер з сенсорним екраном. Описано комп'ютерний інтерфейс системи автоматизації, який орієнтовано на оператора з малим досвідом роботи з установкою. Системи керування не описані. Тільки вказано, що контролюється розрідження, струми і напруга, а також реалізована система подачі реакційного газу. Більш стара розробка для МАП-2 описана в роботі [54].

В роботі [55] створено новий датчик для моніторингу плазмової емісії, який забезпечує швидку реакцію в порівнянні з інерційними датчиками, що

використовуються для непрямих вимірювань. Точність показів датчика знижують дві обставини. По-перше, лінія візування може бути затінена рухом підкладки. По-друге, датчик в процесі роботи покривається матеріалом, який осаджується.

В роботі [56] зроблена спроба виконати структурний синтез автоматизованої системи керування балансом газів-реагентів, які подаються в вакуумну камеру в технології нанесенні іонно-плазмових покриттів. Але система керування не розроблена.

В роботі [57] описана розроблена система автоматизації установки АНГА-1 для нанесення покриттів на невеликі деталі.

Установка має трьохступеневу систему відкачування з використанням пластинчато-роторного і двоохроторного насосів.

Особливістю системи керування є те, що вона має тільки три дискретних керуючих впливи – включення і вимкнення двох насосів, а також двигуна обертів. Вимірювані параметри – наруга зміщення, температура, сила струму використовуються для розрахунку необхідного часу роботи установки. Розрахунок проводиться на базі внутрішньої моделі, опис якої не приведено. Система автоматизації виконана у відповідності з сучасними вимогами, однак подробиці реалізації людино-машинного інтерфейсу і моделей, які використовуються, не приведені.

1.4 Аналіз програмно-технічної структури сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації малої інформаційної потужності

Комп'ютерно-інтегрована система автоматизації має відповідати наступним вимогам [58]:

- здійснювати керування технологічним об'єктом в темпі протікання виробничого процесу у відповідності з прийнятими критеріями ефективності функціонування;
- мати необхідні метрологічні характеристики вимірювальних каналів;

- виконувати покладені функції з їх заданими характеристиками;
- забезпечувати можливість взаємозв'язку функціонування з системами керування суміжних рівнів ієрархії і іншими, тобто мати властивості сумісності, в першу чергу технічної і інформаційної;
- відповідати ергономічним вимогам.

Зрозуміло, що рівень вимог і особливості технічної реалізації залежать від багатьох факторів: сфери застосування, галузі, вимог до якості продукції, складності технологічного процесу, вибухобезпечності та ін. [59]. АСУ ТП установки КІБ відповідає наступній класифікації [56]:

- система належить до нижнього рівня ієрархії можливого керування;
- керування ведеться неперервно-дискретним технологічним процесом;
- середньої надійності, коли при відказі АСУТП установка зупиняється;
- малої інформаційної потужності, коли кількість інформаційних каналів не перевищує 40 одиниць.

З опорою на приведену класифікацію, можна проаналізувати основні складові програмно-технічної структури АСУТП.

З'єднання датчиків і виконавчих механізмів з керуючим пристроєм зараз можна здійснити як окремими дротами, так і за допомогою промислової сенсорної мережі. Застосування промислової мережі забезпечує надійне з'єднання й високу точність передачі між різними пристроями. Використання сенсорних мереж в АСУ ТП дозволяє збільшити гнучкість побудови, спрощує інтеграцію і обслуговування, відповідає рекомендаціям сучасних промислових стандартів. Зараз існує щонайменше 50 протоколів сенсорних мереж, таких як Profibus [60], HART [61], CAN [62]. Однак, найбільш розповсюдженою, вмонтованою в датчики, виконавчі механізми та промислові комп'ютери більшості виробників світу, є мережа RS 485Modbus RTU [63]. Недоліком такої мережі є її обмеження в 32 пристрої в одному сегменті мережі та відносно невисока швидкість передачі даних (9600 або 19200 бод), що для автоматизації установки КІБ є несуттєвим.

Хоча установку КІБ можна зробити працюючою практично в

автоматичному режимі, але процеси завантаження і вивантаження інструменту, вибір рецепту для роботи і налаштування установки виконуються людиною. Технологічний процес АСУТП не є повністю автоматизований і вимагає оператора. Система автоматизації має реалізовувати ряд алгоритмів керування, що не є складними з точки зору програмної реалізації на сучасних мікропроцесорах. Більш значне питання можливості модифікацій та адаптації розробленого програмного забезпечення. Наявність людини при роботі установки обумовлює наявність комп'ютера як засобу взаємодії з цією людиною. Довгий час класичним було поєднання програмованого логічного контролера з комп'ютером, на якому реалізовувався графічний інтерфейс і система генерації звітів [34]. Таке розділення було обумовлено ненадійністю комп'ютерів. З розвитком комп'ютерної техніки, появою промислових комп'ютерів з сенсорними екранами таке розділення стало недоцільним. Оскільки стоїть задача керування одним промисловим агрегатом з постійним втручанням оператора і при наявній можливості виявлення необхідності модифікації програмних алгоритмів системи керування доцільно в якості керуючого пристрою використовувати промисловий комп'ютер з сенсорним екраном і інтерфейсом сенсорної мережі [64].

Для надійного комп'ютерного керування технологічним процесом необхідно використання спеціалізованої операційної системи жорсткого реального часу. Деякі системи, такі як QNX [65], VxWorks [66] та інші, мають високі технічні характеристики, але розробники програмних засобів систем автоматизації доволі рідко розробляють програмні продукти для таких систем. Це пов'язано із порівняно низькою кількістю користувачів. Невелика кількість наявних програмних продуктів для розв'язку типових задач автоматизації має порівняно низький функціонал і низьку ступінь відлагодження в різних ситуаціях, що може призводити до збоїв програмного забезпечення у зв'язку з низькою якістю закладених алгоритмів. Більш доцільним є використання такої типової операційної системи реального часу,

як Windows Embedded [67]. Хоча система є менш реактивною, вона дозволяє використання практично всього навантаження програмного забезпечення, яке розроблено для стандартної операційної системи Windows в натуральному вигляді чи з деякою модифікацією.

Сучасні комп'ютерно-інтегровані системи автоматизації використовують сервер інформаційних параметрів. Використання серверів інформаційних параметрів дозволяє спростити взаємодію стандартних програмних засобів з датчиками і виконавчими механізмами системи автоматизації. Сервери інформаційних параметрів промислових систем автоматизації використовують протоколи OPC, OPC UA та MQTT. Перевагою двох останніх є незалежність від операційної системи, але OPC є більш стандартним і відпрацьованим механізмом, тому в якості протоколу взаємодії з сервером інформаційних параметрів в нашому випадку доцільно застосовувати протокол OPC.

Значна кількість серверів інформаційних параметрів пов'язана з інтерфейсами програмованих логічних контролерів різних виробників. Серед OPC серверів, що можуть бути пов'язані безпосередньо з сенсорною мережею за протоколом Modbus найбільш розвинутим є сервер Modbus Universal MasterOPC (www.insat.ru). OPC-сервер має в своєму складі підтримку простої сценарної мови, що дозволяє проводити попередню обробку даних після їх зчитування з зовнішніх пристроїв, а також перед записом в них. Крім того, за допомогою сценарної мови можливо вирішувати задачі симуляції зміни інформаційних параметрів з метою відлагодження компонентів системи автоматизації.

Основним програмним елементом комп'ютерних систем автоматизації є система супервізорного керування і отримання даних – SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

Існуючі в даний час SCADA виконують безліч функцій, які можна розділити на кілька груп:

- диспетчерське управління;

- автоматичне керування;
- зберігання історії процесів;
- виконання функцій безпеки;
- виконання загальносистемних функцій;
- виконання розробленого для певної задачі програмного забезпечення.

Незважаючи на безліч функцій, які виконуються SCADA, основною її ознакою є наявність інтерфейсу з користувачем. При відсутності такого інтерфейсу перераховані вище функції збігаються з функціями засобів програмування контролерів, а керування є автоматичним, на противагу диспетчерського. Зручність робочого місця, зрозумілість інтерфейсу, наявність підказок і блокування явних помилок оператора є найбільш важливими властивостями SCADA, а подальший їх розвиток здійснюється в першу чергу в напрямку поліпшення ергономіки.

В SCADA використовують поняття повідомлення і події. Подія – це зміна деяких станів в системі, наприклад завершення циклу періодичного процесу обробки деталі, реєстрація нового оператора і т. п. Події не вимагають термінового втручання оператора, а просто інформують його про стан системи. На відміну від події, повідомлення являє собою попередження про важливу подію, у відповідь на яке потрібно терміново зробити деякі дії. Як правило виділяють аварійні і передаварійні повідомлення по ступеню безпеки, однак можлива і більш складна система класифікації. Прикладами таких повідомлень може бути досягнення критичної температури інструменту при обробці інструменту, досягнення критичного значення тиску в камері і т.п. У зв'язку з тим, що повідомлення вимагає прийняття рішення, їх ділять на підтверджені та непідтверджені. При підтвердженні повідомлення система має фіксувати час підтвердження.

Однією з основних функцій SCADA є розробка людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ), тобто SCADA одночасно є і ЛМІ, і інструментом для його створення. Швидкість розробки є основним показником якості SCADA з

точки зору системного інтегратора. У процес розробки входять наступні операції:

- створення графічного інтерфейсу (мнемосхем, графіків, таблиць, елементів для введення команд оператора і т.д.);
- програмування і налагодження алгоритмів роботи системи автоматизації;
- настройка системи комунікації з приладами системи автоматизації;
- створення баз даних і підключення до них SCADA.

В якості системи диспетчерського управління SCADA може виконувати наступні завдання:

- взаємодія з оператором (видача візуальної і слухової інформації, передача в систему команд оператора);
- допомога оператору в прийнятті рішень (функції експертної системи);
- автоматична сигналізація при аварійних ситуаціях;
- видача інформаційних повідомлень на екран оператора;
- ведення журналу подій в системі;
- вилучення інформації з архіву та подання її оператору в зручному для сприйняття вигляді;
- підготовка звітів (наприклад, роздруківка таблиці температур, графіків зміни операторів, переліку дій оператора);
- облік напруцювання технологічного устаткування.

Порівняльний аналіз SCADA [68], які можуть працювати в Windows Embedded, приведено в таблиці 1.3.

Дані в таблиці представлено в умовних балах для кожного з наведених параметрів. Чим більше балів – тим краще. Таким чином, найкращою за приведеними показниками є Simple SCADA (www.simple-scada.com). Окрім того, ця SCADA є єдиною, яка підтримує українську мову в інтерфейсах.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз SCADA

Критерій відбору	Genesis32	IFix	InTouch	Simple SCADA	Trace Mode
Вартість системи	12	37	10	100	20
Підтримка OPC	100	80	40	100	70
Відсутність рекламацій	65	75	60	70	80
Легкість розробки	70	80	85	100	70
Генерація звітів	49	46	46	59	59
Графічні можливості	60	64	52	64	64
Разом	356	382	293	493	363

Важливою задачею для аналізу роботи системи автоматизації та генерації звітів є зберігання та обробка технологічних параметрів. Існує два підходи зберігання інформаційних параметрів: за допомогою реляційних баз даних та за допомогою NoSQL-рішень. Останні дозволяють досягнути значно кращих результатів, однак тільки при роботі з великими обсягами даних. MS SQL Server Express [69] в тестах з малим обсягом даних дозволяє досягнути кращого результату [70]. Крім того, більшість SCADA, в тому числі Simple SCADA і OPC-сервер MasterOPC мають стандартний інтерфейс зв'язку для цієї СУБД. Тому для зберігання технологічних даних MS SQL Server Express є найкращим вибором.

Імітаційне моделювання в програмному забезпеченні установки доцільно проводити з використанням пакету MATLAB [71]. Для написання окремих програм, що реалізують потрібні функції, доцільно використовувати сучасну мову програмування Python [72], яка на теперішній час має одну з найбільших колекцій бібліотек для вирішення великої кількості задач, в тому числі задач зв'язку між інтерфейсами систем автоматизації та математичного моделювання.

1.5 Висновки до першого розділу

Аналіз фахових науково-технічних літературних джерел виявив такі невирішені проблеми розробки систем автоматичного керування установкою іонно-плазмового нанесення покриттів на металорізальний інструмент методом КІБ:

- приведені результати розробки і дослідження окремих підсистем установки, але не описано результатів розробки і дослідження систем керування всіма процесами установки, які узгоджені з вимогами технологічного регламенту;

- розробка практично всіх описаних систем керування базується на лінеаризованих моделях, що істотно погіршує якість роботи розроблених систем при функціонуванні на реальному об'єкті, який відноситься до класу істотно нелінійних;

- прогрес в області розвитку математичного та технічного забезпечень систем керування дозволяє реалізувати зменшення відхилення регламентних показників установки, що призведе до поліпшення якості покритого інструменту;

- необхідність комплексного удосконалення систем керування установкою з підвищенням рівня автоматизації обумовлена також зниженням за останні роки професіоналізму операторів установки.

Таким чином, нова комп'ютерно-інтегрована система автоматизації іонно-плазмового напилення методом КІБ має відповідати наступним вимогам:

- реалізовувати автоматичне керування усіма етапами роботи установки;

- істотно спростувати роботу технолога і оператора;

- підвищувати якість продукту, який виробляється.

Вирішити ці завдання можливо за допомогою розробки:

- математичних моделей динаміки всіх етапів технологічного процесу: очищення, покриття та охолодження;
- методики синтезу систем керування та комплексу систем керування всіма етапами технологічного процесу;
- програмно-технічної структури для реалізації функцій контролю та корекції ходу технологічного процесу, яка забезпечує візуалізацію послідовності етапів, відображення технологічних параметрів, аналіз і стабілізацію заданих параметрів, контроль ходу всього технологічного процесу і якості продукції, захист від аварійних ситуацій та збоїв системи, зберігання інформації, переналаштування поведінки системи керування виходячи з необхідних вимог до якості продукції, яке дозволяє проводити імітаційне моделювання технологічного процесу з вибором оптимальних налаштувань регуляторів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ УСТАНОВКИ

2.1 Особливості задачі моделювання технологічного процесу

Особливістю моделювання технологічного процесу повинно бути те, що фізичні закони, на основі яких необхідно побудувати моделі, мають суттєво нелінійний характер. Основна нелінійність, яка входить в структуру майже всіх моделей, зв'язана з законом променевого теплообміну Стефана – Больцмана, законом зміни тиску Бойля – Маріотта. Розроблені математичні моделі динаміки установки надруковані в роботі [73].

Установки, які працюють за методом КІБ, мають три етапи роботи [74]: іонне очищення, нанесення покриття та охолодження. На кожному із зазначених етапів необхідна робота відповідної системи автоматичного керування. Схематично процес представлено на рисунку 2.1.

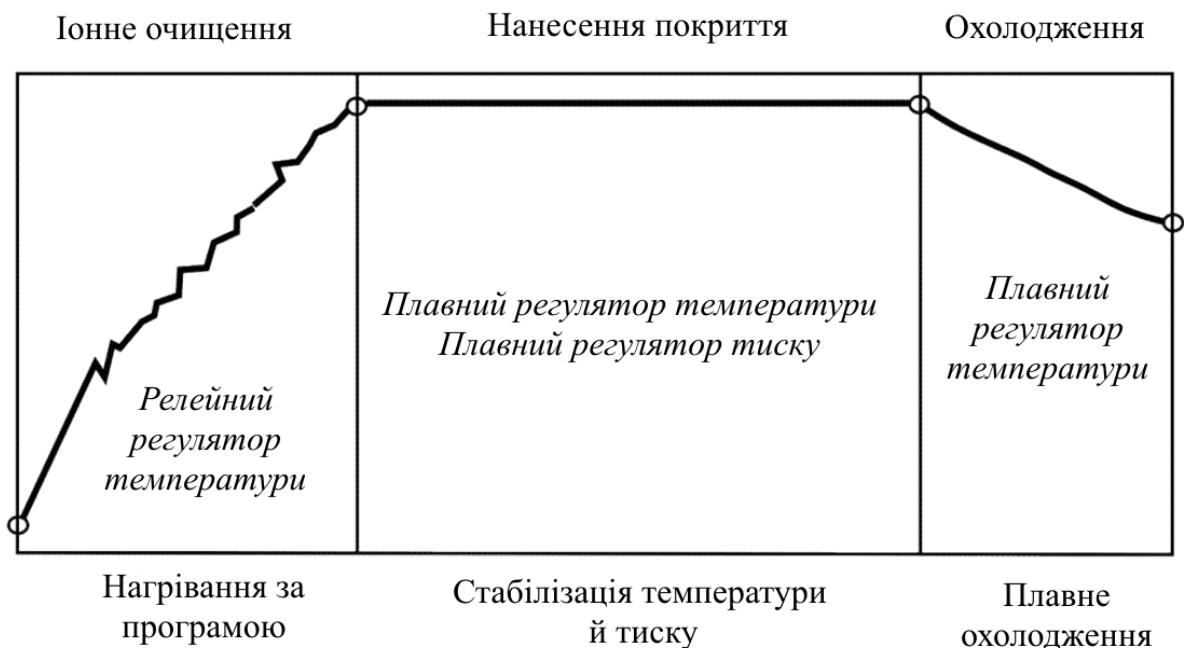


Рисунок 2.1 – Етапи роботи установок, які працюють за методом КІБ

На етапі іонно-плазмового очищення інструменту від забруднень нагрівання інструменту має вестися в відповідності до технологічного регламенту роботи установки за лінійною програмою, яка має діяти визначений проміжок часу. Для розрахунку відповідного керуючого впливу зручно мати нелінійну модель, записану у вигляді звичайних нелінійних диференціальних рівнянь. Єдиним керуючим впливом для нагрівання інструменту є дуга. Інтенсивність цього керуючого впливу неможливо змінювати безперервно. Дугу можливо тільки включати і виключати. Але при цьому має витримуватись умова, що температура як всередині, так і ззовні металорізального інструменту не повинна перевищувати заданого значення. Оскільки температуру всередині інструменту виміряти практично неможливо, для підтвердження того, що вона не перевищує температури на поверхні, яка має бути отримана за допомогою нелінійної моделі, має сенс промодельовати радіальне перенесення тепла в інструменті за допомогою диференціальних рівнянь теплопровідності у часткових похідних в циліндричних координатах. Якщо ця умова буде виконана, можливо використовувати модель у вигляді звичайних диференціальних рівнянь, які дають температуру тільки на поверхні інструменту.

Керування диференціальним рівнянням теплопровідності має ту особливість, що керуючий вплив діє на рівняння за допомогою крайової умови. А це різко ускладнює процес моделювання. Для того, щоб обійти цю складність, А. Г. Бутковським запропоновано здійснити перенос керуючого впливу з крайової умови до правої частини диференціального рівняння з використанням дельта-функції Дирака.

В якості установки для моделювання рівнянь оберемо установку Булат-3. В якості інструменту, що має бути оброблено, оберемо сталевий інструмент – різець Р6М5 [75]. Необхідні параметри для моделювання зведемо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Змінні для моделювання динаміки

Позначення	Опис	Значення
ρ	густина сталі	8000 кг/м ³
C_p	питома теплоємність сталі	505 Дж/(кг·К)
K	теплопровідність матеріалу сталі	47 Вт/(м·К)
T_0	початковий розподіл температури $T(R,0)$ на поверхні циліндра	300 К
j	густина іонного струму	20 А/м ²
S	площа поверхні об'єкта	$6.283 \cdot 10^{-3}$ м ²
E_0	середня кінетична енергія іонів	65 eV
$\bar{z}$	середня кратність заряду іона	1.79
e	заряд електрона	1 eV
U_{sub}	напруга підкладки	400 В
ε	ступінь чорноти поверхні випромінювання	0.15
σ_0	коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла	$0.576 \cdot 10^{-7}$ Вт / м ² К ⁴
α	експериментальний коефіцієнт для сталі	7.9 Вт / К
T_{sub}	постійна температура підкладки	800 К
R	радіус циліндра	0.01 м
L	довжина циліндра	0.1 м

2.2 Розробка моделей динаміки установки при іонно-плазмовому очищенні інструменту

Іонно-плазмове очищення інструменту від забруднень проводиться в процесі іонного бомбардування поверхні інструменту і його нагрівання від початкової температури до температури, при якій здійснюється нанесення покриття. При цьому необхідно не допустити перегрівання інструменту і, внаслідок цього, браку.

Якісне проведення іонного очищення вимагає вакууму в камері і високої постійної напруги підкладки. Тому цими параметрами можна керувати. Однак і напругу дуги не можна змінювати через пристрої електродугового випарника. Отже, припустимо тільки релейне керування дугою.

Розробимо модель нагрівання інструменту в процесі очищення у вигляді звичайного нелінійного диференціального рівняння.

Нагрівання інструменту відбувається за рахунок потоків тепла іонного бомбардування q_{arc} і від нагрітої підкладки q_{sub} , а втрати тепла відбуваються випромінюванням q_{rad} . Тоді сумарний тепловий потік $q(\tau)$ визначиться за співвідношенням:

$$q(\tau) = q_{arc}(\tau) - q_{rad}(\tau) + q_{sub}(\tau). \quad (1.1)$$

Тепловий потік q_{arc} визначається:

$$q_{arc}(\tau) = j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right), \quad (1.2)$$

де j – густина іонного струму, А/м²; s – площа поверхні об'єкта, м²; E_0 – середня кінетична енергія іонів, Дж; $\bar{z}$ – середня кратність заряду іона; e – заряд електрона, еВ; U_{sub} – напруга підкладки, В.

Тепловий потік випромінювання визначається законом Стефана – Больцмана:

$$q_{rad}(\tau) = s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau), \quad (1.3)$$

де ε – ступінь чорноти поверхні випромінювання; σ_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла ($\sigma_0 = 0,576 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$).

Теплопередача від нагрітої підкладки до інструменту визначається законом Фур'є:

$$q_{sub}(\tau) = \alpha \cdot (T_{sub} - T(\tau)), \quad (1.4)$$

де $\alpha = 7.9 \text{ Вт/К}$ – експериментальний коефіцієнт для сталі, T_{sub} – постійна температура підкладки, К.

Тоді загальний тепловий потік дорівнює:

$$q(\tau) = j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T). \quad (1.5)$$

Рівняння, яке описує динаміку зміни температури, має вигляд:

$$\begin{aligned} c_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool} \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = & -s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \\ & + \alpha \cdot (T_{sub} - T(\tau)) + j \cdot s \cdot U_{sub}(\tau) + j \cdot s \cdot \frac{E_0}{\bar{z} \cdot e}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Хоча теплоємність сталі c_{tool} часто приймають постійною, вона, тим не менш, залежить від температури. Для апроксимації цієї залежності за довідковою інформацією використаний поліном:

$$c_{tool} = 3.63 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 5.23 \cdot 10^{-2} \cdot T + 387. \quad (1.7)$$

Графік зміни теплоємності сталі показаний на рис. 2.2.

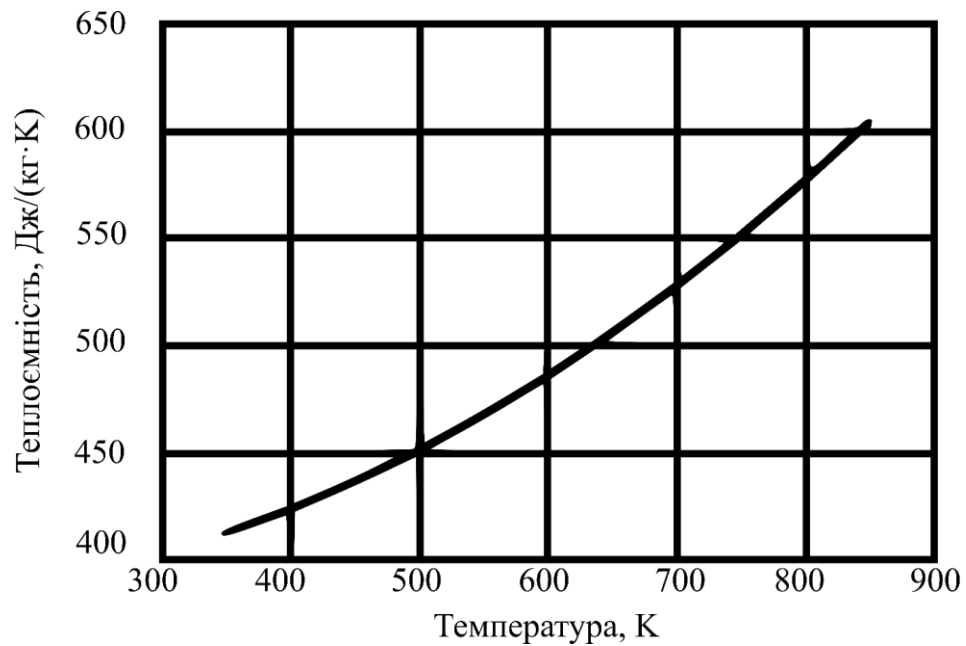


Рисунок 2.2 – Графік зміни теплоємності сталі

Розробимо далі модель керованого процесу нагріву циліндричної заготовки як системи з розподіленими параметрами, при допуску постійного тиску в камері установки [77].

Припустимо, що нагрів бічної поверхні відбувається рівномірно і керуючий вплив – питомий потік тепла на поверхні – є функцією тільки часу. Втрати через торцеві поверхні знехтуємо. Тоді процес описується класичним одновимірним рівнянням теплопровідності в циліндричних координатах [78]. Схема процесу показана на рис. 2.3.

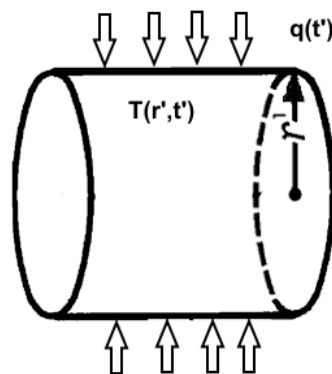


Рисунок 2.3 – Схема для формування рівняння теплопровідності

$$\rho \cdot c_{tool} \cdot \frac{\partial T}{\partial t'} = \frac{k}{r'} \cdot \frac{\partial}{\partial r'} \cdot \left(r' \cdot \frac{\partial T}{\partial r'} \right); \quad (1.8)$$

$$0 \leq r' \leq R, \quad t' > 0,$$

з крайовими умовами

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r'} \right|_{r'=0} = 0, \quad k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r'} \right|_{r'=R} = -q(t').$$

Необхідно отримати заданий розподіл $T(r', t')$, змінюючи $q(t')$.

Введемо безрозмірні змінні:

$$x = T / T_0;$$

$$t = t' \cdot k / (\rho \cdot C_p \cdot R^2);$$

$$r = r' / R;$$

$$u(t) = q(t') \cdot R / (T_0 \cdot k),$$

де ρ – густина сталі, кг/м³;

C_p – питома теплоємність сталі, Дж / (кг·К);

k – теплопровідність матеріалу сталі, Вт / (м·К);

T_0 – початковий розподіл температури $T(R, 0)$ на поверхні циліндру, К.

Перераховане керування (тепловий потік), що подається на об'єкт, дорівнюватиме:

$$u(t) = \frac{\left(j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T) \right) \cdot R}{T_0 \cdot k}, \quad (1.9)$$

де R – радіус заготовки, м;

L – довжина заготовки, м.

Система (1.8) в безрозмірних змінних має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial x(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial x(r,t)}{\partial r} \right), & 0 \leq r \leq 1, \quad t > 0, \\ \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, & \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=1} = u(t), \quad x(0,r) = x_0(r) \end{cases} \quad (1.10)$$

Після цього, включимо керування $u(t)$ в праву частину системи, змінивши крайові умови за допомогою δ -функції, слідуючи [78]:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial x(r,t)}{\partial r} \right) + \delta(r-1) \cdot u(t), \\ \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, & \left. \frac{\partial x}{\partial r} \right|_{r=1^+} = 0, \quad x(0,r) = x_0(r) \end{cases} \quad (1.11)$$

Розв'яжемо отриману систему розділення змінних. Для цього представимо розв'язок в формі:

$$\begin{cases} x(r,t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \cdot \varphi_n(r), \\ \delta(r-1) \cdot u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n(t) \cdot \varphi_n(r) \end{cases} \quad (1.12)$$

Підставивши наведені ряди в систему, отримаємо:

$$\begin{cases} \varphi(r) \cdot \frac{da_n(t)}{dt} = \frac{a_n(t)}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} \right) + b_n \cdot \varphi_n(r), \\ \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, & \left. \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} \right|_{r=1} = 0. \end{cases} \quad (1.13)$$

Бачимо, що вихідна задача зводиться до двох задач на власні значення, а саме:

$$\begin{cases} \frac{da_n}{dt} = -\lambda_n \cdot a_n + b_n \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} \right) + \lambda_n \cdot \varphi_n = 0. \end{cases} \quad (1.14)$$

Друге рівняння належить до рівнянь типу Штурма – Ліувілля [79]. Отже, його власні функції $\varphi_n(z)$ будуть ортогональні з вагою r :

$$\int_0^1 r \cdot \varphi_n(r) \cdot \varphi_m(r) \cdot dr = 0, \quad n \neq m,$$

звідки можна зробити висновок, що $\varphi_n^* = r \cdot \varphi_n(r)$ – власні функції спряженого оператора.

$$\frac{d^2 \varphi_n^*}{dr^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d\varphi_n^*}{dr} + \left(\frac{1}{r^2} + \lambda_n \right) \cdot \varphi_n^* = 0. \quad (1.15)$$

При цьому відомо, що:

$$\int_0^1 \varphi_n^*(r) \cdot \varphi_m(r) \cdot dr = 0, \quad n \neq m. \quad (1.16)$$

Спростує завдання те, що рівняння (1.15) можна перетворити до рівняння Бесселя [80]:

$$r^2 \cdot \frac{d^2 \varphi_n}{dr^2} + r \cdot \frac{d\varphi_n}{dr} + r^2 \cdot \lambda_n \cdot \varphi_n = 0. \quad (1.17)$$

Розв'язок рівняння Бесселя визначається через функції Бесселя:

$$\varphi_n(r) = A_n \cdot J_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r) + B_n \cdot Y_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r), \quad (1.18)$$

де $J_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r)$ та $Y_0(\sqrt{\lambda_n} \cdot r)$ – функції Бесселя першого і другого роду n -го порядку.

Перша крайова умова при $r = 0$ дає:

$$\frac{d\varphi_n}{dr} = -A_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot J_1(0) - B_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot Y_1(0) = 0 \quad (1.19)$$

Оскільки $J_1(0) = 0$, $Y_1(0) \neq 0$, то очевидно, що $B_n = 0$. Друга крайова умова при $r = 1$ дає:

$$\frac{d\varphi_n}{dr} = -A_n \cdot \sqrt{\lambda_n} \cdot J_1(\sqrt{\lambda_n}) = 0 \quad (1.20)$$

Звідси:

$$J_1(\sqrt{\lambda_n}) = 0 \quad (1.21)$$

Виберемо функції A_n , які відповідають умові ортогональності власних функцій, у вигляді:

$$A_n = \left(0.5 \cdot J_0^2(\sqrt{\lambda_n}) \right)^{-1/2} = \sqrt{2} / J_0(\sqrt{\lambda_n}) \quad (1.22)$$

Остаточно, власні функції дорівнюють:

$$\varphi_n(r) = J_0(r \cdot \sqrt{\lambda_n}) / J_0(\sqrt{\lambda_n}) \quad (1.23)$$

Функції b_n дорівнюють:

$$b_n = \int_0^1 \delta(r-1) \cdot \varphi_n(r) \cdot u(t) \cdot dr = \varphi_n(1) \cdot u(t) = \sqrt{2} \cdot u(t) \quad (1.24)$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \frac{da_n}{dt} &= -\lambda_n \cdot a_n + \sqrt{2} \cdot u(t) \\ a_n(0) &= \int_0^1 r \cdot \varphi_n(r) \cdot x_0(r) \cdot dr \end{aligned} \quad (1.25)$$

Безрозмірний розподіл температури визначається наступною формулою:

$$x(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \cdot \varphi_n(r), \quad (1.26)$$

де $\varphi_n(r) = \sqrt{2} \cdot J_0(r \cdot \sqrt{\lambda_n}) / J_0(\sqrt{\lambda_n})$, $n = 0, 1, 2, \dots$

Як написано вище, модель системи з розподіленими параметрами потрібна була для перевірки можливості використання спрощеної моделі, яка описується системою звичайних диференціальних рівнянь. Перевірку використання моделей проведемо в підрозділі 3.1 при розробці системи керування процесом очищення.

2.3 Розробка моделей динаміки установки при нанесенні покриття на інструмент

2.3.1 Розробка моделі теплових процесів при нанесенні покриття

Розробимо модель керованого процесу зміни температури при нанесенні покриття. Керованим параметром моделі є температура інструменту в процесі нанесення покриття $T(\tau)$. Керуванням є напруга на підкладці $U_{sub}(\tau)$. Збуренням – тепловий потік від інструмента до касети, в якій він закріплений q_c .

Аналогічно з моделлю підрозділу 2.2, диференціальне рівняння динаміки нагріву інструменту в процесі нанесення покриття запишемо у вигляді:

$$c_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool} \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) - q_c(\tau) + j \cdot s \cdot U_{sub}(\tau) + j \cdot s \cdot \frac{E_0}{\bar{z} \cdot e}, \quad (1.27)$$

при початковій умові $T(0) = T_0$. Початкова температура $T_0 = 800$ К.

2.3.2 Розробка моделі динаміки тиску при нанесенні покриття

Розробимо модель керованого процесу зміни тиску при нанесенні покриття. Керованим параметром моделі є тиск в камері в процесі нанесення покриття. Керуванням є витрата азоту в камеру.

Для побудови динамічної моделі зміни тиску азоту у вакуумній камері запишемо матеріальний баланс:

$$\frac{dM_{N_2}}{d\tau} = m_p + m_n - m_o - m_{Ti}, \quad (1.28)$$

де M_{N_2} – маса газоподібного азоту у вакуумній камері, кг; m_p – прихід азоту за рахунок примусової подачі його в камеру, кг / с; m_n – прихід азоту за рахунок натікання повітря з атмосфери через негерметичність камери, кг/с; m_o – витрата азоту за рахунок роботи вакуумного насоса, кг/с; m_{Ti} – витрата азоту на хімічні реакції в камері, кг/с.

Вважаючи обсяг вакуумної камери і температуру газу в ній постійними, запишемо на підставі закону Менделєєва – Клапейрона:

$$M_{N_2} = \frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c} \cdot P_{N_2}, \quad (1.29)$$

де μ_{N_2} – молекулярна вага азоту ($\mu_{N_2} = 28$); V_c – об'єм вакуумної камери, м³; R – універсальна газова постійна ($R = 8.314$ Дж·г-моль/К); T_c – температура газової суміші у вакуумній камері, К; P_{N_2} – парціальний тиск азоту, Па.

Масовий прихід азоту за рахунок натікання повітря з атмосфери через негерметичність камери в межах одного циклу нанесення є величиною постійною і рівною:

$$m_n = 0.79 \cdot \frac{\mu_{N_2} \cdot H}{R \cdot T_k}, \quad (1.30)$$

де 0.79 – частка парціального тиску азоту в повітрі; H – натікання, м³·Па/с.

Масова витрата азоту за рахунок роботи вакуумного насоса визначається виразом:

$$m_o = \frac{\mu_{N_2} \cdot v_n}{R \cdot T_c} \cdot P_{N_2}, \quad (1.31)$$

де v_n – об'ємна продуктивність вакуумного насоса, м³/с.

Масова витрата азоту на хімічні реакції в камері може бути розрахована, виходячи з хімічної реакції $2Ti + N_2 = 2TiN$, за формулою:

$$m_{ch} = m_{Ti} \cdot \frac{0.5 \cdot \mu_{N_2}}{\mu_{Ti}}, \quad (1.32)$$

де m_{Ti} – маса титану, витраченого за один цикл нанесення, кг;
 μ_{Ti} – молекулярна вага титану ($\mu_{Ti} = 48$).

Далі запишемо диференціальне рівняння у вигляді:

$$a_1 \cdot \frac{dP_{N_2}(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot P_{N_2}(\tau) + m_p \cdot (\tau) - a_3 \cdot m_{Ti}(\tau) + a_4, \quad (1.33)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c}, \quad a_2 = \frac{\mu_{N_2} \cdot v_n}{R \cdot T_c}, \quad a_3 = \frac{0.5 \cdot \mu_{N_2}}{\mu_{Ti}}, \quad a_4 = 0.79 \cdot \frac{\mu_{N_2} \cdot H}{R \cdot T_c},$$

а початкова умова має вигляд $P_{N_2}(0) = P_{N_2,0}$.

Параметри, які входять в модель, мають такі значення:
 $\mu_{N_2} = 28$ г·моль; $\mu_{Ti} = 48$ г·моль; $V_c = 0.16$ м³; $T_c = 300$ К; $R = 8.314$ Дж·моль / К; $v_n = 0.2$ м³/с; $H = 26.66 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с.

Перевірку використання моделей проведемо в підрозділі 3.3 при розробці систем керування температурою та тиском в процесі покриття.

2.4 Розробка моделі динаміки установки при охолодженні інструменту

По аналогії з рівнянням підрозділу 2.2 рівняння теплообміну при охолодженні інструменту набуває вигляду:

$$a_1 \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot T^4(\tau) - q(\tau). \quad (1.34)$$

Перевірку використання моделі проведемо в підрозділі 3.4 при розробці систем керування температурою в процесі охолодження.

2.5 Висновки до другого розділу

В розділі розроблені математичні моделі динаміки основних технологічних процесів установки іонно-плазмового напилення на інструмент за методом КІБ. Зокрема, розроблені моделі: модель динаміки процесу керованої зміни температури при іонно-плазмовому бомбардуванні з метою очищення поверхні металорізального інструменту; модель динаміки керованої зміни температури при іонному напиленні титану на металорізальний інструмент; модель динаміки керованої зміни тиску при іонному напиленні титану на металорізальний інструмент; модель динаміки керованого охолодження інструменту після напилення. Усі моделі являють собою нелінійні диференціальні рівняння. На підставі цих моделей буде розроблена система керування установкою.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ УСТАНОВКИ

3.1 Розробка системи керування очищенням

Опис розроблених систем керування установкою представлено в роботі [35]. Метою системи автоматичного керування є якісне очищення інструменту перед нанесенням покриття.

Очищення забезпечується вигоранням домішок при рівномірному підвищенні температури від 300 К до 800 К по лінійній програмі за 1800 с. Допустиме відхилення від програми нагріву становить не більше ± 25 К.

Величина відхилення, з одного боку, обумовлена принципово релейним характером управління – включення і відключення дуги, а з іншого, необхідністю запобігання зміни структури металу інструменту.

На початковому етапі включається дуга і здійснюється нагрів-очищення. При досягненні температурою поверхні значення верхньої допустимої межі на поточний момент часу відбувається відключення дуги.

Після відключення інструмент охолоджується за рахунок втрати енергії на випромінювання. Включення і відключення дуги триває до тих пір, поки вимірювана температура поверхні T не зрівняється з заданою температурою нанесення покриття $T_{\text{нан}}$.

Імітаційне моделювання системи керування цим процесом і наступними будемо проводити в програмному пакеті Simulink [81]. Simulink – це графічне середовище імітаційного моделювання, яке дозволяє за допомогою блок-діаграм в вигляді направлених графів будувати динамічні моделі, які включають дискретні, неперервні та гібридні, нелінійні, розривні системи.

Модель системи керування приведена на рисунку 3.1, а підсистеми моделі наведені на рисунку 3.2. Графіки перехідних процесів зображені на рисунках 3.3, 3.4.

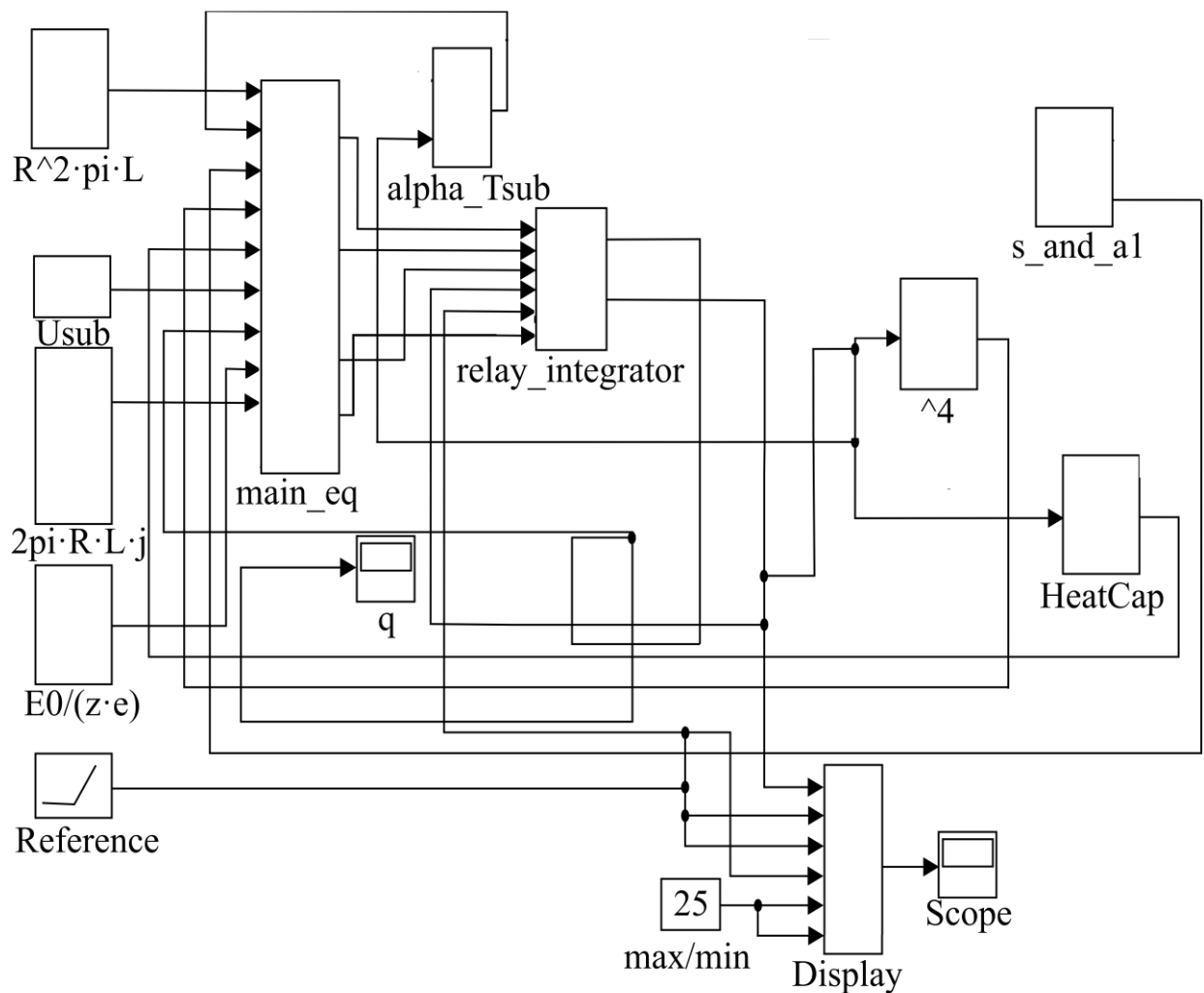


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель системи керування іонним очищенням

Підсистема HeatCap імітаційної моделі системи керування іонним очищенням реалізує формулу (1.7), яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$\alpha_1 = \left(\left(3.63 \cdot 10^{-4} \right)^2 - 5.23 \cdot 10^{-2} \right) \cdot i_1 + 3.87 \cdot 10^2.$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.2.

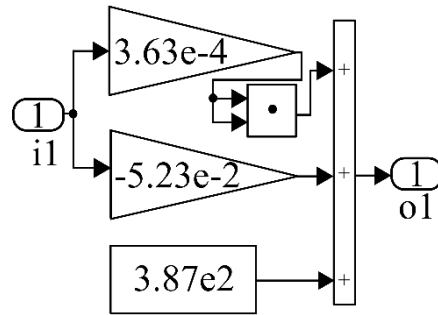


Рисунок 3.2 – Підсистема HeatCup імітаційної моделі рис. 3.1

Підсистема обчислення іонного струму відповідає формулі:

$$I = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot j ,$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = 2 \cdot \pi i \cdot 0.01 \cdot 0.1 \cdot 20.$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.3.

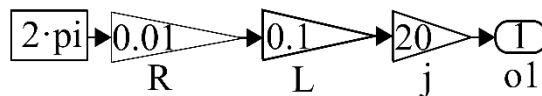


Рисунок 3.3 – Підсистема $2 \cdot \pi i \cdot R \cdot L \cdot j$ імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема обчислення напруги на дузі відповідає формулі:

$$U = \frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} ,$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = 65 / (1.79 \cdot 1).$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.4.

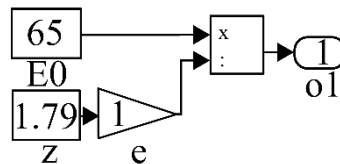


Рисунок 3.4 – Підсистема $E0/(z \cdot e)$ імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема обчислення об'єму інструмента відповідає формулі:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot L ,$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = 0.01^2 \cdot \pi \cdot 0.1.$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.5.

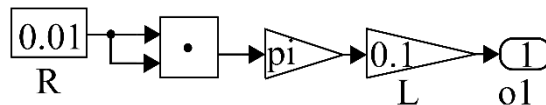


Рисунок 3.5 – Підсистема $R^2 \cdot \pi \cdot L$ імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема піднесення в 4 степень відповідає формулі:

$$W = T^4 ,$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = i_1^4.$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.6.

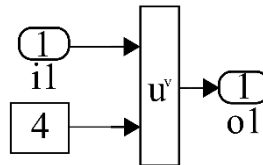


Рисунок 3.6 – Підсистема ⁴ імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема s_and_a1 відповідає формулі:

$$W = s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 ,$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0.01 \cdot 0.1 \cdot 0.15 \cdot 0.57 \cdot 10^{-7}.$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.7.

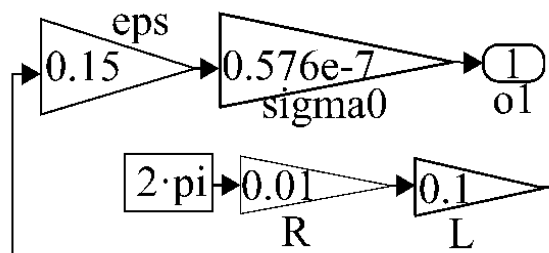


Рисунок 3.7 – Підсистема s_and_a1 імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема alfa_Tsub відповідає формулі:

$$W = \alpha \cdot (T_{sub} - T),$$

яка в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = 7.9 \cdot (800 - i_1).$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.8.

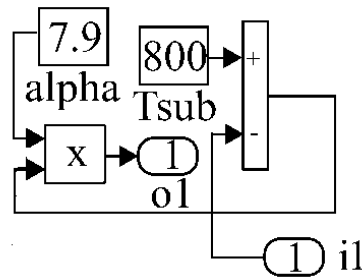


Рисунок 3.8 – Підсистема α_T_{sub} імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Зовнішній вигляд підсистеми Display в програмі Simulink приведено на рисунку 3.9.

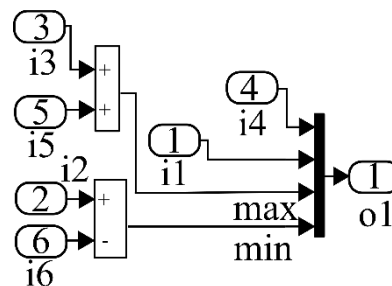


Рисунок 3.9 – Підсистема Display імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Підсистема $main_eq$ відповідає формулам:

$$W_1 = \frac{j \cdot s \cdot U_{sub}(\tau)}{C_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool}},$$

$$W_2 = \frac{s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_o \cdot T^4(\tau)}{C_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool}},$$

$$W_3 = \frac{\alpha \cdot (T_{sub} - T(\tau))}{C_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool}},$$

$$W_4 = \frac{j \cdot s \cdot \frac{E_0}{\bar{z} - e}}{C_{tool} \cdot \rho_{tool} \cdot V_{tool}},$$

які в машинних змінних приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
 o_1 &= i_9 \cdot i_6 / (8000 \cdot i_1 \cdot i_5), \\
 o_2 &= i_3 \cdot i_4 / (8000 \cdot i_1 \cdot i_5), \\
 o_3 &= (i_2 + i_7) / (8000 \cdot i_1 \cdot i_5), \\
 o_4 &= i_9 \cdot i_8 / (8000 \cdot i_1 \cdot i_5).
 \end{aligned}$$

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунок 3.10.

Підсистема Relay_Integrator відповідає формулам:

$$\begin{aligned}
 W_4 &= W_1 \cdot \text{relay}(T(\tau) - T_{ref}), \\
 \frac{dT}{d\tau} &= W_3 - W_2 + W_4,
 \end{aligned}$$

які в машинних змінних приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
 o_1 &= i_1 \cdot \text{relay}(i_4 - i_5), \\
 o_2 &= \int_0^t (i_3 - i_2 + i_6) \cdot dt.
 \end{aligned}$$

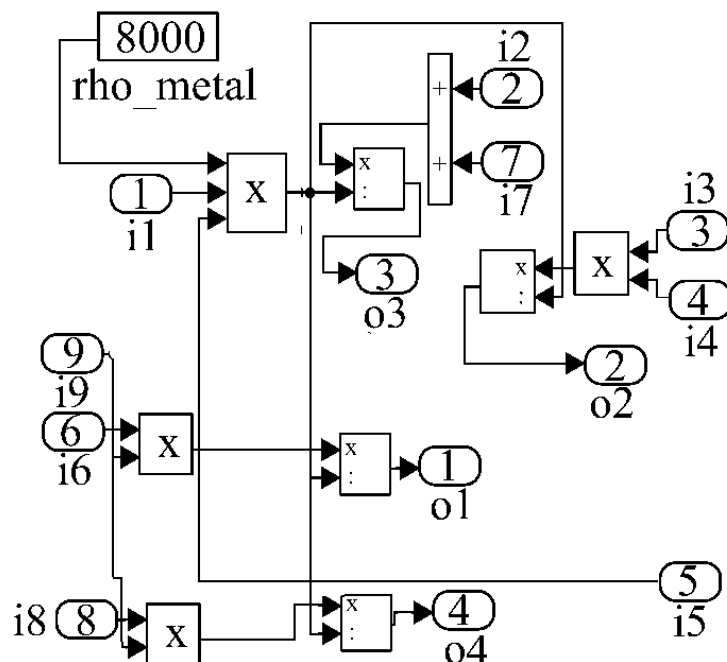


Рисунок 3.10 – Підсистема main_eq імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Зовнішній вигляд підсистеми в програмі Simulink приведено на рисунку 3.11.

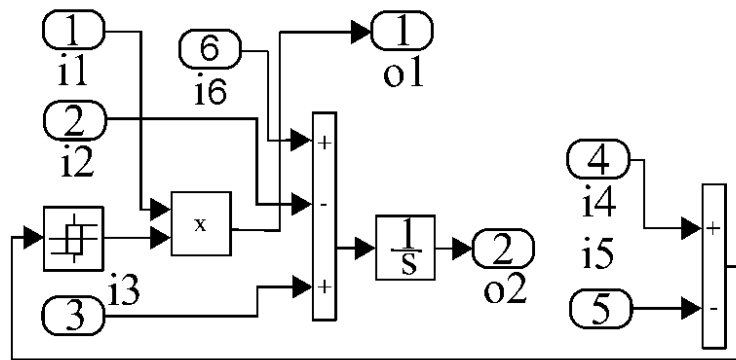


Рисунок 3.11 – Підсистема Relay_Integrator імітаційної моделі системи керування іонним очищенням

Стандартні блоки max/min і Usub є константами, Reference задає лінійну за часом програму, Score і q виводять графіки процесів в системі.

Графік зміни температури інструмента у часі при релейному керуванні у відповідності з лінійною програмою зміни температури показаний на рисунку 3.12.

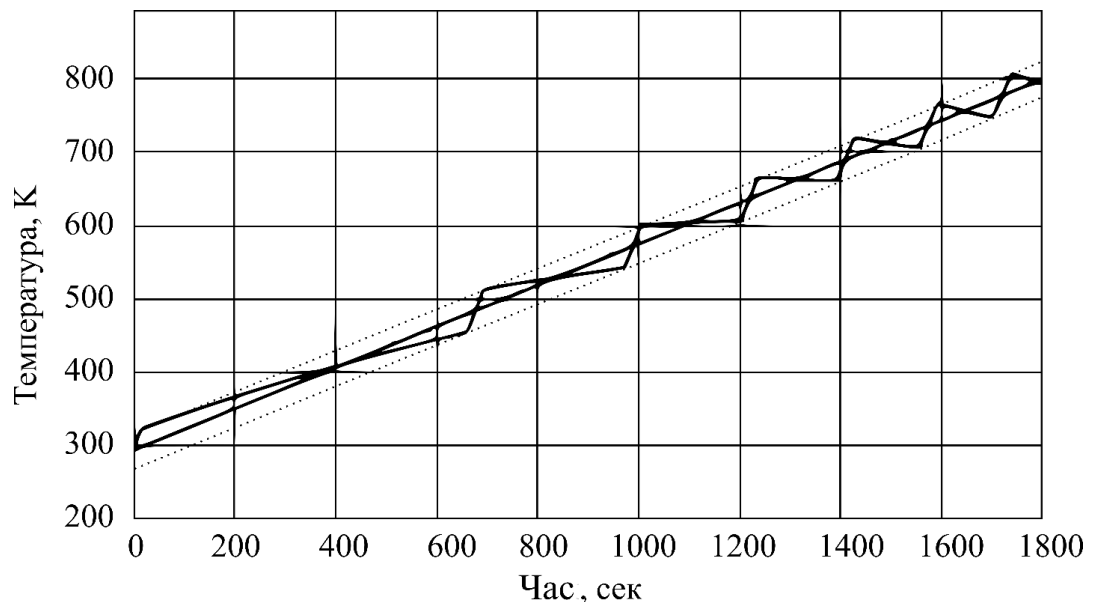


Рисунок 3.12 – Графік програмної зміни температури інструменту при іонній очистці

Графік зміни релейного керування включенням дуги показаний на рисунку 3.13.

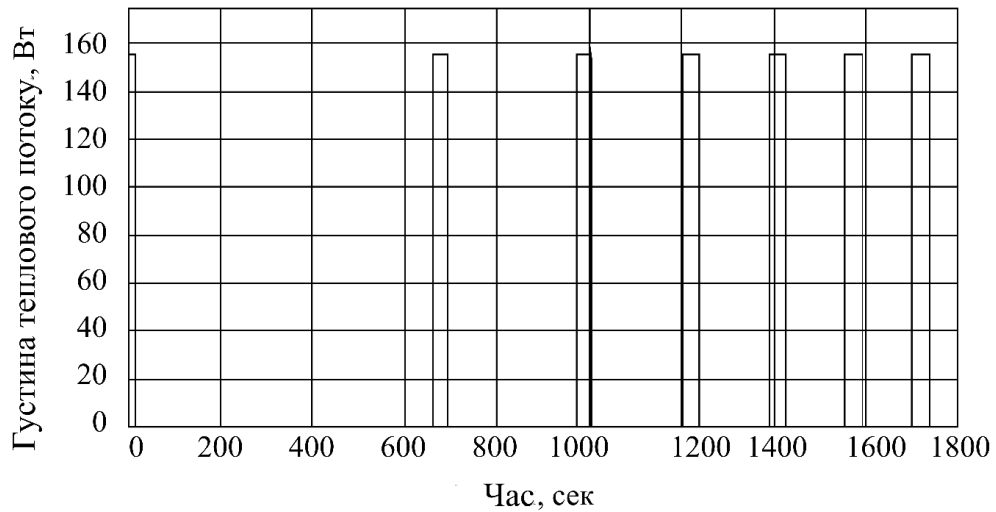


Рисунок 3.13 – Графік зміни керування при іонному очищенні

Аналіз графіків рисунків 3.12, 3.13 показує, що завдання керування виконано.

Далі перейдемо до імітаційного моделювання, яке буде проводитись з метою визначення точного радіального розподілу температур при керуванні. Передбачається, що перехідний процес температури в часі і радіальний розподіл температур мають задовольняти технічним регламентам.

Алгоритм моделювання нагріву циліндричного інструменту включає наступні кроки.

1. Перерахуємо керування в безрозмірну форму:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \frac{\left(j \cdot s \cdot \left(\frac{E_0}{\bar{z} \cdot e} + U_{sub}(\tau) \right) - s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) + \alpha \cdot (T_{sub} - T) \right) \cdot R}{T_0 \cdot k} = \\
 &= \frac{\left(10 \cdot 6.283 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{65}{1.79 \cdot 1} + 400 \right) \right)}{300 \cdot 47} - \\
 &= \frac{6.283 \cdot 10^{-3} \cdot 0.15 \cdot 0.576 \cdot 10^{-7} \cdot (300 + 0.278 \cdot \tau)^4 + 7.9 \cdot (500 - 0.278 \cdot \tau)}{300 \cdot 47} \cdot 0.01 =
 \end{aligned}$$

$$= \frac{27.41 - 5.790 \cdot 10^{-11} \cdot (300 + 0.278 \cdot \tau)^4 + 7.9 \cdot (500 - 0.278 \cdot \tau)}{1.41 \cdot 10^6}$$

2. Задамося вектором радіусів

$$r \in [0, 0.065, 0.13, 0.195, 0.26, 0.325, 0.39, 0.455, \dots$$

$$0.52, 0.585, 0.65, 0.715, 0.78, 0.845, 0.91, 0.975].$$

3. Для моделювання достатньо 16 точок по часу. Тоді розрахуємо корені рівняння (1.21), звідки власні значення, дорівнюють:

$$\begin{aligned} \lambda_0 = 0, \quad \sqrt{\lambda_1} \approx 3.83, \quad \sqrt{\lambda_2} \approx 7.01, \quad \sqrt{\lambda_3} \approx 10.17, \quad \sqrt{\lambda_4} \approx 13.32, \quad \sqrt{\lambda_5} \approx 16.47, \\ \sqrt{\lambda_6} \approx 19.62, \quad \sqrt{\lambda_7} \approx 22.76, \quad \sqrt{\lambda_8} \approx 25.9, \quad \sqrt{\lambda_9} \approx 29.05, \quad \sqrt{\lambda_{10}} \approx 32.19, \\ \sqrt{\lambda_{11}} \approx 35.33, \quad \sqrt{\lambda_{12}} \approx 38.47, \quad \sqrt{\lambda_{13}} \approx 41.62, \quad \sqrt{\lambda_{14}} \approx 44.76, \quad \sqrt{\lambda_{15}} \approx 47.9, \quad \sqrt{\lambda_{16}} \approx 51.04. \end{aligned}$$

4. Розрахуємо для зазначених радіусів власні функції

$$\begin{aligned} \phi_1 \approx 1.41, \quad \phi_2 \approx -3.46, \quad \phi_3 \approx 3.78, \quad \phi_4 \approx -1.32, \quad \phi_5 \approx -2.43, \quad \phi_6 \approx 0.41, \quad \phi_7 \approx 1.91, \quad \phi_8 \approx 2.078, \\ \phi_9 \approx 1.95, \quad \phi_{10} \approx 1.63, \quad \phi_{11} \approx 0.5, \quad \phi_{12} \approx -1.32, \quad \phi_{13} \approx -0.94, \quad \phi_{14} \approx 1.51, \quad \phi_{15} \approx -0.92, \quad \phi_{16} \approx 0.51. \end{aligned}$$

5. Задамося множиною точок часу $t \in [0:10:1800]$ і розділимо значення температур на T_0 . Проведемо чисельне диференціювання рівняння (1.25) за методом Рунге – Кутта 4 і 5 порядків, інтерполюючи отримані значення в точці t .

6. Визначимо значення $x(r, t)$ за формулою (1.26).

7. Перетворимо отримані x до натуральних, помноживши їх на T_0 .

Графік результатів моделювання показано на рисунку 3.14.

Результати моделювання показують, що температура у всіх виділених ділянках радіального розподілу змінюється в часі практично однаково, що означає що розроблена система керування гарантує високу якість отриманого інструменту. Відхилення температур по радіусу не перевищує 1 К. Таким чином, перехідний процес нагріву інструменту в часі близький до

отриманого при спрощеному моделюванні, що підтверджує високу якість системи керування, побудованої із застосуванням спрощеної моделі.

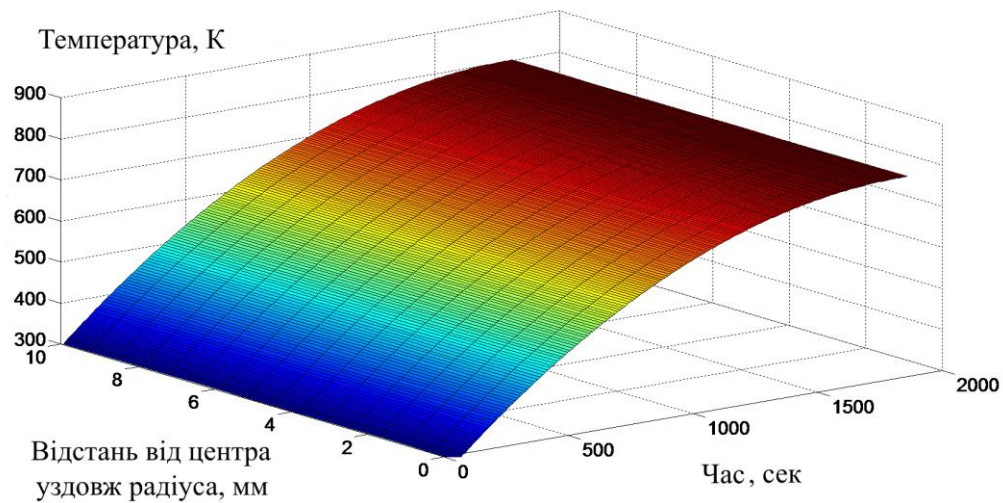


Рисунок 3.14 – Графічне представлення результатів моделювання динаміки нагрівання інструменту по радіальному розподілу

3.2 Розробка системи керування установкою при нанесенні іонно-плазмового покриття на інструмент

3.2.1 Керування тепловими процесами в інструменті

Метою керування є стабілізація температури інструменту в процесі нанесення покриття. Керуванням є напруга на підкладці U_{sub} (τ), виміром – температура інструменту T (τ), збуренням – тепловий потік q_c від інструмента до касети, в якій він закріплений.

Початкова температура $T_0 = 800$ К. Обмеження на управління становлять $0 \leq U_{sub} \leq 400$ В, а збурення знаходиться в межах $0,2 \leq q_c \leq 2$ Пн.

Імітаційна модель системи стабілізації температури на етапі нанесення покриття на інструмент зображена на рис. 3.15.

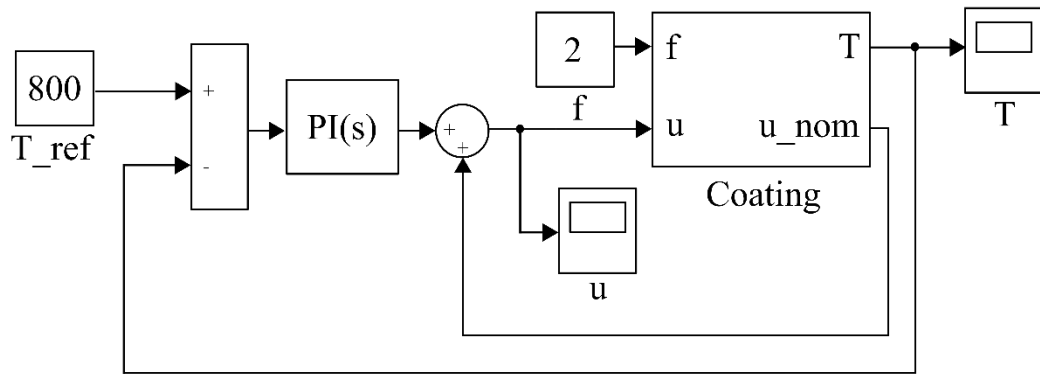


Рисунок 3.15 – Імітаційна модель системи стабілізації температури на етапі нанесення покриття на інструмент

Підсистема Coating моделі системи стабілізації зображена на рис. 3.16. Ця підсистема призначена для імітаційного моделювання диференціального рівняння (1.27).

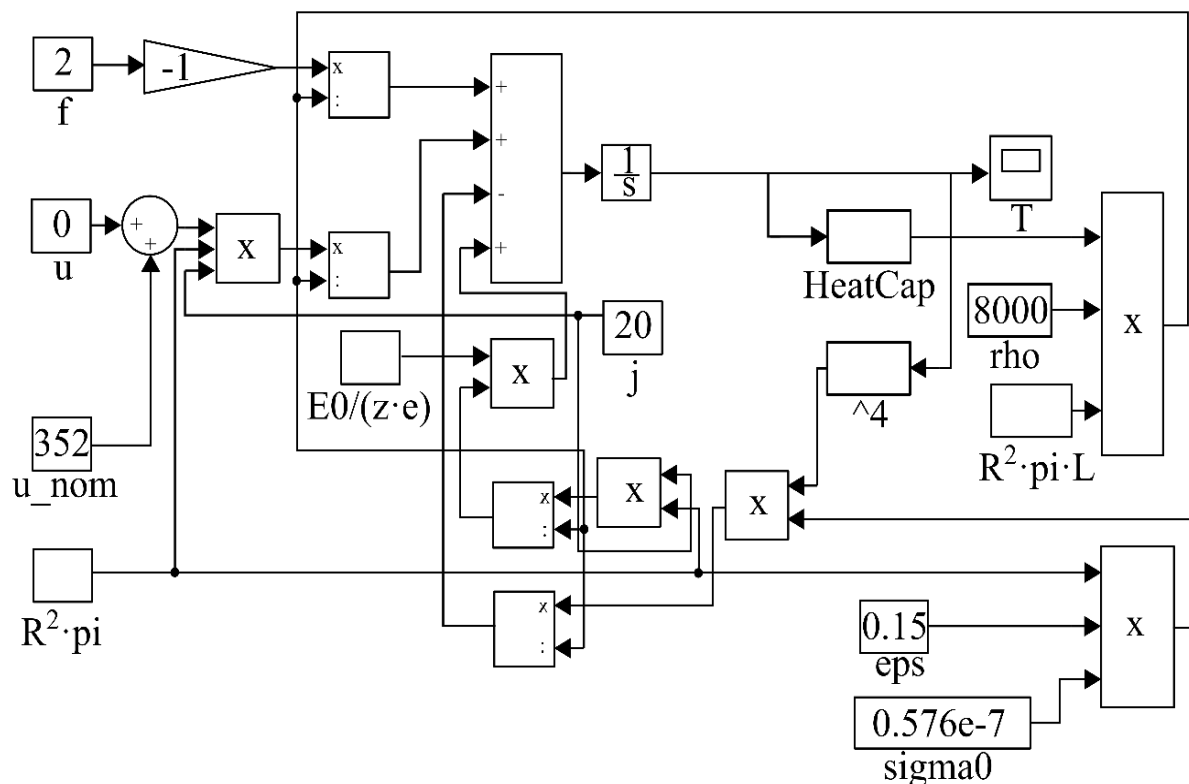


Рисунок 3.16 – Підсистема Coating імітаційної моделі системи стабілізації температури

У моделі підсистеми Coating використані підсистеми, наведені в підрозділі 3.2.

Перехідний процес зміни температури інструменту при дії максимального збурення наведено на рисунку 3.17, а процес зміни керуючого впливу – на рисунку 3.18.

Перебіг перехідного процесу закінчується в момент $\tau = 1000$ с, який відзначений пунктирною лінією. Наступний хід процесу наведено з метою показання стійкості системи. Після завершення процесу відбувається перехід на стадію охолодження.

На якість функціонування системи керування неповнота протікання перехідного процесу не впливає, оскільки відхилення температури від режимного значення надзвичайно мале (0,3 К).

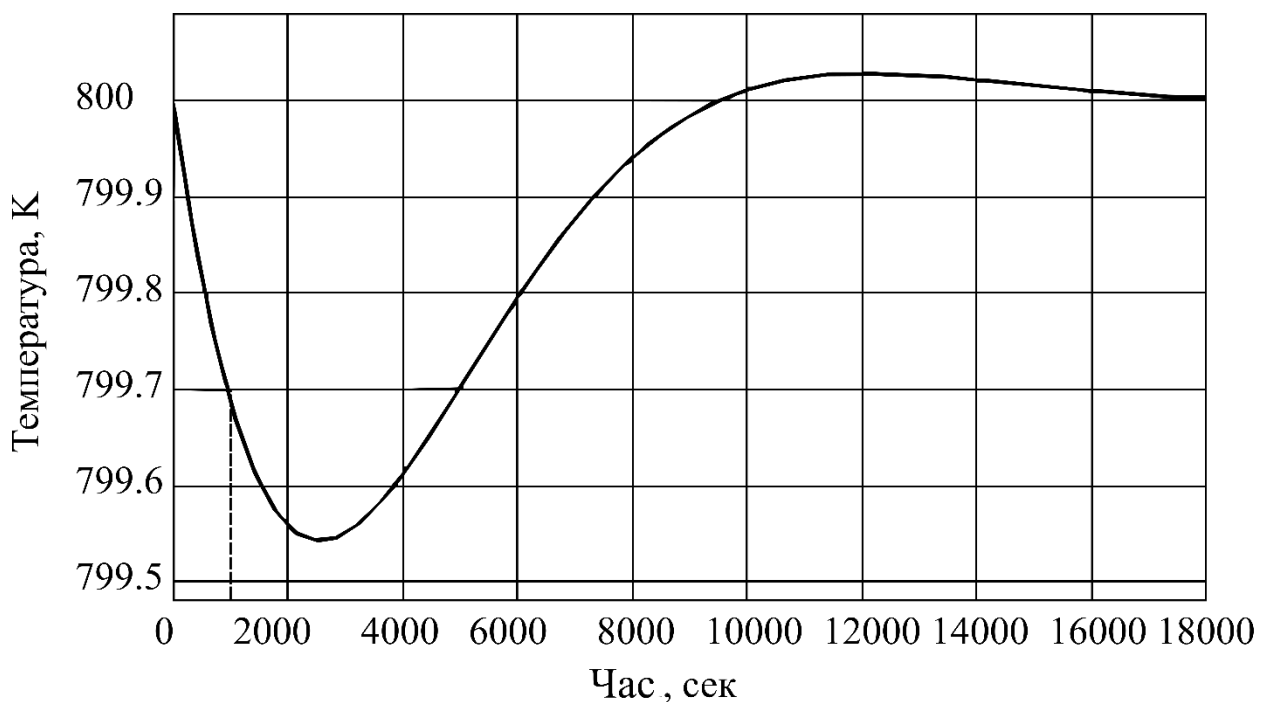


Рисунок 3.17 – Перехідний процес зміни температури інструменту при дії максимального збурення

В якості підсистеми PI (s) використовується стандартний ПІ-регулятор [45, 46, 82]. Синтез регулятора проведено за допомогою підсистеми автоналагодження Simulink при компромісі робастності і швидкодії.

Передаточна функція регулятора має вигляд:

$$PI(s) = 10.1 \cdot \left(1 + \frac{35.57 \cdot 10^{-5}}{s} \right). \quad (0.1)$$

Аналіз перехідного процесу (рисунок 3.17) показав, що при максимальному збуренні якість стабілізації температури є високою, час перехідного процесу та відхилення температури металорізального інструменту відповідають вимогам технологічного регламенту для цієї стадії процесу, а керуючий вплив (рисунок 3.18) при стабілізації не виходить за технологічні обмеження.

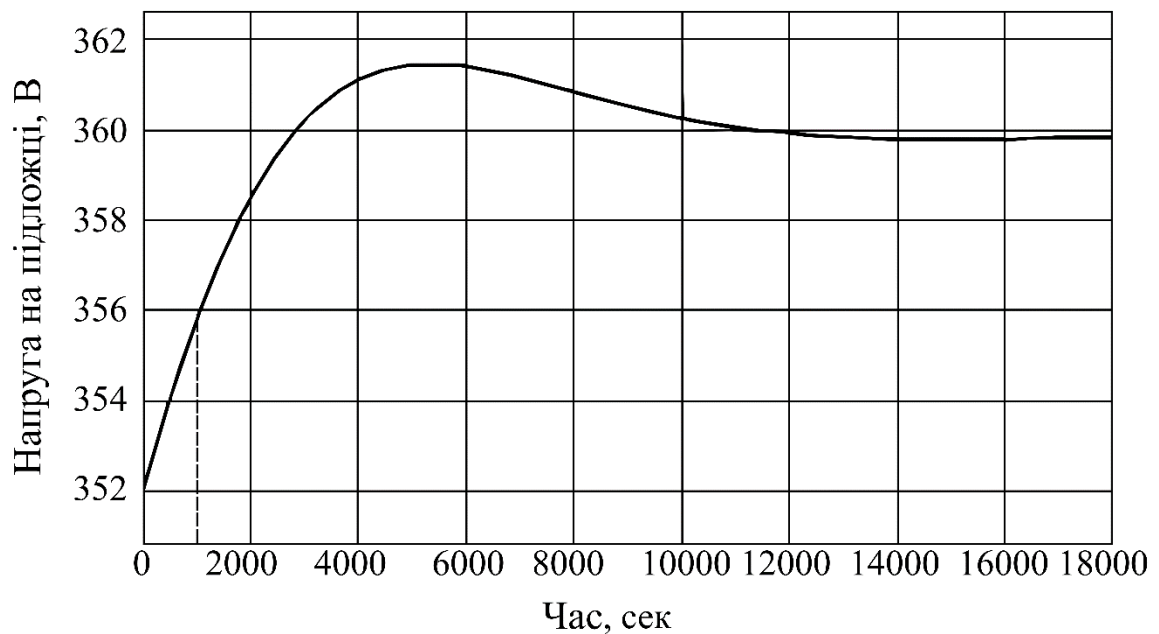


Рисунок 3.18 – Перехідний процес зміни керуючого впливу

Таким чином, можна вважати, що система стабілізації температури інструмента при нанесенні розроблена якісно.

3.2.2 Керування тиском у вакуумній камері

Метою керування є стабілізація тиску азоту у вакуумній камері в процесі нанесення покриття. Керуючим впливом є подача азоту.

Вимірюваним параметром є тиск в камері. Збуреннями є відхилення витрат інших потоків.

Імітаційна модель системи керування представлена на рисунку 3.19.

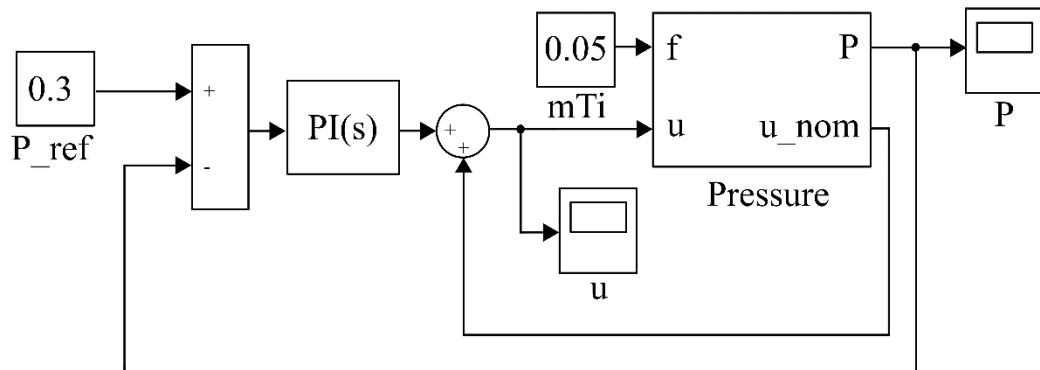


Рисунок 3.19 – Імітаційна модель системи управління тиском

Межі зміни управління складають $1 \cdot 10^{-3} \leq m_{\text{под}} \leq 6 \cdot 10^{-3}$ г / с, а збурень $4.0 \cdot 10^{-3} \leq m_{Ti} \leq 5.5 \cdot 10^{-3}$ г / с.

Підсистема Pressure імітаційної моделі рисунок 3.19. показана на рисунку 3.20. Ця підсистема реалізує динамічну модель, яка задана рівнянням (1.33).

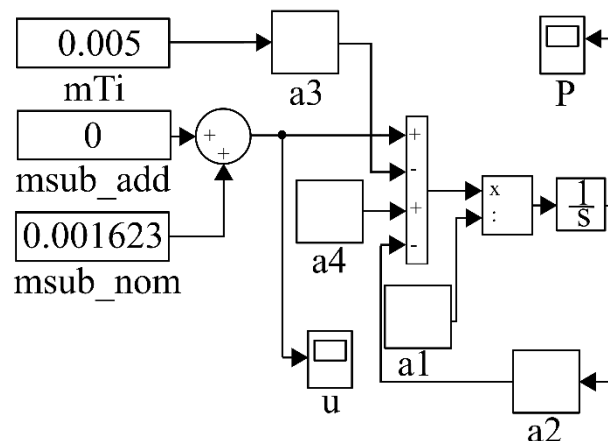


Рисунок 3.20 – Імітаційна модель підсистеми Pressure системи управління тиском

Імітаційна модель, яка реалізує підсистему a1, показана на рисунку 3.21. Підсистема a1 в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = (28 \cdot 0.16) / (8.314 \cdot 300).$$

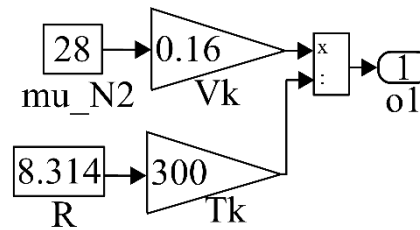


Рисунок 3.21 – Підсистема a1 для імітаційної моделі системи управління тиском

Імітаційна модель, що реалізує частину рівняння (1.31) показана на рисунку 3.22. Підсистема a2 в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = ((28 \cdot 0.16) / (8.314 \cdot 300)) \cdot i_1.$$

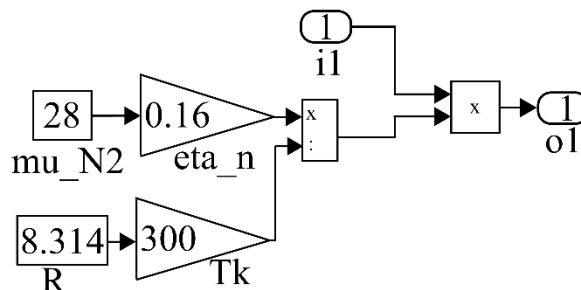


Рисунок 3.22 – Підсистема a2 для імітаційної моделі системи управління тиском

Імітаційна модель, яка реалізує підсистему a3 показана на рисунку 3.23. Підсистема a3 в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = ((28 \cdot 0.5) / 48) \cdot i_1.$$

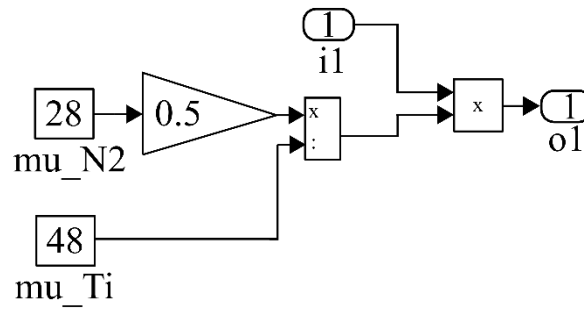


Рисунок 3.23 – Підсистема а3 для імітаційної моделі системи управління тиском

Імітаційна модель, яка реалізує підсистему а4, показана на рисунку 3.24. Підсистема а4 в машинних змінних приймає вигляд:

$$o_1 = \left(\left(0.79 \cdot 26.66 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \right) / (8.34 \cdot 300) \right) \cdot i_1.$$

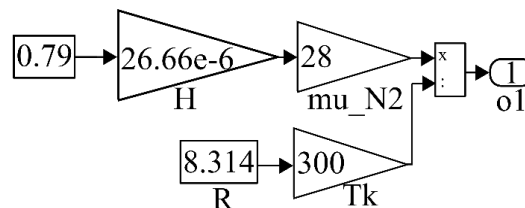


Рисунок 3.24 – Підсистема а4 для імітаційної моделі системи управління тиском

В якості підсистеми $PI(s)$ використано стандартний ПІ-регулятор. Синтез регулятора проведено за допомогою підсистеми автоналагодження Simulink при компромісі робастності і швидкодії. Регулятор має вигляд:

$$PI(s) = 0.01 \cdot \left(1 + \frac{3}{s} \right). \quad (0.2)$$

Перехідний процес зміни тиску у камері при збуренні збільшенням маси наведено на рисунку 3.25, а перехідний процес керування витратою азоту – на рисунку 3.26.

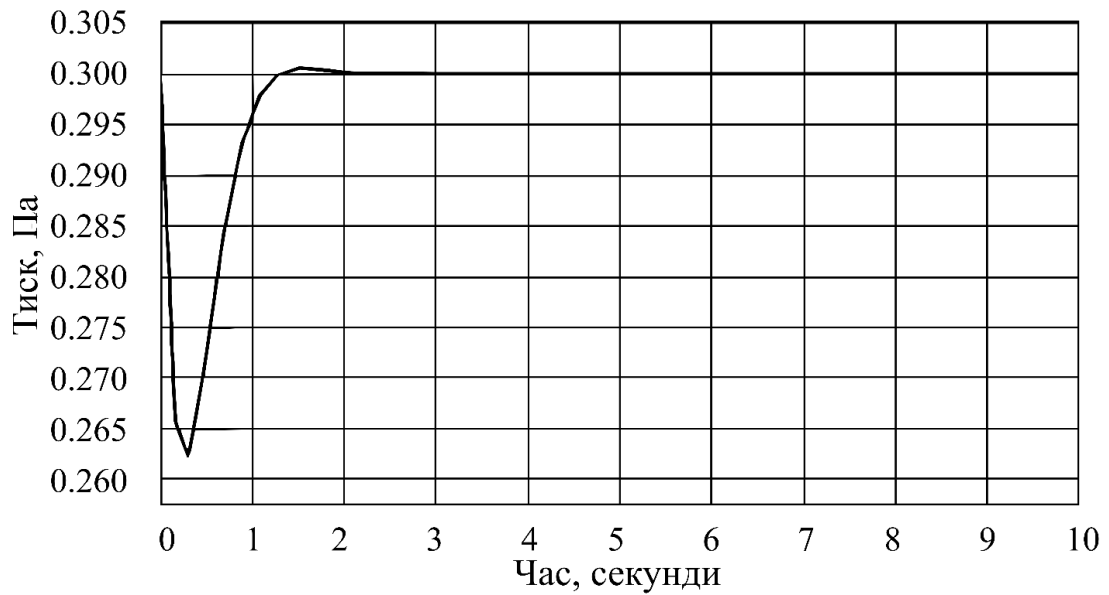


Рисунок 3.25 – Перехідний процес зміни тиску азоту при збуренні збільшенням m_{Ti}

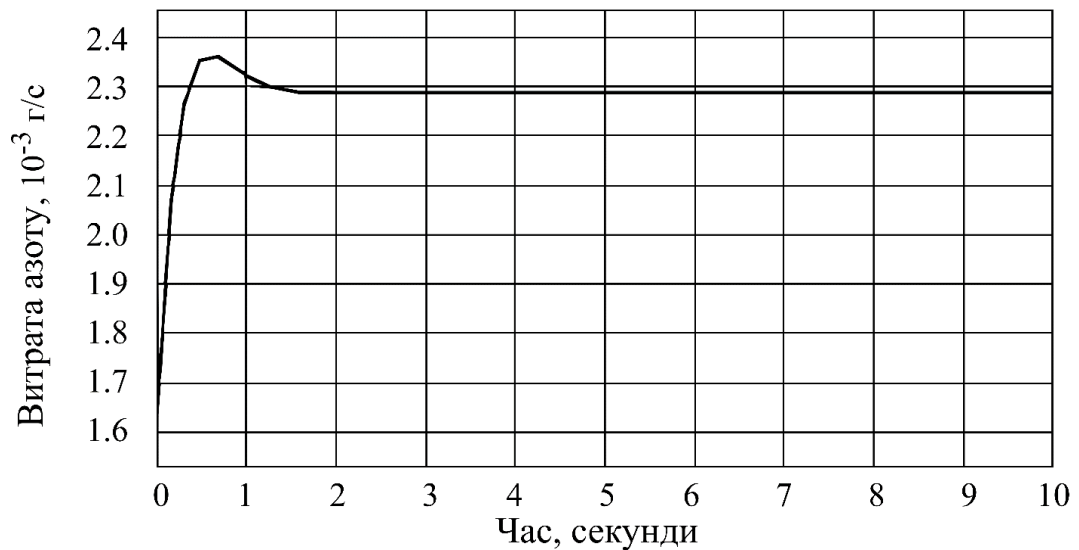


Рисунок 3.26 – Перехідний процес керування витратою азоту

Аналіз перехідних процесів показав, що при максимальному збуренні якість стабілізації температури висока, час перехідного процесу – прийнятний, а керуючий вплив не виходить за обмеження. Таким чином, функціонування розробленої системи керування слід визнати задовільним.

3.3 Розробка системи керування установкою на етапі охолодження

Сигнал про початок охолодження інструменту в вакуумі надходить від таймера, який відлічує час нанесення покриття $\tau_{\text{нан}}$. Після надходження сигналу робота електродугового джерела припиняється. Охолодження інструменту відбувається завдяки інфрачервоному випромінюванню і теплопередачі в опорну касету. Робота установки завершується при досягненні інструментом температури $T = 500$ К. Після цього камера розгерметизується і починається вивантаження інструменту.

Схема імітаційної моделі системи керування охолодженням показана на рисунку 3.27.

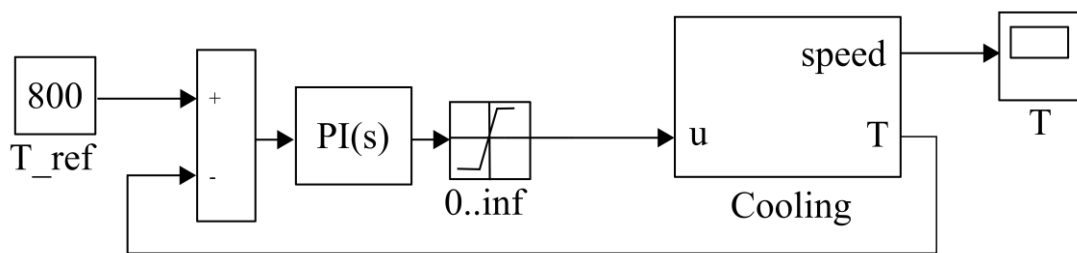


Рисунок 3.27 – Імітаційна модель системи керування охолодженням

Схема підсистеми Cooling імітаційної моделі системи керування охолодженням (рисунок 3.27) показана на рисунку 3.28. В підсистемі Cooling використовуються підсистеми, які описані в підрозділі 3.2. Підсистема реалізує імітаційне моделювання диференціального рівняння (1.34).

В якості підсистеми PI(s) використано стандартний ПІ-регулятор. Синтез регулятора проведено за допомогою підсистеми автоналаштування Simulink при компромісі робастності і швидкодії. Передаточна функція регулятора має вигляд:

$$PI(s) = -11.34 \cdot \left(1 + \frac{0.0001}{s} \right). \quad (0.3)$$

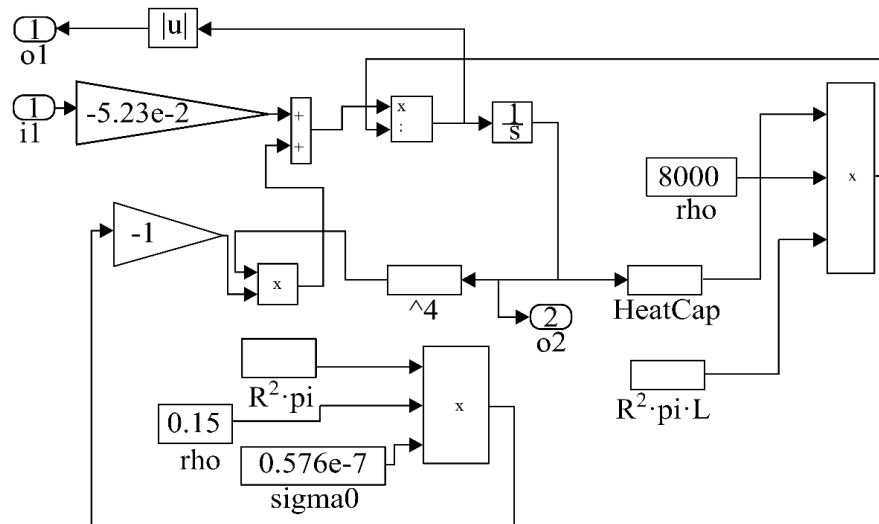


Рисунок 3.28 – Підсистема Cooling

Перехідний процес зміни температури інструменту за програмою наведено на рисунку 3.29, а процес зміни керуючого впливу – на рисунку 3.30. Швидкість охолодження показана на рисунку 3.31.

З графіків рисунків 3.29 – 3.31 видно, що процес охолодження задовільний

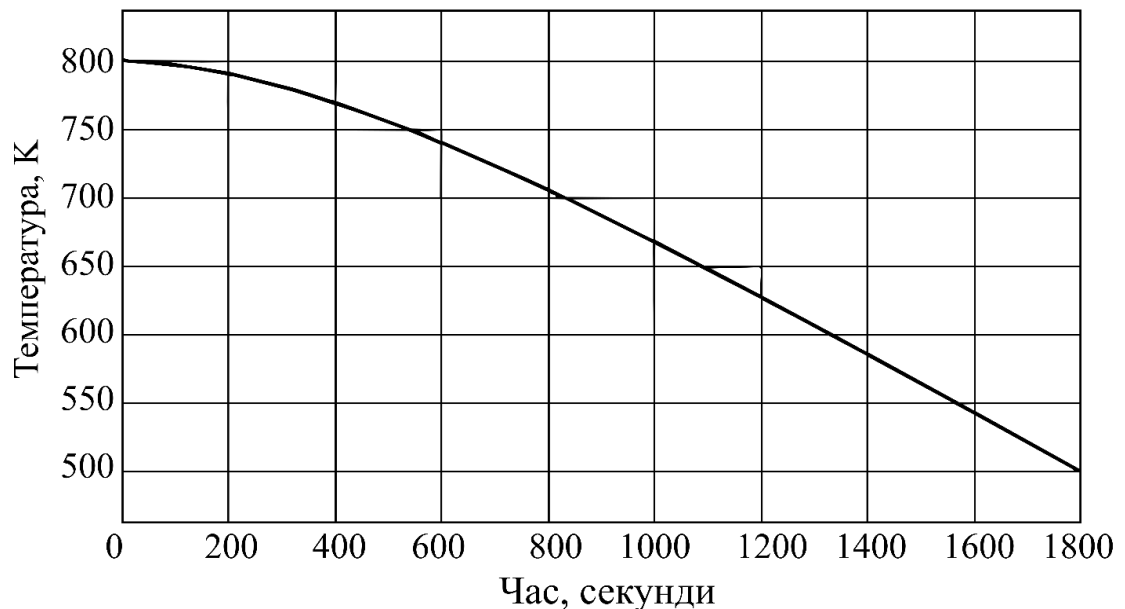


Рисунок 3.29 – Процес програмної зміни температури інструменту

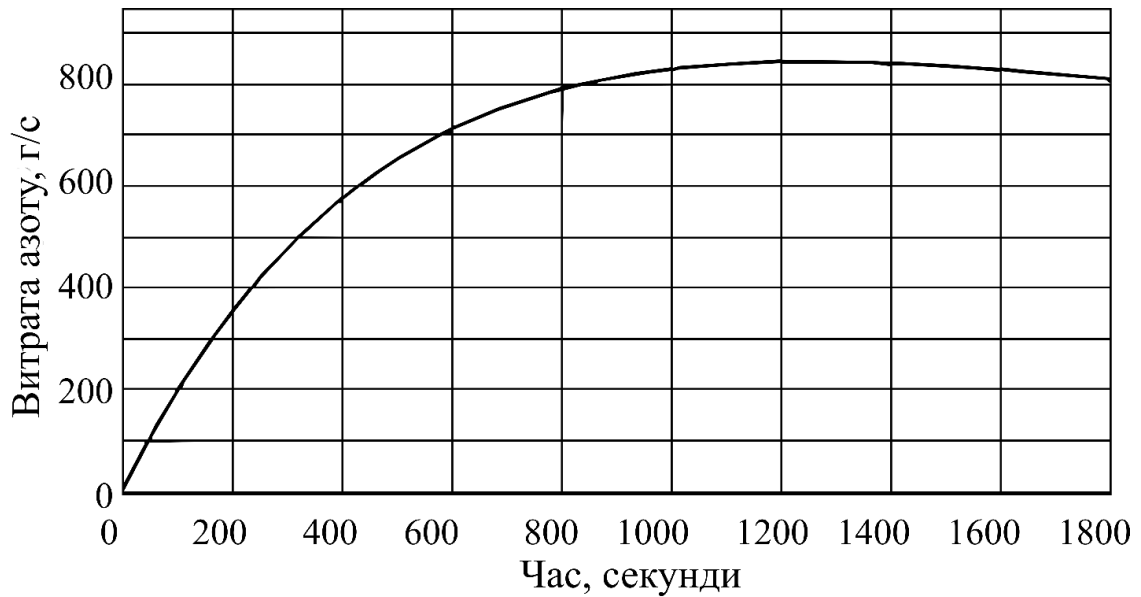


Рисунок 3.30 – Перехідний процес зміни керування на етапі охолодження

Аналіз перехідних процесів показує, що програма охолодження інструменту виконується якісно, а керуючий вплив і швидкість охолодження не виходять за обмеження.

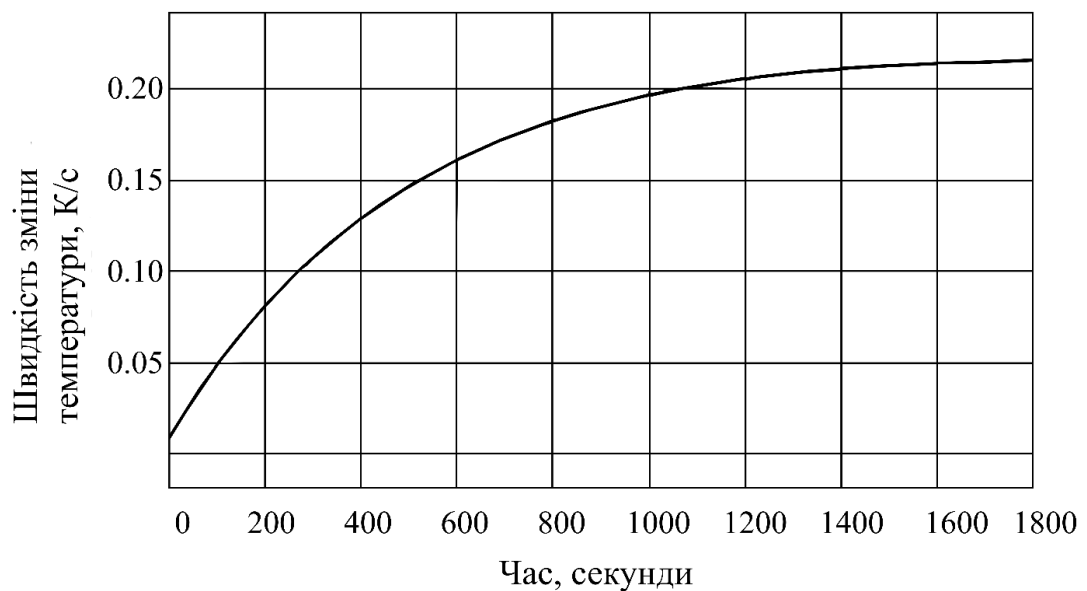


Рисунок 3.31 – Перехідний процес швидкості зміни температури при охолодженні

Таким чином, функціонування розробленої системи керування слід визнати задовільним.

3.4 Оцінка прямих показників якості інструменту після роботи системи керування

В роботі [83] наведена основна характеристика інструменту з покриттям, а саме його стійкість, яка склала 36 хвилин. Використовуючи формули, наведені в роботі [84], розрахуємо стійкість інструменту в залежності від параметрів модельованого технологічного процесу – тиску P , Па, температури T , К, і часу перебування τ в іонізаційній камері. Тоді, стійкість інструменту визначається за формулою:

$$C = 0.12\sigma_{\text{сш}} + 1.31H_{\text{м}} + 4.84\delta. \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} C &= 0.12 \cdot \sigma \cdot 10^{-6} + 1.31 \cdot H + 4.84 \cdot \delta = \\ &= 0.12 \cdot 4.30 \cdot 10^{-1} + 1.31 \cdot 31.72 + 4.84 \cdot 6.78 = 74.42 \text{ хв}, \end{aligned}$$

де зчеплення з покриттям σ дорівнює:

$$\begin{aligned} \sigma &= 4.3 \cdot 10^5 - \left(10^5 \cdot \left(3.1 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 786) \right)^2 \right) \cdot \left(2 - e^{0.19 \cdot P} \right) = \\ &= 4.3 \cdot 10^5 - \left(10^5 \cdot \left(3.1 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 786) \right)^2 \right) \cdot \left(2 - e^{0.19 \cdot 0.3} \right) = 4.30 \cdot 10^5 \text{ Па} = \\ &= 0.43 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

мікротвердість інструменту дорівнює:

$$\begin{aligned} H &= 32 - \left(1 \cdot 10^{-4} \cdot \left(800 - 728 \cdot (1 + 0.08 \cdot P) \right)^2 \right) \cdot \left(2 - e^{0.22 \cdot P} \right) = \\ &= 32 - \left(1 \cdot 10^{-4} \cdot \left(800 - 728 \cdot (1 + 0.08 \cdot 0.3) \right)^2 \right) \cdot \left(2 - e^{0.22 \cdot 0.3} \right) = \\ &= 31.72 \text{ ГПа} \end{aligned}$$

товщина покриття інструменту дорівнює:

$$\begin{aligned} \delta &= 1.111 \cdot 10^{-9} \cdot \tau \cdot \left(7.2 - e^{0.32 \cdot P} \right) = \\ &= 1.111 \cdot 10^{-9} \cdot 1000 \cdot \left(7.2 - e^{0.32 \cdot 0.3} \right) = 6.78 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Таким чином, використання розробленої системи керування дозволило істотно підвищити стійкість інструменту в порівнянні з використовуваними в даний час установками.

3.5 Висновки до третього розділу

На етапі іонного очищення основним параметром регулювання є температура, яка в установках методу КІБ (наприклад, типу «Булат») може регулюватися тільки релейним способом. Імітаційне моделювання дозволило вибрати оптимальний часовий режим підвищення температури в процесі бомбардування і розробити точну систему керування, яка дозволяє мінімізувати відхилення температури, що позначається на міцності інструменту. При іонній очистці вдалося досягти відхилення температури від програмного значення на 5 К замість регламентних 25 К.

В роботі проведено прецизійне моделювання процесу іонного очищення з використанням математичного апарату диференціальних рівнянь в часткових похідних з метою перевірки розподілу температурного поля в інструменті, що істотно впливає на якість роботи цього інструменту. Результати прецизійного моделювання показали рівномірний розподіл температури в інструменті [77]. В свою чергу це свідчить про високу якість системи керування, яка створена на базі звичайних диференціальних рівнянь.

Проведена оцінка якості інструменту при застосуванні розробленої системи керування [35] показує, що її застосування дозволяє істотно підвищити стійкість інструменту в порівнянні з установками, що використовуються в даний час. Більш точне регулювання температури призводить до поліпшення якості обробленого інструменту і дозволяє вийти на показник дефектності, рівний одному балу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УСТАНОВКИ

4.1 Розробка алгоритмічного забезпечення системи автоматизації

Алгоритм автоматизованого функціонування установки складається з чотирьох паралельно виконуваних комплексів алгоритмів в режимі реального часу. Перший комплекс відповідає за функціонування установки в відповідності з заданим регламентом (рецептом). Другий комплекс відповідає за діагностику обладнання. Третій комплекс відповідає за налаштування рецептів і обладнання. Четвертий комплекс відповідає за аварійну зупинку установки.

Розроблений узагальнений алгоритм першого комплексу обробки сталевих інструменту [75] відповідно до рекомендацій [85], представлений нижче.

1. Початок етапу іонної очистки.
 - 1.1.Проконтролювати виконання ручного завантаження інструменту.
 - 1.2.Встановити вакуум в камері. Для цього необхідно увімкнути вакуум насос до досягнення тиску P_{vac} , а потім вимкнути насос.
 - 1.3.Увімкнути механізм обертання. Досягнути швидкість обертання на рівні S_{rotate} під контролем датчика швидкості обертання.
 - 1.4.Увімкнути систему релейного керування плавним підвищенням температури від T_{start} до T_{end} за лінійною програмою протягом τ_{clean} . Контроль температури ведеться за пірометром.
 - 1.5.Вимкнути регулятор температури, а також подачу напруги.
2. Початок етапу нанесення іонно-плазмового покриття.
 - 2.1.Увімкнути ПІ-регулятор тиску в камері, пов'язаний з подачею азоту.
 - 2.2.Увімкнути ПІ-регулятор температури, пов'язаний зі зміною напруги на підкладці.

2.3.Стабілізувати температуру і тиск протягом проміжку часу τ_{coat} .

2.4.Відключити регулятори.

3. Початок етапу охолодження.

3.1.Увімкнення ПІ-регулятора охолодження, пов'язаного з подачею азоту, до досягнення T_{unload} з контролем швидкості зміни температури, що має бути не більш S_{cool} .

3.2.Відключення регулятора охолодження і системи подачі азоту.

3.3.Дочекались досягнення атмосферного тиску в камері P_{atm} і вимкнути установку.

3.4.Проконтролювати вивантаження інструменту.

Узагальнений алгоритм другого комплексу виконується в режимі реального часу з вищим пріоритетом після одержання сигналу пуску установки і сигналу вибору обробки інструменту. За допомогою алгоритму виконується перевірка функціонування усіх основних програм, датчиків та виконавчих механізмів. У випадку виявлення відмов надходить попереджувальний сигнал, якщо відмови не критичні, і сигнал на аварійну зупинку установки, якщо відмова є критичною. Нагляд за функціонуванням ведеться за допомогою форм, які описані нижче.

Узагальнений алгоритм третього комплексу виконується в режимі реального часу і відповідає в режимі реального часу після одержання сигналу пуску установки і сигналу вибору режиму налаштування. Налаштування ведеться за допомогою форм взаємодії з оператором, які описані нижче.

Узагальнений алгоритм четвертого комплексу виконується з найвищим пріоритетом в режимі реального часу після одержання сигналу аварійної зупинки, зупиняє виконання алгоритму функціонування і зупиняє установку.

4.2 Розробка програмно-технічної структури системи автоматизації

Програмно-технічна структура системи автоматизації надрукована в роботі [86].

Польовий рівень системи автоматизації являє собою сенсорну мережу, яка об'єднує датчики і виконавчі пристрої, з майстром в якості керуючого промислового комп'ютера. Найбільш недорогою і поширеною є мережа RS-485 Modbus-RTU [63]. В якості операційної системи промислового комп'ютера використовується система Windows Embedded [67].

Структурна схема сенсорної мережі показана на рисунку 4.1.

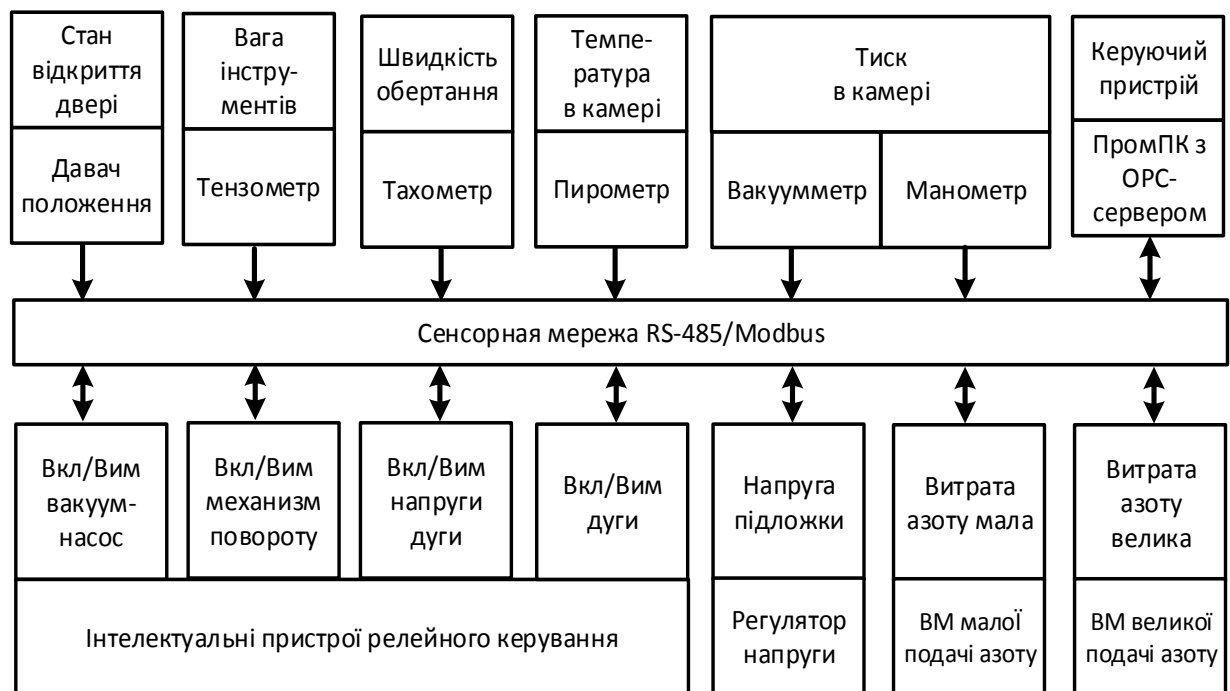


Рисунок 4.1 – Структурна схема сенсорної мережі системи автоматизації

Датчики положення, ваги, швидкості, температури і тиску, а також виконавчі механізми для подачі азоту вибираються з інтерфейсом RS-485, що спрощує їх інтеграцію. Керування реле і напругою підкладки реалізується за допомогою спеціальних регуляторів, які також підключаються до сенсорної мережі.

Основною проблемою технічних вимірювань в технологічному процесі іонно-плазмового напилення є проблема вимірювання температури. Якщо вибір технічних засобів автоматизації для вимірювання тиску, витрат і швидкості обертів досить простий, то проблема вимірювання температури інструменту, який обертається в вакуумі, залишається актуальною вже не перше десятиліття. Керування температурою є критично важливим, оскільки порушення температурного режиму впливає на адгезію між покриттям і інструментом, що призводить до критичного зниження мікротвердості і стійкості інструменту. Одним з варіантів вирішення проблеми є використання термопари з корекцією за потужністю нагріву на всіх етапах процесу. Таке рішення запропоновано в роботі [87].

Іншим, більш традиційним рішенням, є використання пірометра. У вітчизняних установках іонно-плазмового напилення використовуються пірометри типу «Смотрич» [88]. У пірометра «Смотрич-1» є ручне коректування на радіаційну здатність, визначення якої для матеріалу, який розігрівається в вакуумі, досить складна. Коефіцієнт коригування залежить від багатьох параметрів матеріалу і камери, але нехтування його вибором призводить до похибки в діапазоні 50-100 К. Методика тарування пірометра з метою визначення величини коефіцієнта коригування в умовах, близьких до реальних, запропонована в роботі [89]. Детально проблема виникнення методичної помилки вимірювання температури обертових предметів розглянута в роботі [90]. Крім цього існує проблема виникнення додаткових методичних помилок вимірювання при безпосередньому вимірі, пов'язаних зі зміною температури навколишнього середовища, запиленістю наглядного вікна, загазованістю, вологістю, зміною випромінюючої здатності об'єктів, значним фоновим випромінюванням катода і т.д. Розв'язанню такої проблеми для установки «Булат-3» присвячена робота [91]. Традиційно застосовані пірометри не відповідають сучасним вимогам за кількома показниками, такими як діапазон вимірювання, велика похибка вимірювання, відсутність сучасного мережевого інтерфейсу.

Для поставленої в дисертації задачі доцільно застосувати сучасний електронний пірометр, зокрема пірометр типу IPE 140 зі шкалою вимірювання MB10 (тобто, від 30 до 1000 °C) [92]. Заявлена похибка пірометра при температурі менше 400 °C складає 2.5 °C, а при температурі вище 400 °C – 3 °C. Особливістю пірометра, яка визначає його вибір, є вбудована система адаптивного фокусування і підлаштування під зміну випромінювання інструмента. Окрім того, пірометр має потрібний інтерфейс RS-485 Modbus-RTU.

Рівень автоматизованого комп'ютерного керування системи автоматизації включає наступне функціональне програмне забезпечення.

ОПС-сервер [63, 93] – використовується для представлення технічного забезпечення системи автоматизації як безлічі структурних змінних (тегів) для зручності взаємодії з програмним забезпеченням. Сервер повинен мати два режими роботи: режим емуляції і режим взаємодії з реальною сенсорною мережею.

Служба системи керування – використовується для фонового керування технологічним процесом за допомогою автоматичних регуляторів, які виконують задану програму. Використовується в якості служби операційної системи, що реалізує алгоритмічне забезпечення діагностики обладнання.

Сервер баз даних – зберігає таблицю доступних рецептів, історію попередніх запусків SCADA, історію активності системи керування. В якості серверу баз даних зручним є використання серверу реляційних баз даних з підтримкою стандартних інтерфейсів взаємодії з програмним забезпеченням.

Редактор рецептів – дозволяє редагувати і створювати нові рецепти. Редактор реалізує алгоритмічне забезпечення для налаштування рецептів.

SCADA [94–98] – використовується для автоматичної реалізації рецепта під контролем людини за допомогою людино-машинного інтерфейсу [99, 100], інструментів впливу на процес, а також аналізу процесу після завершення. Необхідно застосування SCADA третього покоління, яка

побудована з використанням клієнт-серверної архітектури і орієнтована на використання протоколу OPC. Серверна частина, яка постійно працює в фоновому режимі, реалізує алгоритмічне забезпечення аварійної зупинки установки. Серверна і клієнтська частини реалізують алгоритмічне забезпечення функціонування за заданим регламентом.

Також потрібно імітаційне програмне забезпечення, яке включає всі засоби для налагодження елементів системи керування і формування рецепта (регламенту обробки інструменту) з використанням імітаційної моделі технологічного процесу.

Імітаційна модель установки – реалізує можливість імітаційного моделювання установки за введеними параметрами інструменту і технологічного процесу його обробки.

Програма для ручного управління установкою – дозволяє змінювати параметри OPC-сервера (показання датчиків та керування) безпосередньо в режимі симуляції і взаємодіяти безпосередньо з виконавчими механізмами установки для налагодження роботи сенсорної мережі і OPC-сервера в реальному режимі.

Програма для моделювання перехідних процесів – використовується для визначення оптимальних параметрів регуляторів при заданих параметрах інструменту і моделювання перехідних процесів в заданому часовому режимі.

Програма для настройки регуляторів системи керування – дозволяє змінювати параметри регуляторів і відслідковувати перехідні процеси з регуляторами, а також читати звіт про роботу системи керування. Може використовуватися як для налагодження системи автоматичного керування в режимі симуляції, так і в реальному режимі.

Взаємодія з базою даних проводиться за стандартним для Windows протоколом ODBC. Взаємодія між імітаційним програмним забезпеченням реалізується за допомогою програмних інтерфейсів MATLAB.

Структурна схема інформаційної взаємодії програм системи автоматизації показана на рисунку 4.2.

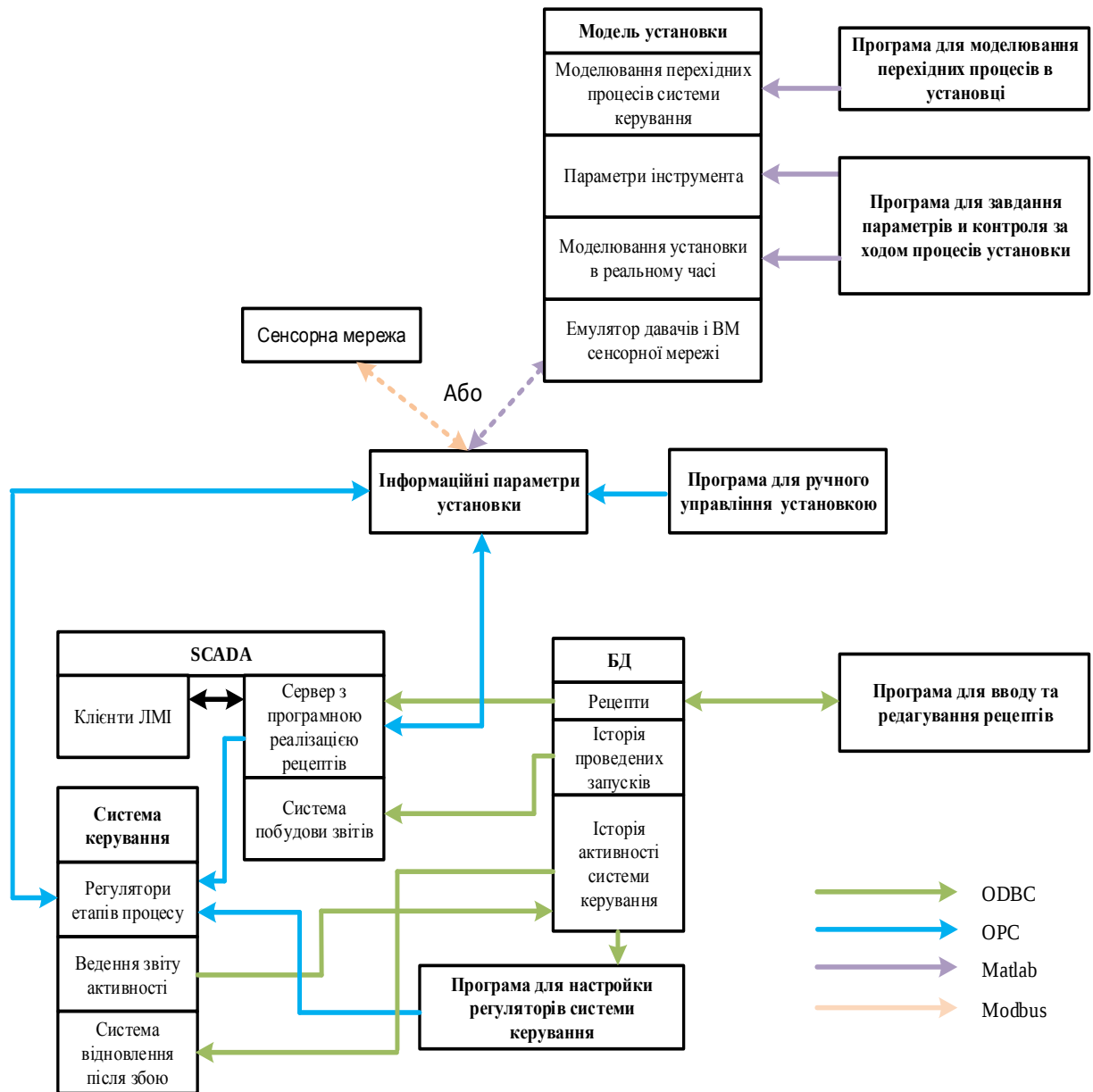


Рисунок 4.2 – Структурна схема інформаційної взаємодії програм системи автоматизації

Реалізація розробленої системи вимагає вибрати та налаштувати необхідне типове програмне забезпечення (SCADA, СУБД, OPC-сервер, тощо), а також розробити програмне забезпечення, яке не має типової реалізації. Результати розробки приведені в підрозділі 4.4.

4.3 Розробка інтерфейсу оператора комп'ютерної системи автоматизації установки

Розроблені інтерфейси оператора комп'ютерної системи автоматизації установки надруковані в роботі [101].

Одним з важливих завдань для реалізації комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації установок, які працюють за методом КІБ, є розробка ефективного комп'ютерного інтерфейсу. Наявні інтерфейси орієнтовані на програмно-логічне управління і не забезпечують потрібний високий рівень автоматизації процесу. Аналіз технологічного регламенту роботи установки Булат з розробленою для неї системою автоматичного керування показує, що процес обробки металорізального інструменту можна розділити на стадії зі строго заданими вимогами до кожної з них.

Вдосконалений комп'ютерний інтерфейс має істотно спростувати роботу оператора. Розроблений інтерфейс має відповідати вимогам міжнародного стандарту ANSI / ISA-101.01-2015 і підтримувати високий рівень автоматизації, закладений в розроблену систему автоматизації установки. Розроблені раніше інтерфейси [53, 83, 102–108] не відповідають таким вимогам. Це пояснюється тим, що завдання розробки інтерфейсу розглядалось окремо від завдання розробки системи автоматизації. Якщо автоматизоване керування в таких інтерфейсах і реалізується, то, як правило, тільки за допомогою алгоритмів реалізації послідовного виконання операцій за заданими умовами. З доступних джерел, найбільш досконалий комп'ютерний інтерфейс для установки іонно-плазмового напилення представлений в роботі [53]. Перевагою розробленого інтерфейсу є орієнтація на сенсорний екран, можливість задавати рецепти, реалізована система звітів. У той же час інтерфейс реалізується не у відповідності з сучасними вимогами комп'ютерної ергономіки, відеокадр екранної форми не відображає динаміку процесу, а показана система рецептів відповідає чисто програмно-логічному керуванню процесом. Таким чином, розробка

ефективного інтерфейсу для іонно-плазмових установок залишається актуальним завданням і в даний час повністю не вирішеним.

Огляд сучасних стандартів в області ергономіки комп'ютерних інтерфейсів представлений в роботах [109–114]. В роботі [99] проведена розробка інтерфейсу з використанням рекомендацій стандарту ANSI / ISA-101.01-2015 і використанням концепції ситуаційної обізнаності по моделі Ендслі [115], яка дозволяє уникнути поширених помилок проектування людино-машинних інтерфейсів промислових технологічних процесів. В роботі [100] розглянуто основні помилки при проектуванні людино-машинних інтерфейсів, які мають місце в практиці промислової автоматизації. З цієї роботи виділимо ті проблеми, які стосуються поширених комп'ютерних інтерфейсів іонно-плазмових установок. Найбільш поширеними помилками проектування інтерфейсів є:

- на основному екрані розміщується мнемосхема з безліччю цифрових параметрів, що не дозволяє оцінити динаміку і спрогнозувати перебіг процесу (оскільки тренди відображаються на іншому екрані, або не відображаються зовсім);
- використовується безліч відволікаючих чинників, а саме надмірне кольорове оформлення, 3D-тіні, анімація;
- організація екранів орієнтована на надання інформації різних типів і не є як наслідком аналізу типових дій оператора, так і завдань, які він повинен постійно розв'язувати;
- елементна база і цифровий алфавіт інтерфейсів недостатньо обґрунтовані, що не дозволяє ефективно спрямовувати увагу оператора.

Приведемо раціональні вимоги до екранів і способи, якими їм можна задовольнити.

1. Основні вимоги до розробки інтерфейсу і способи їх реалізації.
 1. 1. Використовується візуальне представлення екранів відповідно до рекомендацій стандарту ANSI / ISA 101.01-2015.
 1. 2. Використовується світло-сірий фон.

1. 3. Використовується спрощена мнемосхема установки з використанням темно-сірих ліній.

1. 4. Жовтий колір закріплений за передаварійною, червоний – за аварійною сигналізацією.

1. 5. Дії операторів повинні підтверджуватися.

2. Досягнення ситуаційної обізнаності.

2. 1. Основні параметри відображаються в трендах із зазначенням допустимих меж параметрів пунктирними лініями темно-зеленого кольору, що дозволяє спрогнозувати перебіг процесу.

2. 2. Тренд відображається не за весь проміжок процесу, а за раціональний, який дозволяє оцінити ситуацію – в даному випадку 10 хв.

2. 3. Стан виконання поточного етапу процесу оцінюється за допомогою смужкового індикатора.

3. Логічно обґрунтована організація екранів з орієнтацією на завдання, які повинні вирішуватися оператором.

3. 1. Виділяються 5 екранів: процес, звіти, рецепт, діагностика, налаштування.

3. 2. Всі екрани мають три обов'язкові зони: меню перемикавання екранів, основну зону, зону відображення повідомлень.

3. 3. Екран «Процес» призначений для перегляду стану перебігу процесу, його вміст динамічно змінюється в залежності від поточного стану технологічного процесу.

4. Використання інтуїтивно зрозумілої елементної бази інтерфейсу, яка відповідає колірному алфавіту.

4.1. Колір ліній спрощеної мнемосхеми і колір тексту її елементів – темно-сірий.

4.2. Для відображення зв'язку елементів контурів керування використовується пунктирна лінія чорного кольору.

4.3. Для відображення активних елементів інтерфейсу (датчиків, виконавчих механізмів, повзунків прогресу) використовується синя лінія з зафарбованим білим кольором.

4.4. Колір тексту активних технологічних параметрів – синій.

4.5. Колір тексту параметрів, які підлягають введенню – світло-зелений.

4.6. Колір тексту елементів, на які можна натиснути – фіолетовий.

Розглянемо реалізацію кожного з п'яти екранів інтерфейсу.

Екран «Рецепт» (рисунок 4.3) дозволяє створити та редагувати поточний рецепт для заданого типу інструменту і партії цього інструменту.

Вибір рецепту	Проведення процесу	корекція параметрів рецепту	діагностика системи															
КОРЕКЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЦЕПТУ 12X18H10T (висока якість) – партія 711																		
ІОННЕ ОЧИЩЕННЯ Кінцева темп. 527 °C Припустимо відхилення на 25 °C		ЧАСОВИЙ РЕГЛАМЕНТ Час очищення 1800 с Час нанесення 1000 с Час охолодження 1800 с																
ІОННО-ПЛАЗМОВЕ ПОКРИТТЯ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Мінімум</th> <th>Максимум</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Температура</td> <td>526 °C</td> <td>528 °C</td> </tr> <tr> <td>Тиск</td> <td>0.25 Па</td> <td>0.35 Па</td> </tr> <tr> <td>Регулятор температури</td> <td>Кр 10.1</td> <td>Ти 2811</td> </tr> <tr> <td>Регулятор тиску</td> <td>0.01</td> <td>0.33</td> </tr> </tbody> </table>			Мінімум	Максимум	Температура	526 °C	528 °C	Тиск	0.25 Па	0.35 Па	Регулятор температури	Кр 10.1	Ти 2811	Регулятор тиску	0.01	0.33	ФОРМУЛИ Мікротвердість $32 - (1e4 * (800 - 728) * (1 + 0.08 * p))^2$ Товщина покриття інструменту $1.111e-9 * ctime * (7.2 * \exp(0.32 * p))$ Зчеплення з покриттям $4.3e-5 - (1e5 * 3.1e-3 * (ctime - 786))^2 * (2 - \exp(0.19 * p))$ Стійкість інструменту $0.12 * grip * 1e-6 + 1.31 * mcham + 4.84 * thickness'$	
	Мінімум	Максимум																
Температура	526 °C	528 °C																
Тиск	0.25 Па	0.35 Па																
Регулятор температури	Кр 10.1	Ти 2811																
Регулятор тиску	0.01	0.33																
ОХОЛОДЖЕННЯ Кінцева температура 227 °C Макс. швидкість зміни температури 0.4 °C/сек Макс. відхилення температури 2 °C Регулятор температури Кр 10.1 Ти 2811		ЦІЛЬОВІ КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ Стійкість: 74 хв Мікротвердість: 31.7 ГПа																
ЗАСТОСУВАТИ НОВІ ПАРАМЕТРИ ДЛЯ ЦИКЛУ																		
19:58:52																		

Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд екрану «Рецепт»

Метою формування рецепта є досягнення заданих показників якості продукції, в першу чергу – стійкості, мікротвердості і товщини покриття металорізального інструменту. Для визначення цих параметрів для інструменту використані формули, приведені в підрозділі 3.4.

Аналізуючи результати функціонування установки досягнуті параметри якості можна оцінити, використовуючи середні значення технологічних параметрів (значення параметрів якості показані на формі етапу охолодження).

Екран «Процес» використовується для спостереження за ходом виконання всіх етапів технологічного процесу, який виконується відповідно до заданого в рецепті регламенту. Зовнішній вигляд екрану на першому етапі показаний на рисунку 4.4.

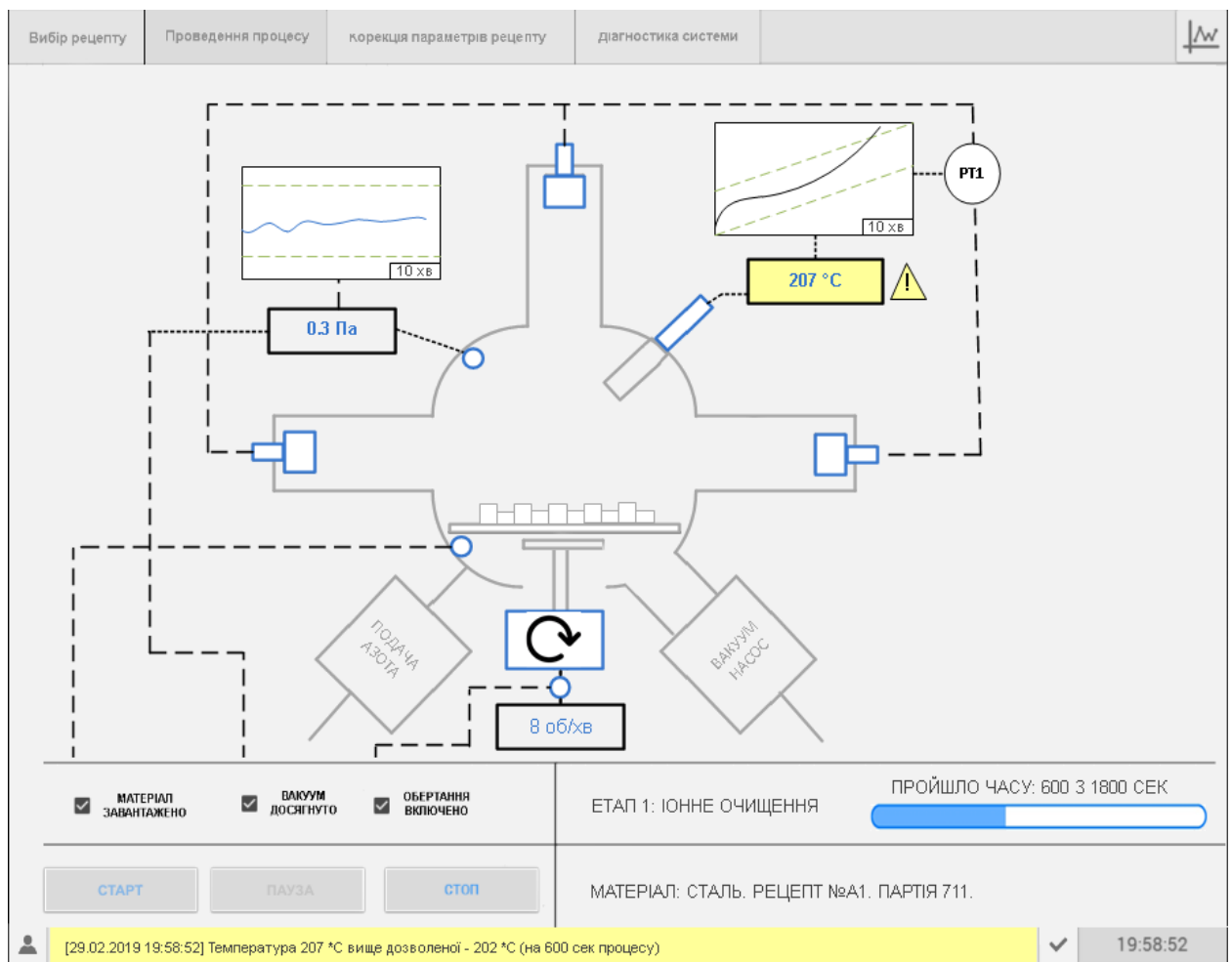


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд екрану «Процес» на 1 етапі

На рисунку 4.4 показана технологічна ситуація перевищення температури при виконанні операції плавного підвищення температури на 1 етапі (іонної очистки). Керована змінна регулятора температури (PT1) досягла 207°C , що перевищує необхідне на 600 с значення в $177 \pm 25^{\circ}\text{C}$. Повідомлення про це відображається знизу екрану разом з подачею звукової сигналізації, яка триває до підтвердження повідомлення. На рисунках 4.5 і 4.6 показаний зовнішній вигляд зазначеного екранів на 2 і 3 етапах. На рисунку 4.5 показана технологічна ситуація відмови двигуна виконавчого механізму подачі азоту в камеру при виконанні операції стабілізації тиску і температури в камері на 400 с. На рисунку 4.6 показано нормальне виконання операції плавного охолодження 3 етапу технологічного процесу на 1600 с.

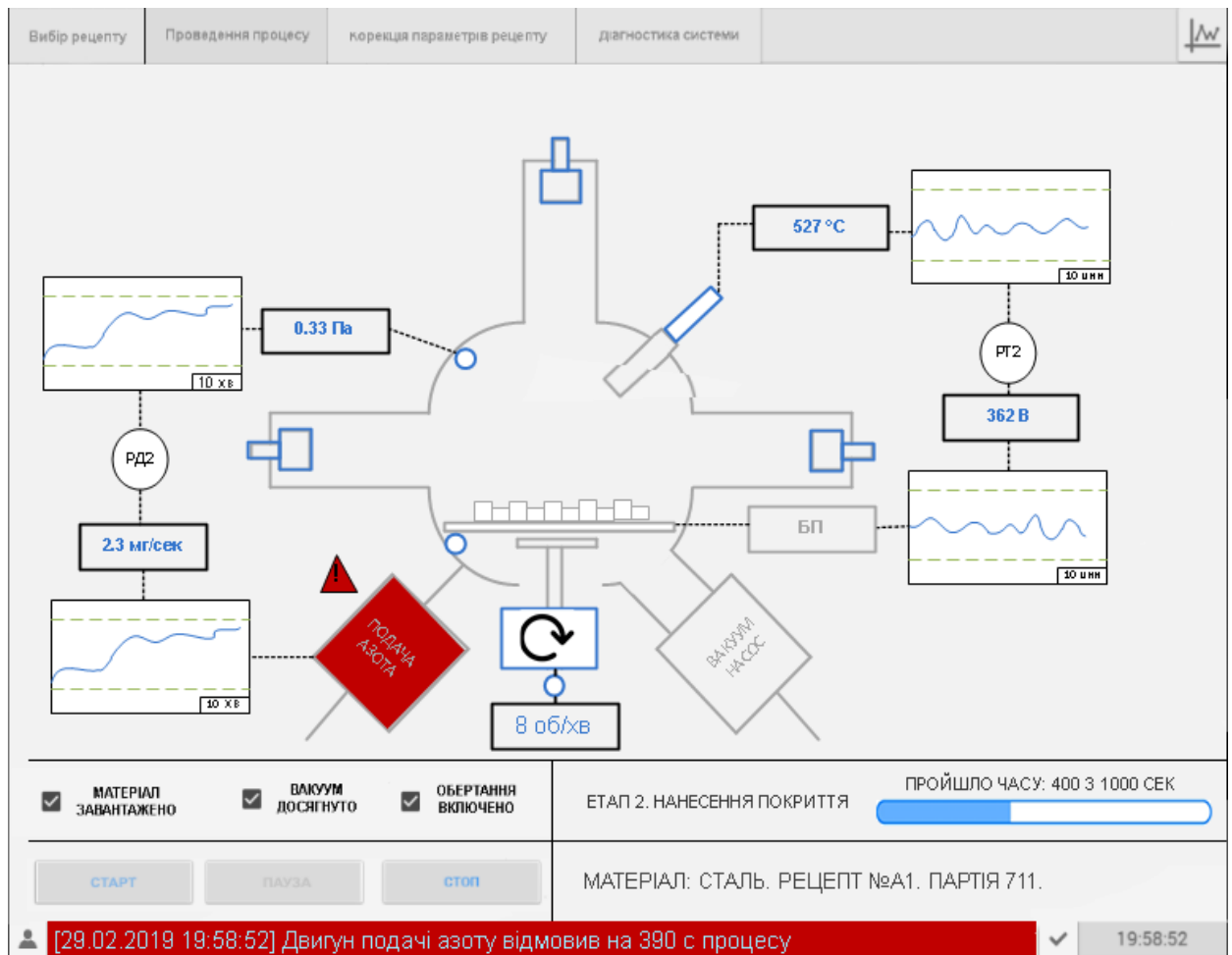


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд екрану «Процес» на етапі нанесення покриття

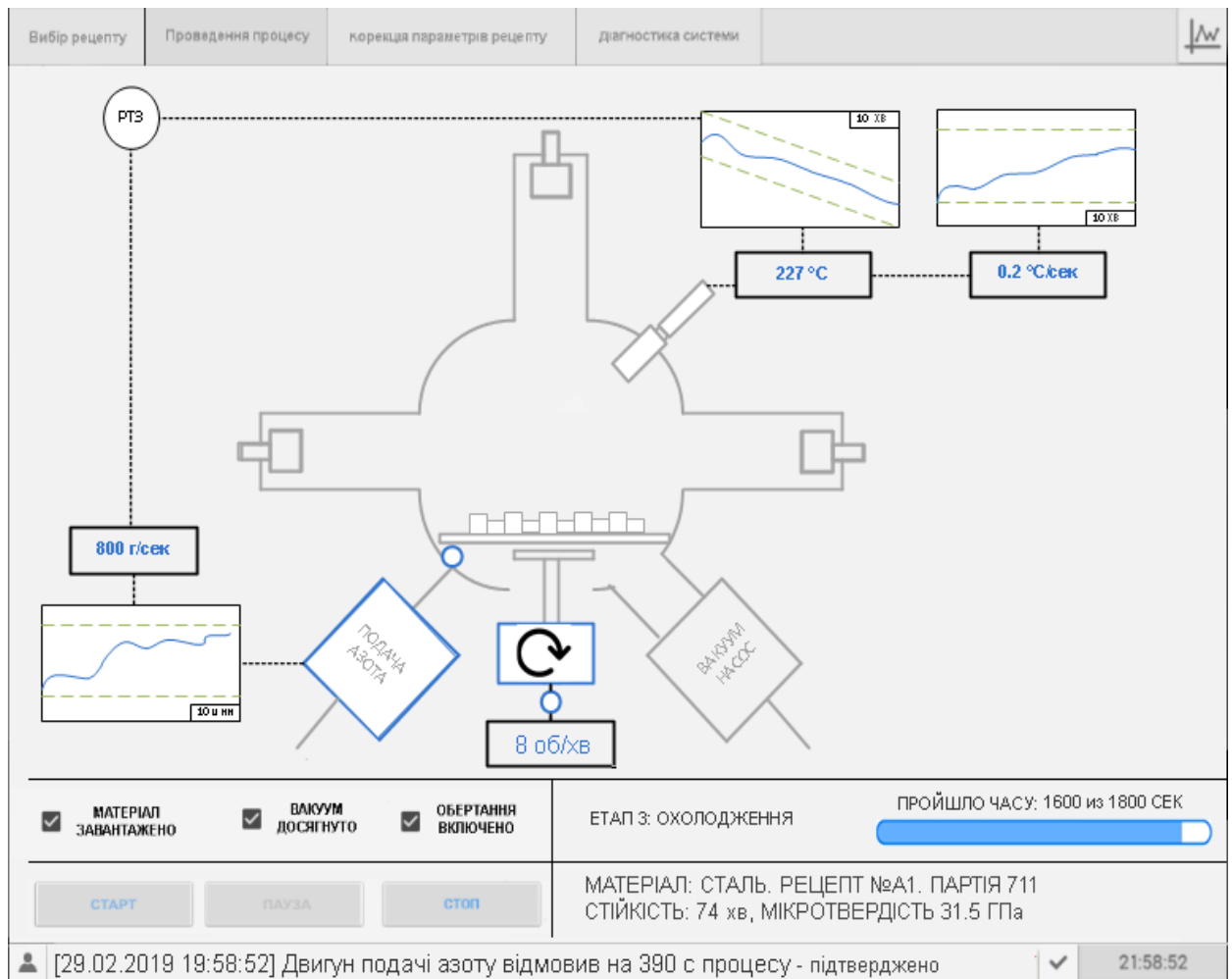


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд екрану «Процес» на етапі охолодження

Екран «Діагностика» призначений для виконання діагностики функцій системи автоматизації та для втручання в хід технологічного процесу. При виникненні аварійної або передаварійної технологічної ситуації оператор має три варіанти дій: зупинка процесу, ігнорування повідомлення до кінця роботи процесу (в разі попереджень або відмови деякого обладнання в кінці етапу процесу), пауза процесу. У разі вибору паузи за допомогою екрану діагностики можливо скорегувати дії системи керування і продовжити виконання процесу. Зовнішній вигляд екрану показаний на рисунку 4.7.

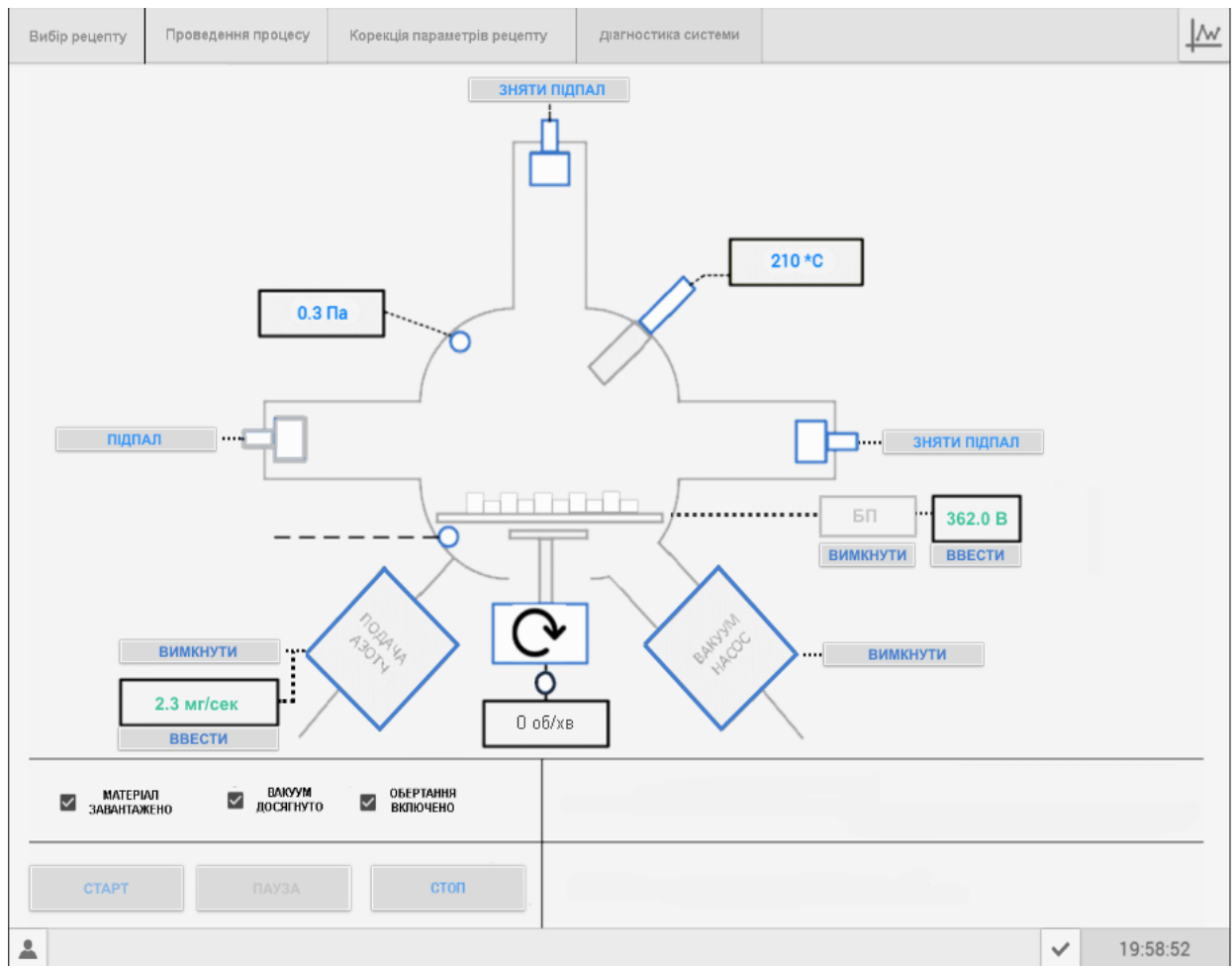


Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд екрану «Діагностика»

Таким чином, розроблено всі екрани, які відповідають вимогам до інтерфейсу.

4.4 Розробка програмної реалізації системи автоматизації

Метою функціонування програмного забезпечення системи автоматизації є реалізація рецепту. Тому розглянемо більш докладно проблему розробки рецепту.

Як правило, іонно-плазмові установки є автономними пристроями, керованими оператором з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації в межах невеликого спеціалізованого підприємства. Виходячи з

цього, розробка рецептів обробки різного виду інструментів є завданням оператора установки.

Раціональний рецепт повинен відповідати наступним критеріям: враховувати можливості установки і характерні збурення, ефективно використовувати час циклів, бути економічно ефективним. Отже, чисто емпірично такий рецепт визначити неможливо, для його формування потрібне використання адекватної математичної моделі, а для відповідності всім вимогам необхідно проводити моделювання динаміки установки з зазначеним інструментом і налагодженої системи автоматичного керування. Тому для розробки рецепта необхідно:

- провести первинний розрахунок параметрів рецепта без впливу системи керування;
- реалізувати рецепт за допомогою ручного управління;
- визначити параметри математичної моделі і звірити поведінку по моделі з результатами ручного управління;
- визначити параметри рівнянь для оцінки показників якості за результатами лабораторного аналізу;
- визначити оптимальні параметри системи керування і провести моделювання перехідних процесів системи керування;
- реалізувати процес з отриманими параметрами системи керування;
- уточнити параметри рівнянь для оцінки показників.

Опишемо функціональне програмне забезпечення.

В якості OPC сервера в системі автоматизації використаємо сервер MasterOPC. Сервер має два файли настройки: для реального режиму і для віртуального. Завантаження файлу налаштування визначає режим роботи. OPC-сервер працює з наступними групами параметрів:

- датчики: стан відкриття дверей, вага інструментів, тиск в камері, температура в камері, швидкість обертів механізму повороту;

- виконавчі механізми: вкл / викл вакуумного насоса, вкл / викл механізму повороту, витрата азоту, вкл / викл дуги, вкл / викл живлення дуги, подавання напруги підкладки;
- регулятор температури при очищенні: вкл / викл, наявність помилки, температура завершення процесу, необхідний час процесу, допустимий діапазон відхилення температури, завершення виконання;
- регулятор температури при покритті: вкл / викл, наявність помилки, необхідний час процесу, завдання, параметри ПП-регулятора, допустимий діапазон відхилення температури, завершення виконання;
- регулятор тиску при покритті: вкл / викл, наявність помилки, необхідний час процесу, завдання, параметри ПП-регулятора, допустимий діапазон відхилення тиску, завершення виконання;
- регулятор температури при охолодженні: вкл / викл, наявність помилки, температура завершення процесу, необхідний час процесу, параметри ПП-регулятора, допустимий діапазон відхилення температури, завершення виконання;
- коефіцієнт прискорення роботи регуляторів (для відлагодження з імітаційної моделлю).

Служба системи керування реалізується мовою програмування Python [72]. Для реалізації служби використовується бібліотека `pywin32`. Компіляція в виконавчий файл проводиться за допомогою утиліти `pyinstaller`. Для зв'язку по протоколу OPC використовується бібліотека `OpenOPC`. Для зв'язку з СУБД використовується бібліотека `pyodbc`. Поведінка програми визначається значення тегів, що зазначені у відповідному рядку наведеного вище списку. Службова програма виконує дві функції: діагностичну (відстеження наявності зв'язку з OPC-сервером, сенсорної мережею, пристроями сенсорної мережі, перевірка коректності показань, запущеної і адекватної роботи сервера SCADA і СУБД, наявність запущених клієнтів SCADA, з яких комп'ютерів і під якими користувачами вони запущені) і реалізацію алгоритмів регулювання. Програма постійно записує результати свого

виконання в БД і записує помилки свого виконання в журнал подій операційної системи. У разі неможливості зв'язку з СУБД результати виконання записуються в файл, вміст якого переноситься в БД при відновленні зв'язку. У разі помилки зв'язку з ОРС-сервером, аварійної ситуації або ряду інших помилок програма відтворює звуковий сигнал для залучення уваги оператора.

В якості СУБД використовується MS SQL Server Express [69]. Оскільки технологічний процес періодичний і не має великої кількості параметрів, використання реляційної СУБД є допустимим.

В СУБД присутня таблиця параметрів рецептів, яка включає наступну інформацію:

- вага інструментів,
- необхідний тиск вакууму,
- швидкість обертів механізму,
- час іонно-плазмового бомбардування (ІПБ),
- задана бажана температура в кінці ІПБ,
- допустиме відхилення температури в процесі ІПБ,
- час покриття,
- номінальна витрата азоту,
- номінальна напруга підкладки,
- параметри регулятора температури при покритті,
- параметри регулятора тиску при покритті,
- задана швидкість охолодження,
- температура закінчення процесу при охолодженні,
- параметри регулятора температури при охолодженні,
- формули для визначення показників якості,
- службова інформація про марку сталі,
- тип і кількість інструментів.

Також присутня таблиця записів повідомлень системи керування й ряду додатково розроблених повідомлень, таблиця користувачів (операторів), яка, зокрема, містить дані для авторизації в SCADA.

При кожному запуску технологічного процесу в СУБД створюються чотири нові таблиці, пов'язані з конкретним запуском:

- таблиця загальної інформації про запуск (номер партії, оператор, використаний рецепт, партія, дата проведення, успішність чи неуспішність проведення процесу, розраховані критерії якості),
- журнал технологічних параметрів (посекундний запис всіх параметрів технологічного процесу),
- журнал повідомлень SCADA (код повідомлення, текст повідомлення, час появи і час підтвердження повідомлення),
- журнал керуючих впливів системи керування.

Створення окремих таблиць є більш надійним, ніж використання однієї чи декількох великих загальних таблиць, що постійно заповнюються.

Для зв'язку з MES використана СУБД має механізм подань і збережених процедур, що дозволяє забезпечити швидку інтеграцію в разі потреби.

Редактор рецептів є клієнтською програмою, яка використовується для візуального редагування таблиці рецептів БД. Програма дозволяє задати параметри рецепта і проводить перевірку вступних даних. Всі взаємодії з програмою фіксуються в таблиці повідомлень.

Зовнішній вигляд екрану редактора рецептів представлений на рисунку 4.8.

В якості SCADA використовується Simple SCADA. Це програмна система, яка відноситься до третього покоління SCADA, які мають клієнт серверну-архітектуру і орієнтовані на взаємодію з сервером інформаційних параметрів, доступ до якого реалізується за допомогою промислового протоколу, наприклад OPC.

SCADA реалізує клієнт-серверну архітектуру, орієнтована на взаємодію тільки по протоколу OPC, легко інтегрується з СУБД MySQL і MS SQL Server [69]. Розроблені інтерфейси відмінно масштабуються під будь-яке розширення сенсорного екрану. Для поліпшення якості відображення використовуються засоби бібліотек графічної візуалізації OpenGL і DirectX. Мова програмування SCADA – Free Pascal [116].

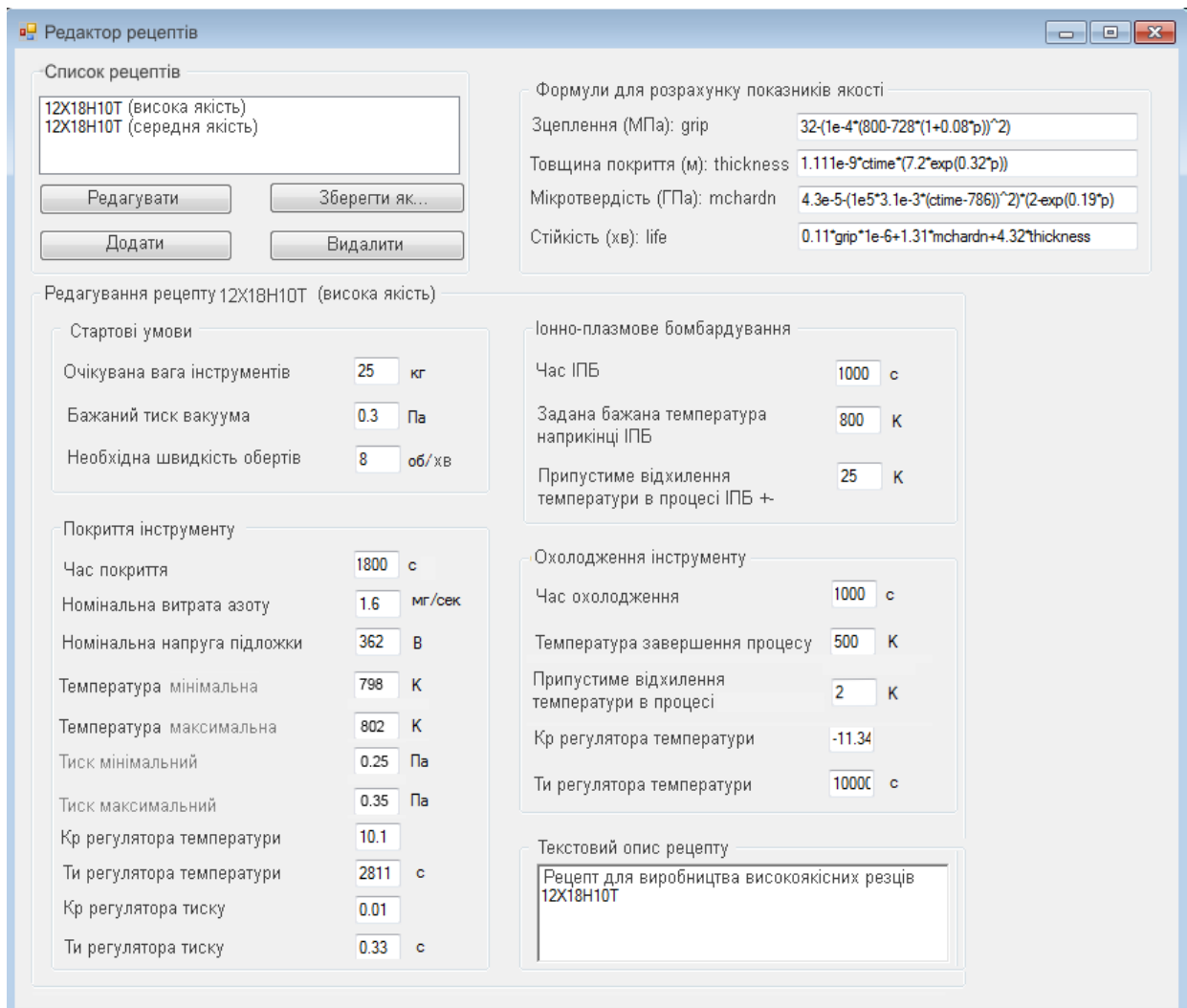


Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд екрану редактора рецептів

Серверна частина SCADA працює в фоновому режимі і виконує низку циклічних завдань: виконання або очікування виконання рецепта; діагностика стану обладнання установки, обробка ситуацій з втратою зв'язку;

запис ходу процесу в базу даних, формування подій, інформаційних, передаварійних і аварійних повідомлень.

Клієнтська частина SCADA передбачає можливість авторизації користувачів, тому кожен оператор або інженер виконує роботу під своїми обліковими даними. Крім того, передбачений доступ для спостереження, який проводиться без вимоги пароля. Зовнішній вигляд екрану, який використано в клієнтській програмі, що реалізована в Simple SCADA, показаний на рисунку 4.9.

У розглянутій реалізації ЛМІ оператора складається з 4-х екранів: вибір рецепта, проведення процесу, корекція параметрів процесу, діагностика системи.

На екрані вибору рецепта оператор повинен обрати необхідний рецепт. Після вибору на екрані відображаються параметри рецепта, які оператор підтверджує. Також на екрані необхідно задати індивідуальний номер партії.

Екран проведення процесу представлений на рисунку 4.9. На рисунку показана технологічна ситуація виконання першого етапу технологічного процесу – іонно-плазмового бомбардування (очищення). При нормальному перебігу процесу оператор повинен спостерігати за ходом процесу за допомогою цього екрана і реагувати на виникаючі повідомлення.

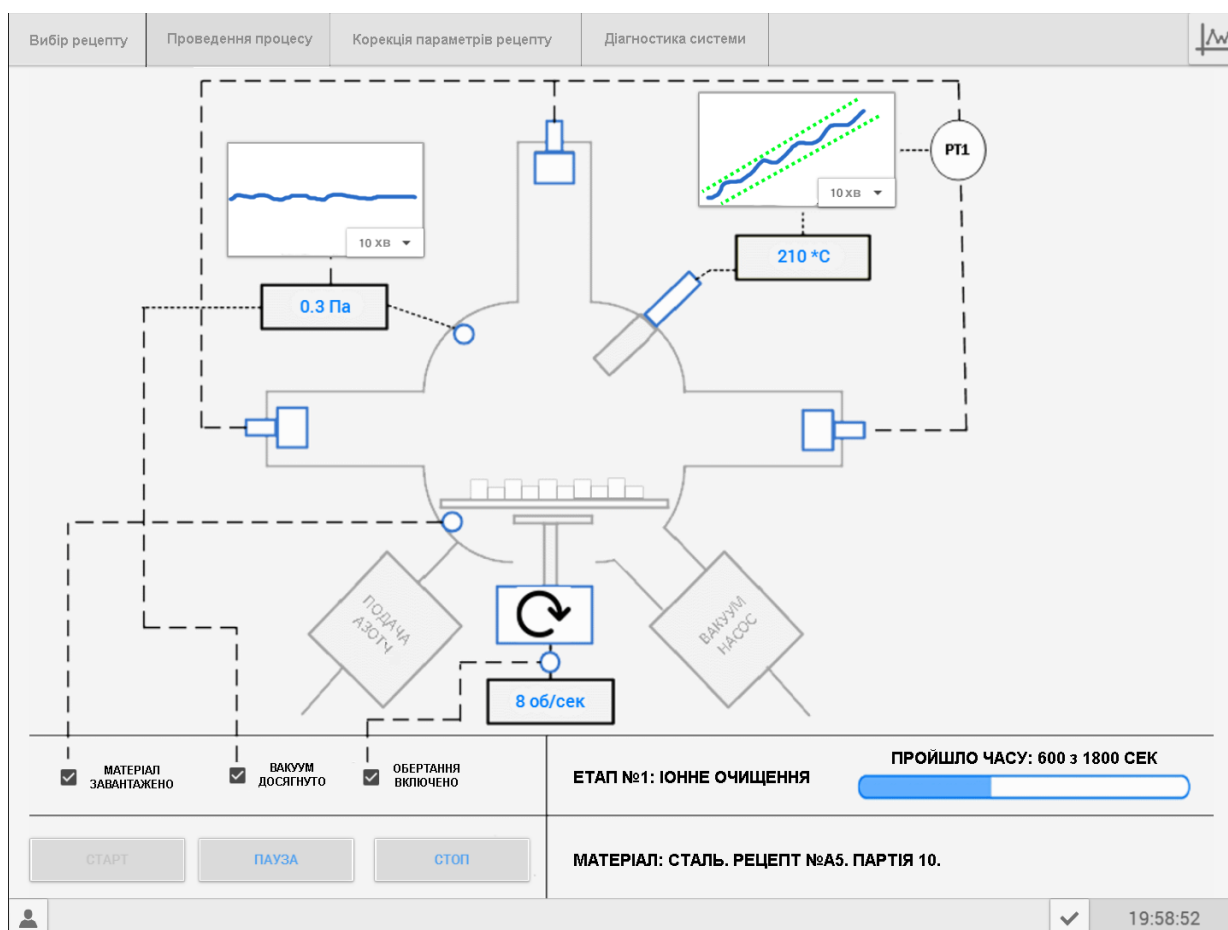


Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд працюючого екрану клієнтського додатка SCADA

Спрощена версія екрану проведення процесу без керуючих елементів доступна при вході в систему без авторизації. Обрана SCADA дозволяє забезпечити доступ до екрану як за допомогою клієнтської програми для Windows, так і за допомогою браузера.

Екран корекції параметрів рецепта використовується оператором для оперативного редагування параметрів рецепта перед запуском процесу, так і для корекції під час роботи. Всі оперативні зміни рецепта фіксуються.

У разі виникнення аварійних або передаварійних ситуацій оператор повинен призупинити хід процесу і використовувати екран діагностики для ручного управління виконавчими механізмами установки.

Тепер розглянемо розроблене імітаційне програмне забезпечення системи автоматизації.

Використання імітаційної математичної моделі установки, поведінка якої в реальному часі близька до поведінки фізичної установки, дозволяє досягти наступних результатів:

- розробка, удосконалення та налагодження програмного забезпечення SCADA і системи регулювання може проводитися без матеріальних втрат;
- визначення і завдання оптимальних параметрів рецепта для досягнення необхідних якісних показників при наявності коректної математичної моделі установки з заданими параметрами інструменту зазнає суттєвого спрощення, що призводить до зниження кількості випробувань на реальних об'єктах.

Імітаційна математична модель представляє із себе програму з графічним інтерфейсом, реалізовану в MATLAB [117], яка в реальному часі взаємодіє з системою керування та SCADA за допомогою протоколу OPC. Для цього OPC-сервер повинен бути переключено в режим, коли теги не пов'язані з сенсорною мережею і їх значення можуть задаватися за допомогою програмного забезпечення (наприклад, імітаційна модель повинна сформувати показники датчиків). Базою імітаційної математичної моделі установки є нелінійні рівняння динаміки всіх її процесів, розроблені в розділі 2. Алгоритми імітаційної моделі дозволяють реалізувати поведінки установки на різних етапах технологічного процесу. Для цього перед виконанням кожного етапу відбувається перевірка умов виконання. Якщо умови не дотримуються, то імітаційне моделювання поточного процесу не проводиться. Наприклад, включення вакуум-насоса впливає на тиск в камері тільки якщо закрита кришка. В іншому випадку тиск не змінюється. Зовнішній вигляд імітаційної математичної моделі представлений на рисунку 4.11.

Графічний інтерфейс забезпечує наступні можливості:

- задати параметри інструменту (радіус і довжина циліндра, густина матеріалу, густина іонного струму, середня кінетична енергія іонів, середня кратність заряду іонів, заряд електронів);

- задати початкові параметри процесу, включаючи діапазон зміни збурень систем регулювання;
- провести запуск, зупинку або перезапуск моделювання в реальному часі з заданим коефіцієнтом прискорення.

Відслідковувати зміну етапів виконання технологічного процесу. На рисунку 4.10 показаний діалог в момент проходження етапу покриття.

Графічний інтерфейс забезпечує наступні можливості:

- бачити поточний етап і ступінь його виконання: на екрані поточний етап виділено курсивом і можливо побачити, що процес почався, оскільки всі необхідні умови виконані і вже пройшло 200 секунд.
- відслідковувати динаміку зміни технологічних параметрів за допомогою функції побудови графіків перехідних процесів
- зберегти поточні налаштування в файл і завантажувати збережені настройки з файлів.

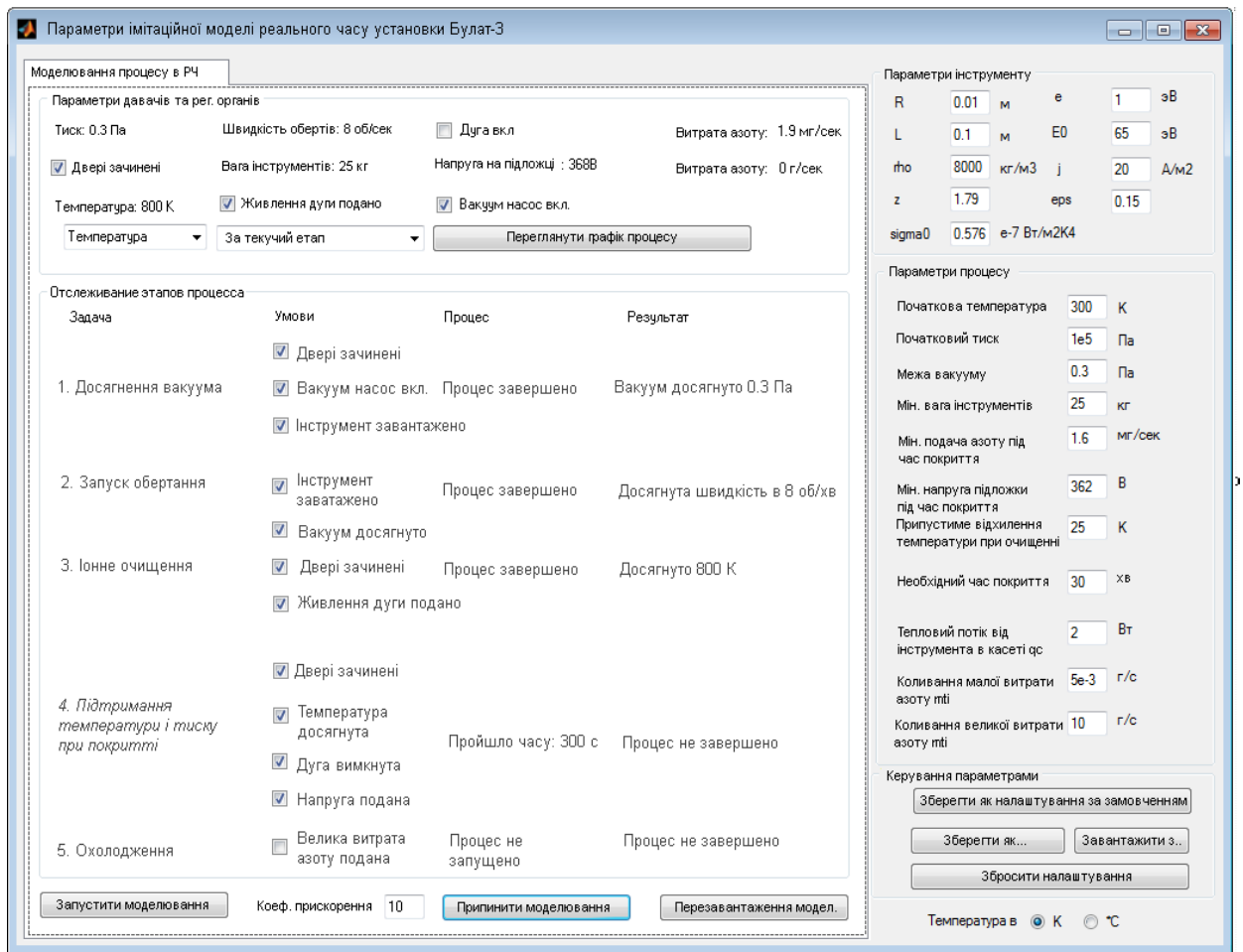


Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд екрану імітаційної програми установки

Програма для ручного управління установкою (рисунок 4.11) може бути використана як для управління реальної установкою без SCADA, так і для управління імітаційної математичної моделлю. Програма позбавляє від необхідності редагувати параметри OPC-сервера вручну.

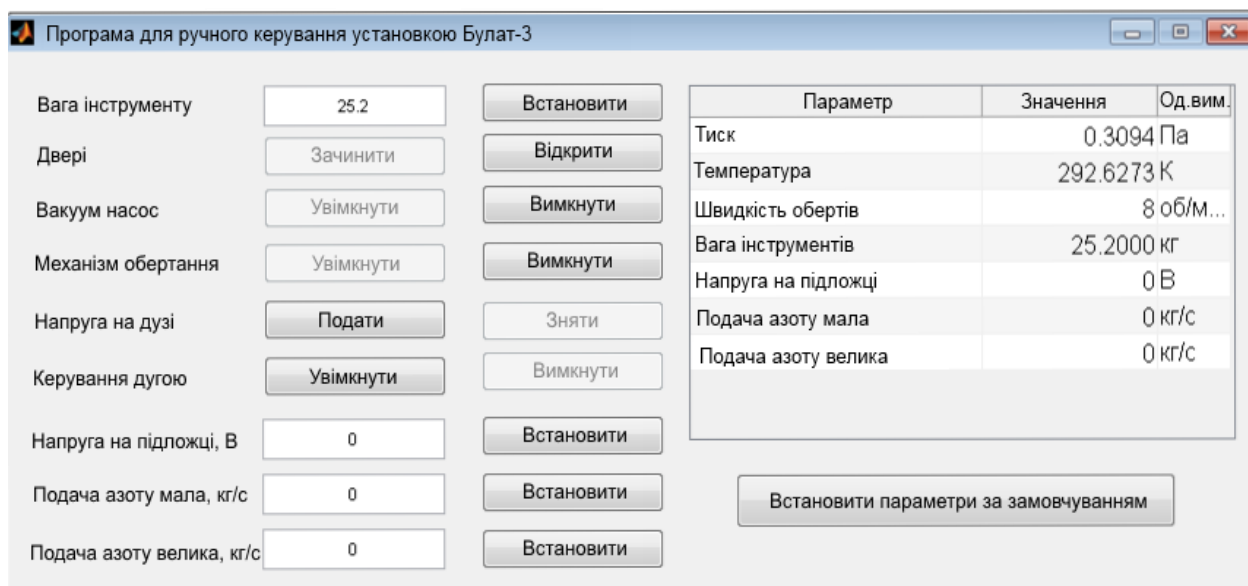


Рисунок 4.11 – Зовнішній вигляд екрану програми ручного управління установкою

Програма для синтезу системи керування установкою (рисунок 4.12) дозволяє визначити оптимальні настройки регуляторів для моделі з заданими параметрами. Крім того, можливо провести моделювання перехідних процесів із заданими збуреннями і побудувати графіки перехідних процесів. В процесі моделювання критерії якості оцінюються за заданими рівняннями, коректність яких можливо в подальшому звірити з показниками реальної продукції. Програма реалізована за допомогою MATLAB.

Програма для налаштування програмного регулятора температури на етапі іонного очищення дозволяє без редагування параметрів OPC сервера безпосередньо змінювати параметри регуляторів і спостерігати графіки перехідних процесів у реальному часі. Екран дозволяє оцінити якість металорізального інструменту.

Також в програмі реалізована функція перегляду журналу роботи системи регулювання, який зберігається в базі даних.

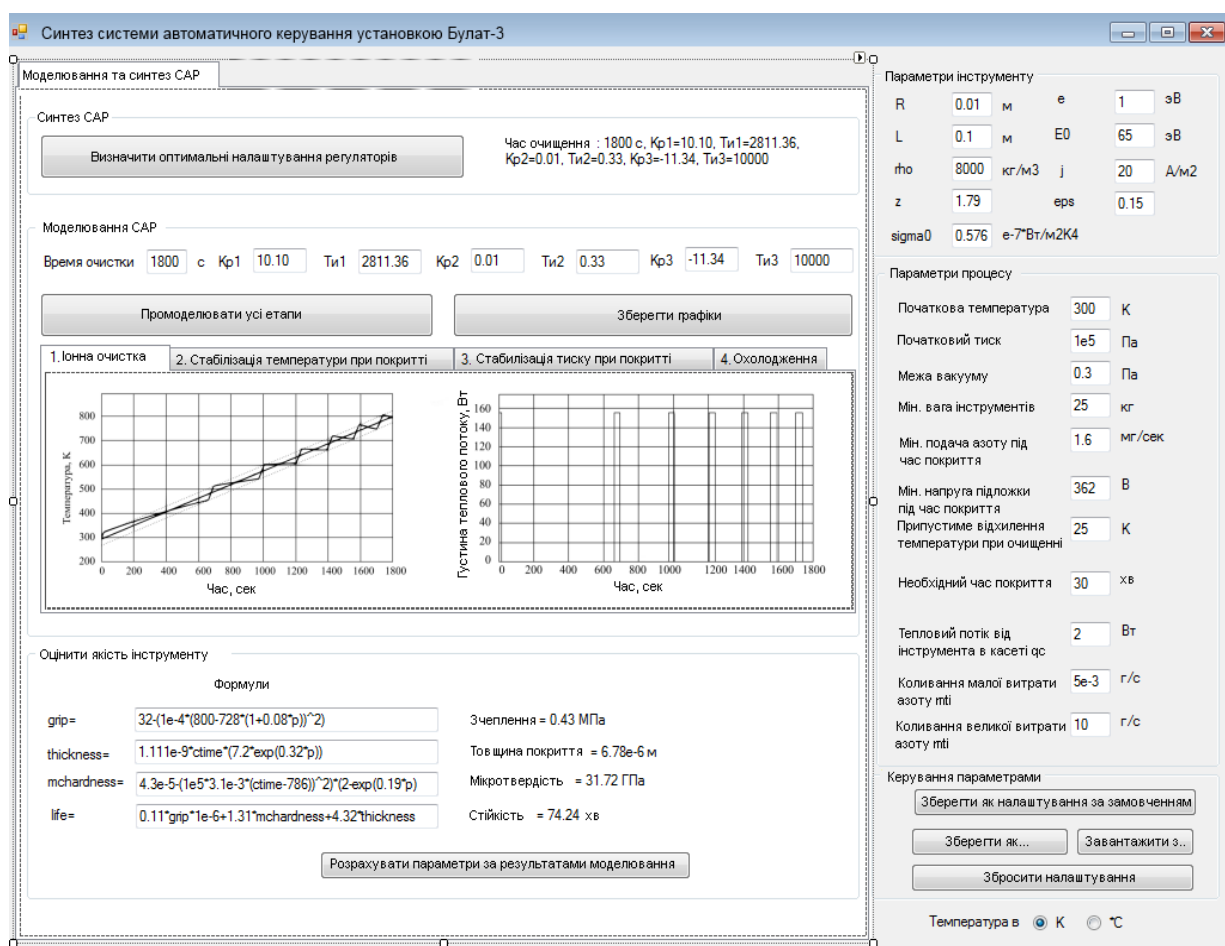


Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд програми синтезу системи автоматичного керування

4.5 Висновки до четвертого розділу

Розроблена програмно-технічна структура комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки іонно-плазмового напилення «Булат». Велика частина установок цього типу експлуатується в рамках невеликих спеціалізованих підприємств, тому розробка та налагодження нових рецептів часто стає завданням оператора. Розроблене рішення по автоматизації дозволяє спростити зазначену задачу, оскільки включає спеціальні засоби для імітаційного моделювання установки в реальному часі, а також для синтезу і налагодження системи автоматичного керування для установки з заданими параметрами технологічного процесу.

Розроблена структура відповідає сучасним вимогам до систем автоматизації та побудована за модульним принципом, що спрощує налагодження її окремих компонентів. Аналіз регламенту і сучасних практик розробки ефективних інтерфейсів дозволив сформулювати вимоги до інтерфейсу оператора, що задовольняє сучасним вимогам ергономіки та ситуаційної усвідомленості. Комп'ютерний інтерфейс реалізовано в сучасній SCADA.

Розроблена система автоматизації дозволяє підвищити якість обробки інструментів. Отримані результати можуть бути застосовані для розробки нових комп'ютерних систем автоматизації іонно-плазмовими установками.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз фахових науково-технічних літературних джерел з описом технологічних процесів покращення якості металорізального інструменту за рахунок іонно-плазмового напилення за методом КІБ; установок, які реалізують цей процес; сучасних системи автоматизації установок показав, що системи автоматизації установок вимагають суттєвого вдосконалення. Таке вдосконалення можливо реалізувати за рахунок використання сучасних програмних і технічних засобів автоматизації. Окрім підвищення якості металорізального інструменту, треба підвищити продуктивність установок за рахунок як розширення асортименту інструмента, який обробляється, так і зменшення браку при обробці інструменту. Окрім того, потрібно компенсувати зниження професіоналізму операторів установок, тенденція до якого постала в останні роки.

2. Розроблено комплекс нелінійних математичних моделей динаміки технологічних процесів установки: очищення, напилення та охолодження, які вперше формалізують весь технологічний процес. Вдосконалення моделей можливе за рахунок застосування сучасних засобів математичного моделювання і програмного забезпечення. Сучасне програмне і апаратне забезпечення систем автоматизації дозволяє реалізовувати високоякісне автоматичне керування всіма етапами роботи іонно-плазмових установок, що розроблено з врахуванням математичних моделей динаміки технологічного процесу.

3. Розроблена розподілена математична модель динаміки радіальної теплопровідності металорізального інструмента під дією плазмового струменя, яка відрізняється тим, що для здійснення керування моделлю, дія струменю замість крайової умови вводиться в праву частину диференціального рівняння в часткових похідних по методу А. Г. Бутковського. Модель використана для перевірки точності розробленої

нелінійної математичної моделі динаміки процесу очищення інструменту в звичайних похідних.

4. Розроблено вперше комплекс високоякісних систем керування технологічних процесів установки іонно-плазмового напилення на металорізальний інструмент. Імітаційне моделювання підтверджує високу якість роботи розроблених систем керування. Якість регулювання дозволяє покращити основні показники інструменту, такі як: стійкість, мікротвердість, зчеплення.

5. Розроблено сучасне інформаційне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації установки у вигляді комплексу комп'ютерних форм для оператора установки, яке відповідає сучасним вимогам промислової ергономіки.

6. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система автоматизації установки, яка функціонує в реальному часі. Розроблене забезпечення дозволяє не тільки гнучко налаштовувати установку на обробку металорізального інструменту різних конфігурацій, з різного матеріалу основи і напилення, але й експлуатувати установку в автоматичному режимі. Для економії інструменту при налаштуванні нового технологічного процесу, розроблена система автоматизації дозволяє проводити випробування з використанням розроблених моделей технологічних процесів.

7. Практичне застосування одержаних результатів здійснюється в процесі виконання лабораторних, курсових та дипломних робіт студентами Одеського національного політехнічного університету.

8. В холдинговій компанії «Мікрон» було проведено випробування різального інструменту з іонно-плазмовими зносостійкими покриттями. Були випробувані пластини з твердого сплаву ВК6 та Т15К6 на операціях точіння та фрезерування, свердла та циліндричні фрези з швидкорізальної сталі Р6М5 на операціях свердління та фрезерування.

Таким чином, виконана мета і розв'язані всі задачі дисертаційної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иванов, И. Н., Кузнецова, Г. П., Имшенник, К. П., и др. Методы упрочнения режущего инструмента и рациональные области их применения. Москва: ВНИИТЭМР, 1988, 60 с.
2. Anders, A. Cathodic Arcs: New York: Springer, 2008, 542 p.
3. Mattox, D. M. The Foundations Of Vacuum Coating Technology. Cambridge, MA, USA: William Andrew, 2011, 361 p.
4. Кривобоков, В. П. Плазменные покрытия (свойства и применение): Томск: ТПУ, 2011, 137 с.
5. Фельдштейн, Е. Э., Корниевич, М. А. Режущий инструмент. Эксплуатация. Минск: Новое знание, 2012, 256 с.
6. Bunshah, R. F., Deshpandey, C. V. Plasma-assisted vapor deposition processes and some applications. Surface and Coatings Technology, 1986, No. 27, P.1-21.
7. Choy, K. L. Chemical Vapour Deposition (CVD): Advances, Technology and Applications. Florida: CRC Press, 2019, 398 p.
8. Inspektor, A., Salvador, P. A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications. A review. Surf. Coat. Technol. 2014. Vol. 257, P. 138–153.
9. Martin, W. P. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. New York: Elsevier, 2010, 912 p.
10. Tracton, A. A. Coatings Technology Handbook. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006, 828 p.
11. Matthews, A. Plasma Assisted PVD. The Past and Present. SVC Bulletin. Albuquerque, MN, USA: Society of Vacuum Coaters, 2013, P. 24–27.
12. Будилов, В. В., Киреев, Р. М., Шехтман, С. Р. Технология вакуумной ионно-плазменной установки. Москва: МАИ, 2007, 155 с.
13. Drosos, C., Vernardou, D. Perspectives of energy materials grown by APCVD. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2015, Vol. 140, P. 1–8.

14. Саклакова, О. Е., Иванова, О. В., Саклакова, А. Е., и др. Повышение эффективности технологических процессов производства деталей космических аппаратов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. №. 9, С. 27–28.
15. Rie, K. T., Gebauer, A., Wöhle, J. Plasma assisted CVD for low temperature coatings to improve the wear and corrosion resistance. Surface and Coatings Technology. 1996, Vol. 86–87, P. 498–506.
16. Deshpandey, C., Bunshan, R. F. The Activated Reactive Evaporation Process. Physics of thin films. 1987, Vol. 13, P. 59–107.
17. Johansen, O. A., Dontje, J. H., Zenner, R. L. D. Reactive arc vapor ion deposition of TiN, ZrN and HfN. Thin Solid Films. 1987, Vol. 153, No. 1–3, P. 75–82.
18. Gassner, M., Figueiredo, M. R., Schalk, N., et al. Energy consumption and material fluxes in hard coating deposition processes. Surf. Coat. Technol. 2016, No. 299, P. 49–55.
19. Baptista, A. F. S., Porteiro, J., et al. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings. A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. Coatings. 2018. Vol. 402, No. 8, P. 1–22.
20. Аксёнов, И. И., Белоус, В. А., Стрельницкий, В. Е., и др. Вакуумно-дуговое оборудование и технологии покрытий в ХФТИ. Вопросы атомной науки и техники. 2016, Т. 104, № 4, С. 58–71.
21. Аксенов, И. И. Об условиях синтеза нитридов при конденсации плазменных потоков. Физика и химия обработки материалов. 1981, №. 4, С. 43–46.
22. Аксенов, И. И., Брень, В. Г., Падалка, В. Г., и др. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы. ЖТФ. 1978, Т. 48, № 6, С. 1165–1169.

23. Аксенов, И. И., Андреев, А. А., Брень, В. Г., и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой). Украинский физический журнал. 1979, Т. 24, № 4, С. 515–525.

24. Брень, В. Г. Износостойкие нитридосодержащие покрытия на основе сплавов молибдена, полученные методом КИБ. Защита металлов. 1981, Т. 17, № 3, С. 284–289.

25. Морозов, А. И., Понков, Г. Б. Измерение энергетического спектра потока плазмы с помощью плазменной линзы. Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Тезисы докладов, Москва: Наука, 1982, С. 36–37.

26. Дороднов, А. М., Петросов, В. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств. ИФК ЖТФ. 1981, № 51, С. 504–524.

27. Васин, А. А., Дороднов, А. М., Петросов, В. А. О существовании вакуумной дуги с распределенным разрядом на расходуемом катоде. Письма в ЖТФ. 1979, Т. 5, № 24, С. 1499–1504.

28. Кузнецов, А. Н., Дороднов, А. М., Петросов, В. А. О новой форме вакуумной дуги в парах анода с нерасходуемым полым катодом. Письма в ЖТФ. 1979, Т. 5, № 16, С. 1001–1006.

29. Аксенов, И. И., Атруфьев, Ю. П., Брень, В. Г., и др. Влияние замагниченности электронов плазмы вакуумной дуги на кинетику реакций синтеза нитридосодержащих покрытий. Журнал технической физики. 1981, Т. 51, № 2, С. 303–309.

30. Береснев, В. М., Перлов, Д. Л., Федоренко, А. И. Экологически безопасные вакуумно-плазменные оборудование и технологии нанесения покрытий. Харьков: ХИСП, 2002. 300с.

31 Андреев, А. А., Булатова, Л. В., Булатов, А. С. Структура высокотвердых покрытий на основе молибдена, полученных при конденсации плазмы вакуумно-дугового разряда. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1981, № 5, С. 33–35.

32. Барвинюк, В. А., Шитарев, И. Л., Богданович, И. А. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины компрессора и камеры сгорания ГТД. *Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2009, Т. 19, № 3, С. 11-28.

33. Романов, А. А. Применение технологии КИНТ для упрочнения инструмента. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2002. № 12, С. 8–9.

34. Аксенов, И. И., Белоус, В. А. Высокопроизводительная вакуумно-дуговая установка для осаждения покрытий. *Вопросы атомной науки и техники*. 2008, Т. 92, № 2, С. 108–118.

35. Kirkopulo, K., Tonkonogyi, V., Stopakevych, O., et al. Design of a set of nonlinear control systems of the ARC PVD ion-plasma installation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, Vol. 2, No. 2, P. 65–74.

36. Тонконогий, В. М. Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покриттів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2004, Т. 28, №. 1, С. 141–145.

37. Marszałek, K., Małek, A., Winkowski, P., et.al. LabVIEW controller for storage results and control parameters of low thickness antireflection coatings deposition processes. *Elektronika*. 2016,. No. 2, P. 31–34.

38. Tanaram, T., Thungsuk, N., Apirat, H., et al. Preparation of ZnO thin film by development low-pressure high-frequency plasma chemical vapor deposition system. *International Journal of Materials Engineering*. 2016, Vol. 5, No. 6, P. 155–158.

39. Carter, D., Walde, H., McDonough, G., et al. Parameter Optimization in Pulsed DC Reactive Sputter Deposition of Aluminum Oxide. *Coaters. 45th Annual Technical Conference Proceedings of the Society of Vacuum Coaters*. 2002. P. 570-577
40. Danyluk, M., Dhingra, A. *Rolling Contact Fatigue in a Vacuum Test Equipment and Coating Analysis*. N.Y.: Springer, 2015, 167 p.
41. Yamauchi, S., Ishibashi, K., Hatakeyama, S. Low pressure chemical vapor deposition of TiO₂ layer in hydrogen-ambient. *Journal of Crystallization Process and Technology*. 2014, No. 4, P. 185–192.
42. Kostyuk, G. I. Automated system of technological support of the combined treatment based on ion implantation and ion alloying, plasma coating and laser modification. *Proceedings of International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum ISDEIV, IEEE*, 2008, P. 483 – 486.
43. Danyluk, M. Process optimization of ion plating nickel-copper-silver thin film deposition. *Processing of nanoparticle materials and nanostructured films*. 2010, No 223, P. 169–186.
44. Normey-Rico, J. E., Eduardo F. Camacho. *Control of Dead-time Processes*. London: Springer-Verlag, 2007, 474 p.
45. Visioli, A. *Practical PID control*. London: Springer, 2009, 310 p.
46. Åström, K. J., Hägglund, T. *Advanced PID control*. USA Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
47. Lewis, F. L. *Optimal control: The Control Systems Handbook. Control System Advanced Methods*. Boca Raton, FL, USA: CRC press, 2010, 1798 p.
48. Tobin, S. *Feedback Control Systems: DC Servos*. Boca Raton, FL, USA: CRC press, 2011, 201 p.
49. Hippe, P., Deutscher, J. *Optimal Control and Estimation: Design of Observer-based Compensators*. London: Springer-Verlag, 2009, 285 p.
50. Yanwen, H. Research of arc welding intellectual PID control. *Trans. of Nanya Inst. of Tech*. 2017, Vol. 96, P. 35–46.

51. Przybylski, J., Majcher, A. The structure and application of a test stand for a PVD technology research control system. *Problemy eksploatacji. Maintenance problems*. 2014, No. 2, P. 73–81.

52. Przybylski, J., Majcher, A., Neska, M. A Reconfigurable Control System for a PA-PVD Technology Test Stand. *Solid State Phenomena*. 2015, Vol. 220–221, P. 504–509.

53. Бодягин, А. Автоматизированная система управления работой установки ионно-плазменного напыления в вакууме МАП-2. *СТА*, 2009. № 3, С. 52–56.

54. Луценко, А. Н., Мубояджян, С. А., Будиновский, С. А. Промышленные технологические процессы ионной обработки поверхности. *Авиационные материалы и технологии*. 2005, № 1, С.30-40.

55. Brindley, J., Williams, T., Daniel, B., et. al. A novel sensor using remote plasma emission spectroscopy monitoring and control of vacuum processes. *Society of vacuum coaters. 59th Annual Technical Conference*. Indiana Convention Center, Indianapolis, IN, USA , 2016, P. H-2.

56. Дядюн, К. В., Чебукина, В. Ф. Процесс нанесения ионно-плазменных покрытий и системный подход к управлению процессом. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*. 2016, № 1, С. 7–10.

57. Смирнов, І. В., Долгов, М. А., Іванченко, О. В., та ін. Багатоканальна система автоматизації роботи установки вакуумно-дугового напилення. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013, Т. 61, № 1/5, С. 60–64.

58. Краснобаев, Е. А. Автоматизация производства. Витебск: УО ВГУ им. П. М. Машерова, 2012, 96 с.

59. Петроченков, А. Б., Даденков, Д. А. К вопросу классификации автоматизированных систем управления. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2009, № 3, С. 243–255.

60. Felser, M. *ProfiBus manual*. Berlin: ePublic GmbH, 2011, 227 p.

61. Денисенко, В. HART-протокол: общие сведения и принципы построения сетей на его основе. СТА. 2010, № 3, С. 94–101.
62. Pfeiffer, O., Ayre, A., Keydel, C. Embedded networking with CAN and CANopen. San Clemente, CA: RTC Books, 2008, 535 p.
63. Пупена, О. М., Ельперін, І. В., Луцька, Н. М., та ін. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навчальний посібник. Київ: Ліра, 2011, 552 с.
64. Шипов, О. В. Элементы систем автоматизации. Промышленные компьютеры: Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2015, 98 с.
65. Xiacong, F. Real time embedded systems: design principles and engineering practices. Waltham, MA, USA: Elseiver, 2015, 662 p.
66. Wehner, C. Tornado and VxWorks: What's not in the Manual. Berlin: GmbH Printing Service, 2004, 174 p.
67. Павлов, С. Основы Windows Embedded Standard 2009. Москва: Книга по требованию, 2010, 368 с.
68. Константинов, Ю. В., Некрутов, В. Г., Константинов, В. Д. Анализ современных SCADA-систем. Материалы 67 научной конференции ЮУрГУ. Секция технических наук, Челябинск: ЮУрГУ, 2015, С. 1734–1740.
69. Balter, A. Sams teach yourself Microsoft SQL Server 2005 Express in 24 hours. Indianapolis, IN, USA: SAMS, 2006, 436 p.
70. Yishan, L., Sathiamoorthy, M. A performance comparison of SQL and NoSQL databases. 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, Victoria, BC, Canada: IEEE, 2013, P. 15–19.
71. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: 2012, 768с.
72. Доусон, М. Програмируем на Python. Санкт-Петербург: Питер, 2019, 416 с.
73. Kyrkopulo, K., Tonkonogyi, V., Stopakevych, O., et al. Design of a set of nonlinear control systems of the Arc PVD ion-plasma installation. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2018, Vol. 2, No. 2, P. 65–74.

74. Киркопуло, Е. Г. Разработка системы автоматизации ионно-плазменной установки. Матеріали XVIII міжнар. науково - технічної конференції, 8-13 червня 2018 р., Одеса, 2018, С. 110–113.

75. Еремин, Е. Н., Сыздыкова, А. Ш., Юров, В. М. Структура и свойства ионно-плазменных покрытий, полученных при одновременном распылении катодов 12Х12Н10Т и Ti. Омский научный вестник. 2015, Т. 140, № 2, С. 26–30.

76. Лунев, В. И., Самойлов, В. П. Баланс энергий и тепловые эффекты при металлизации сверхтвердых материалов конденсацией плазмы. Сверхтвердые материалы. 1980, № 2, С. 7–12.

77. Тонконогий, В. М., Киркопуло, Е. Г. Прецизионное моделирование нагрева инструментов в процессе управления ионно-плазменной очисткой. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2019. Т. 11, № 2, С. 38–46.

78. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. Москва: Наука, 1975.

79. Левитан, Б. М., Саргсян, И. С. Операторы Штурма — Лиувилля и Дирака: Москва: Наука, 1988.

80. Зубов, В. И. Функции Бесселя. Москва: Московский физико-технический институт, 2007, 51 с.

81. Дьяконов, В. П. Simulink. Самоучитель. Москва: ДМК-Пресс, 2015, 782 с.

82. Silva, G., Datta, A., Bhattacharyya, S. P. PID controllers for time-delay systems. Boston: Birkhäuser, 2005, 330 p.

83. Баранов, О. О., Костюк, Г. И. Осаждение качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий. Вісник НТУ ХПІ. 2015, Т. 1149, № 40, С. 85–89.

84. Тонконогий, В.М. Оборский, Г. А. Работоспособность и надежность инструментов с износостойкими покрытиями. Труды Одесского политехнического университета. 1997, Т. 7, № 1, С. 130–133.

85. Костржицкий, А. И., Карпов, В. Ф., Кабанченко, М. П., и др. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. Москва: Машиностроение, 1991, 176 с.

86. Киркопуло, Е. Г. Разработка программно-технической структуры компьютерно-интегрированной системы управления установкой ионно-плазменного напыления. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2019. Т. 12, № 4, С. 38–46.

87. Bobzin, K., Brögelmann, T., Kruppe, N. C. Enhanced PVD Process Control by Online Substrate Temperature Measurement. Surface and Coatings Technology. 2018, Vol. 354, P. 383–389.

88. Теоретические основы теплотехники. Технический эксперимент/ ред. А. В. Клименко, В. М. Зорин. Москва: МЭИ, 2001, 584 с.

89. Лавро, В. Н. Разработка метода измерения температуры изделия на установках вакуумно-плазменного нанесения покрытий. Современные материалы, техника и технологии. 2017, Т. 14, № 6, С. 42–49.

90. Степаняк, М. М., Скальський, В. Р., Степаняк, М. В. Дослідження можливості підвищення точності вимірювання температури обертових об'єктів. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. 2010, № 686. С. 13–22.

91. Засименко, В. М., Гоц, Н. Є. Динамічна модель функції перетворення пірометричних перетворювачів для іонно-плазмових установок в умовах впливу промислових завод. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. 2001, № 420, С. 117–125.

92. IMPAC Infrared Thermometers: IP 140 Datasheet: URL: https://www.lumasenseinc.com/uploads/Products/Temperature_Measurement/Infrared_Thermometers/IMPAC_Pyrometers/Series_140/pdf/EN-IPE-140_Datasheet.pdf (останнє відвідування 12.08.2019).

93. Berge, J. Software for Automation: Architecture, Integration, and Security. North Carolina, U.S.A: International Society of Automation, 2005, 325 p.

94. Герасимов, А. В., Титовцев, А. С. Проектирование АСУТП с использованием SCADA-систем. Казань: КНИТУ, 2014, 128 с.
95. McCrady, S. Designing SCADA application software. London: Elseiver, 2013, 217 p.
96. Radvanovsky, R., Brodksy, A. Handbook of SCADA Control Systems. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016, 405 p.
97. Blokdyk, G. SCADA : a complete guide. Brisbane, Australia: Emereo Pty Limited, 2018, 304 p.
98. Boyer, S. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. North Carolina, U.S.A: International Society of Automation, 2010, 257 p.
99. Арабаджи, А. Ф., Стопакевич, А.А. Стопакевич, А. А. Разработка современного человеко-машинного интерфейса в АСУТП на основе международных стандартов. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2017, Т. 10, № 4, С. 37–46.
100. Стопакевич, А. О. Аналіз недоліків типової практики розробки комп'ютерних людино-машинних інтерфейсів промислових систем автоматизації: 72 науково-технічна конференція ОНАЗ ім. О.С. Попова, 13-15 вересня 2017. Одеса: ОНАЗ, 2017, С. 45–47.
101. Киркопуло, Е. Г. Разработка интерфейса оператора компьютерной системы автоматизации установки ионно-плазменного напыления. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2018, Т. 10, № 4, С. 54–61.
102. García, J. A., Martínez, R., Rico, M., et al. Decorative electric arc PVD coatings. Proceedings of 48th Annual Technical Conference of Society of Vacuum Coaters, April 23 - 28, 2005, P. 588–591.
103. CatArc 2500 PVD Coating System. Brochure. Van Etten, NY, USA: Vergason Technology Inc, 2018, 8 p.
104. Mazurkiewicz, A., Smolik, J. Development of Novel Nano-Structure Functional Coatings with the Use of the Original Hybrid Device. Materials Science Forum. 2011, Vol. 674, P. 1–9.

105. Wenjun, Y., Qiao, X. Application of temperature control system based on precision control of PLC and touch screen. Issues on Modern Machines Mechanics: Proceedings of the VII International Scientific Conference. V. 2., Ulan-Ude, 2018, P. 25–28.

106. The 2016 International Manufacturing Technology Show (IMTS) at McCormick Place in Chicago. Brochure. Chicago, IL, USA: The Association For Manufacturing Technology, 2016, 15 p.

107. Cczk Vacuum Physical Vapor Deposition Thin Film Coating System Equipment. Wenzhou, China: Cicel Vacuum Machine Co CCZK, 2018, 6 p.

108. Автоматизированная система управления вакуумной установкой ионно-плазменного азотирования ИМПЛАЗ 1000. Дзержинск, Нижегородская обл.: НПЦ «Скада», 2018, 8 с.

109. Сердюк, С. М. Ергономічні питання проектування людино-машинних систем. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014, 333 с.

110. Hollifield, B., Oliver, D., Nimho, I., et al. The high performance HMI handbook. Kalamazoo, USA: DigitalBooks, 2008, 206 p.

111. Ben, S., Catherine, P., Maxine, C., et al. Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited, 2018, 624 p.

112. Abnormal situation management—effective automation to improve operator performance. Philadelphia: Honeywell, 2007.

113. Анохин, А. Н., Черняев, А. Н. Функциональное проектирование многослойного адаптивного интерфейса для операторов сложных технологических систем. Автоматизация в промышленности. 2018, № 6. С. 51–56.

114. Анохин, А. Н., Назаренко, Н. А. Проектирование интерфейсов. Биотехносфера. 2010. Т. 8, № 2, С. 21–27.

115. Endsley, M. Designing for situation awareness: an approach for user-centered design: Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011, 396 p.

116. Кремень, Ю., Расолько, Г. Теория и практика программирования на языке Pascal. Минск: Вышэйшая школа, 2015, 447 с.

117. Smith, S. Matlab: Advanced GUI Development. Indianapolis, IN, USA: Dog Ear Publishing, 2006, 307 p.

ДОДАТОК А

ДІАГНОСТИКА СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ТА НАЛАШТУВАННЯ OPC-CЕРВЕРУ

При з'єднаній мережі Modbus діагностика складається з двох завдань: визначення працездатності всіх пристроїв в мережі і визначення працездатності мережі при заданій швидкості обміну (навантажувальне тестування).

Для визначення працездатності всіх пристроїв та відповідності їх поведінки, що вказана в документації, необхідно використовувати діагностичні утиліти, які дозволяють сформувати потрібний запит до пристрою та проаналізувати результат. Modbus-пристрої можуть мати певні налаштування інтерфейсу, такі як кількість біт даних, парність, кількість стоп-бітів. Пристрої з різними налаштуваннями не зможуть працювати в одній мережі, іноді це можливо виправити за допомогою налаштувань майстра, іноді – ні, тоді потрібно використовувати додаткові перетворюючі інтерфейси.

Серед відомих комерційних утиліт відомі такі утиліти як Modbus Poll та Modscan, однак безкоштовна утиліта QModBus майже відповідає за функціональними властивостями вказаним утилітам, тому для прикладу розглянемо саме її. Вкажімо наступний запит:

- Порт – COM2, швидкість – 19200, бітів даних – 8, стопових бітів – 1.
- Ідентифікатор slave – 16.
- Код запиту – Read Holding Register (0x3).
- Стартова адреса – 3, кількість значень – 2.

Як бачимо, на рис. А.1, дані були отримані.

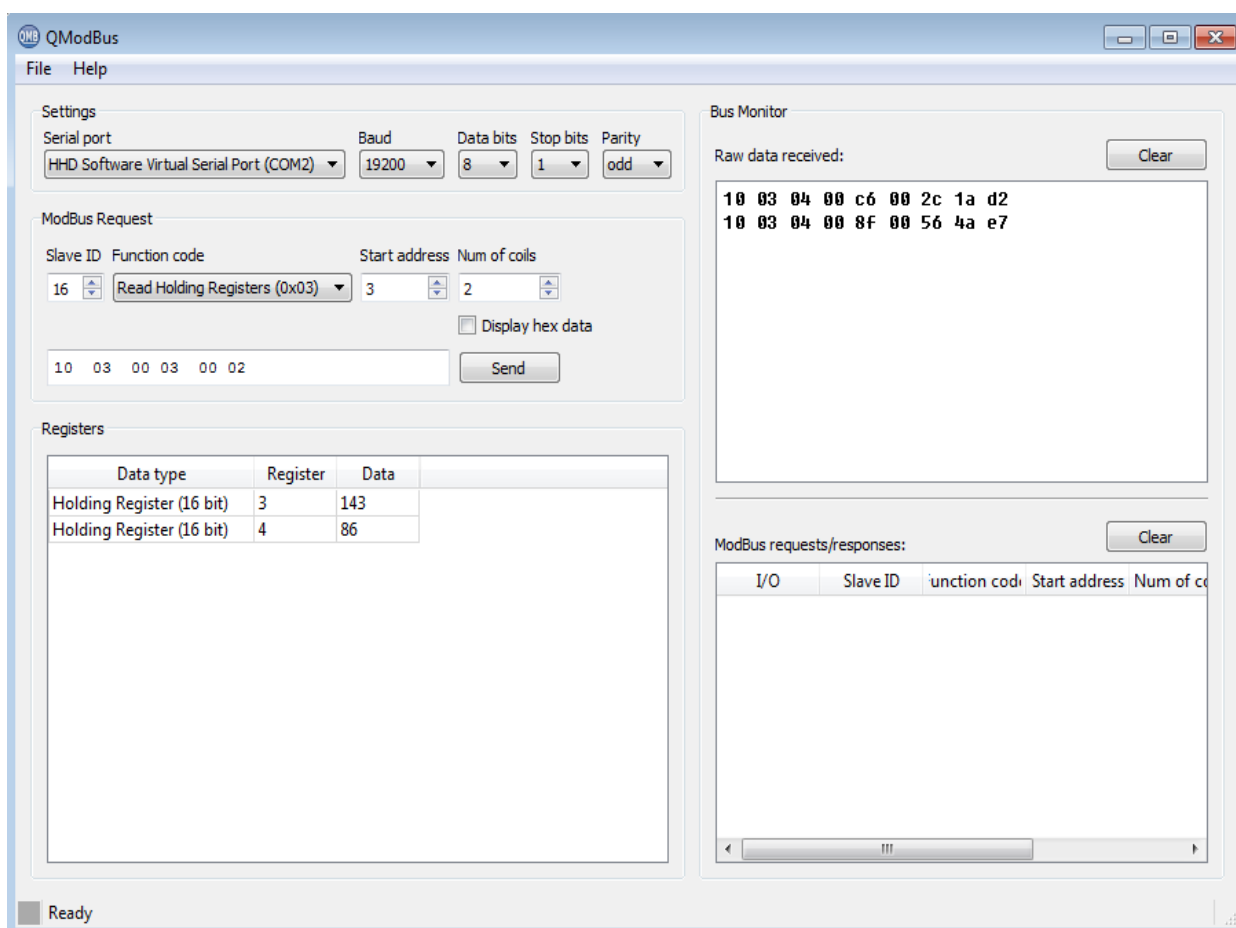


Рисунок А.1 – Результат запиту в програмі QModBus

Пристрій з адресою 16 має два регістри – 3 і 4 типу int16. Виконаємо підключення цих регістрів до OPC-серверу MasterOPC. Два регістри типу int16 складають один показ типу float, оскільки modbus регістри не підтримують дійсні числа.

Виконаємо налаштування проекту в MasterOPC для підключення температурного давача, що має адресу 16 в мережі Modbus та зберігає дійсне значення в двох holding регістрах – 3 та 4. Пристрій працює зі швидкістю 19200 бод. Одиниця вимірювання давача – Кельвіни.

1. Створимо вузол – Vulat. Вказати налаштування: порт, швидкість - 19200, дані – 8, стоп біти – 1.
2. Додамо пристрій Temperature. Параметри: адреса – 16, період опитування – 100 мс.
3. Додамо регістр: TemperatureK.

4. Вкажемо налаштування для регістру: адреса – 3, тип даних в пристрої – float, використовувати перестановку байтів в значенні.

Запущена програма OPC-серверу MasterOPC з вказаними налаштуваннями показана на рис. А.2.

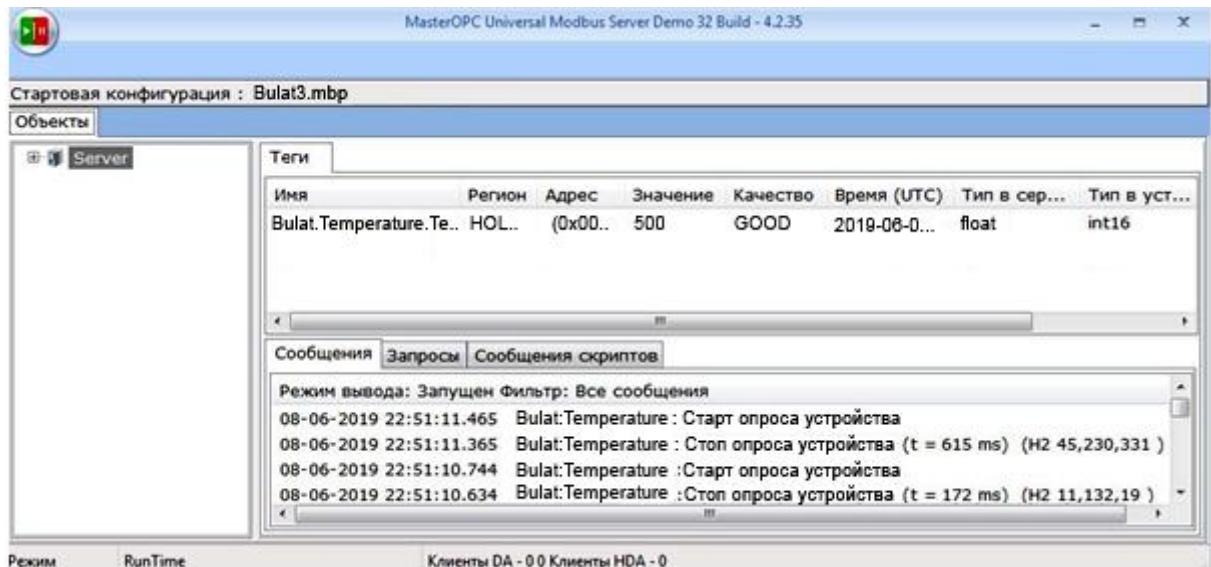


Рисунок А.2 – Налаштування OPC-сервер MasterOPC

Маючи з'єднання за протоколом OPC можливо використати SCADA.

ДОДАТОК Б

ФОРМУВАННЯ СЕРВЕРУ БАЗ ДАНИХ

Для розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизації в якості СУБД використаємо спрощену версію Microsoft SQL Server, яка має назву LocalDB. Дана версія є одним із варіантів SQL Server Express, що призначена для розробників програмних рішень, в яких використовується лише одна база даних, однак взаємодіє з нею декілька клієнтів. На відміну від всіх інших рішень сервер працює як звичайна програма, а не сервіс, тому сервер баз даних активний тільки коли з ним взаємодіє стороннє ПЗ. В випадку якщо необхідна інтеграція з MES чи присутні підвищені вимоги до цілісності даних, то доцільно використати сервісну версію SQL Server Express. Основне технічне обмеження SQL Server Express – 10 Гб на базу даних дозволяє використовувати сервер для вказаної задачі без очищення старих даних багато років. Всі можливості мови T-SQL збережені.

Після інсталяції LocalDB необхідно створити екземпляр (Instance), під яким розуміється окреме незалежне середовище, що групує бази даних, які призначені для певної задачі чи конкретного користувача. Кожний екземпляр виконується як окрема програма, в той час як в класичній версії екземпляром є набір окремих запущених служб. Для створення екземпляру в командному рядку виконаємо:

```
>sqllocaldb create "Bulat"  
Екземпляр LocalDB "Bulat" создан с помощью версии 11.0.
```

Тепер підключимось до створеного екземпляру і отримаємо версію серверу, що виконується:

```
>sqlcmd -S "(localdb)\Bulat"  
1> SELECT @@VERSION  
2> GO
```

Microsoft SQL Server 2012 - 11.0.2100.60 (X64)

```
Feb 10 2012 19:39:15
Copyright (c) Microsoft Corporation
Express Edition (64-bit) on Windows NT 6.1
<X64> (Build 7601: Service Pack 1)
```

Створюємо базу даних в екземплярі

```
1> CREATE DATABASE BulatControlDB;
2> GO
```

Тепер можливо проводити операції за допомогою серверу баз даних. Виконувати операції в командному рядку не дуже зручно, тому для виконання операцій з БД краще використовувати програму Microsoft SQL Server Management Studio. Підключимось до створеної бази даних екземпляру та виконаємо T-SQL код (рис. Б.1).

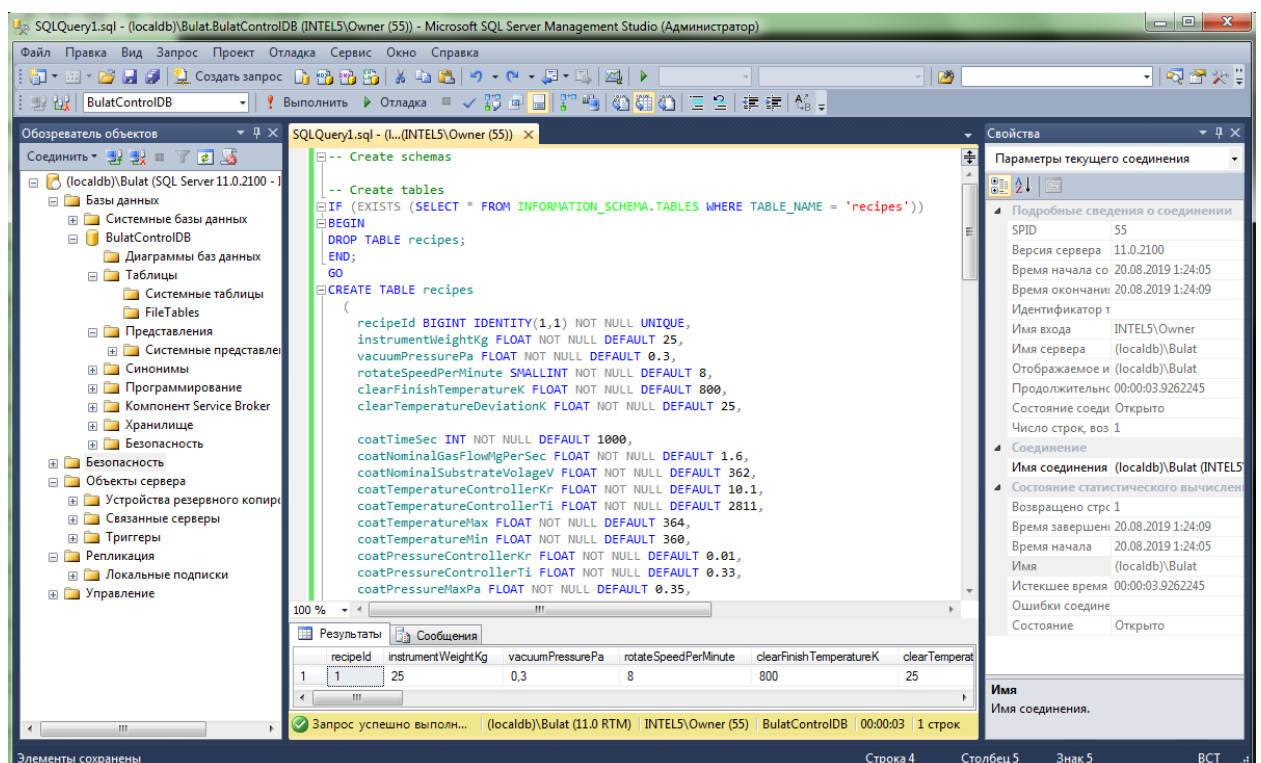


Рисунок Б.1 – Виконання T-SQL коду в середовищі
SQL Server Management Studio

В результаті виконання коду створюється таблиця рецептів та записується в неї один рецепт для обробки інструменту циліндричної форми

зі швидкорізальної сталі Р6М5. Результат вибірки записів таблиці показує, що дані додані успішно. Діаграма доданої таблиці показана на рис. Б.2.

Имя столбца	Тип данных	Разрешить ...
recipeId	bigint	☐
instrumentWeightKg	float	☐
vacuumPressurePa	float	☐
rotateSpeedPerMinute	smallint	☐
clearFinishTemperatureK	float	☐
clearTemperatureDeviati...	float	☐
coatTimeSec	int	☐
coatNominalGasFlowMg...	float	☐
coatNominalSubstrateV...	float	☐
coatTemperatureControl...	float	☐
coatTemperatureControl...	float	☐
coatTemperatureMax	float	☐
coatTemperatureMin	float	☐
coatPressureControllerKr	float	☐
coatPressureControllerTi	float	☐
coatPressureMaxPa	float	☐
coatPressureMinPa	float	☐
coolTimeSec	int	☐
coolFinishTemperatureK	float	☐
coolTemperatureControl...	float	☐
coolTemperatureControl...	float	☐
coolTemperatureSpeedK...	float	☐
coolTemperatureDeviati...	float	☐
gripEquation	varchar(255)	☐
thicknessEquation	varchar(255)	☐
mchardnEquation	varchar(255)	☐
lifeEquation	varchar(255)	☐
title	varchar(255)	☐
descr_text	varchar(1024)	☐

Рисунок Б.2 – Діаграма таблиці recipes

T-SQL код для створення бази даних рецептів і заповнення її одним записом наведено нижче:

```
-- Видалення таблиці рецептів, якщо вона є
IF (EXISTS (SELECT * FROM INFORMATION_SCHEMA.TABLES
WHERE TABLE_NAME = 'recipes'))
BEGIN
DROP TABLE recipes;
END;
GO
-- Створення таблиці рецептів
CREATE TABLE recipes
(
    recipeId BIGINT IDENTITY(1,1) NOT NULL UNIQUE,
    instrumentWeightKg FLOAT NOT NULL DEFAULT 25,
    vacuumPressurePa FLOAT NOT NULL DEFAULT 0.3,
    rotateSpeedPerMinute SMALLINT NOT NULL DEFAULT 8,
```

```

        clearFinishTemperatureK FLOAT NOT NULL DEFAULT 800,
        clearTemperatureDeviationK FLOAT NOT NULL
DEFAULT 25,
        coatTimeSec INT NOT NULL DEFAULT 1000,
        coatNominalGasFlowMgPerSec FLOAT NOT NULL
DEFAULT 1.6,
        coatNominalSubstrateVolageV FLOAT NOT NULL
DEFAULT 362,
        coatTemperatureControllerKr FLOAT NOT NULL
DEFAULT 10.1,
        coatTemperatureControllerTi FLOAT NOT NULL
DEFAULT 2811,
        coatTemperatureMax FLOAT NOT NULL DEFAULT 364,
        coatTemperatureMin FLOAT NOT NULL DEFAULT 360,
        coatPressureControllerKr FLOAT NOT NULL
DEFAULT 0.01,
        coatPressureControllerTi FLOAT NOT NULL
DEFAULT 0.33,
        coatPressureMaxPa FLOAT NOT NULL DEFAULT 0.35,
        coatPressureMinPa FLOAT NOT NULL DEFAULT 0.25,

        coolTimeSec INT NOT NULL DEFAULT 1800,
        coolFinishTemperatureK FLOAT NOT NULL DEFAULT 500,
        coolTemperatureControllerKr FLOAT NOT NULL
DEFAULT -11.34,
        coolTemperatureControllerTi FLOAT NOT NULL
DEFAULT 10000,
        coolTempeatureSpeedKPerSec FLOAT NOT NULL
DEFAULT 0.4,
        coolTemperatureDeviation FLOAT NOT NULL DEFAULT 2,

        gripEquation VARCHAR(255) NOT NULL DEFAULT '',
        thicknessEquation VARCHAR(255) NOT NULL DEFAULT '',
        mchardnEquation VARCHAR(255) NOT NULL DEFAULT '',
        lifeEquation VARCHAR(255) DEFAULT '',
        title VARCHAR(255) NOT NULL DEFAULT 'Без назви',
        descr_text VARCHAR(1024) NOT NULL
DEFAULT 'Опис рецепту відсутній',
        PRIMARY KEY(recipeId)
    );
GO

-- Створення індексів
CREATE INDEX recipeId ON recipes (recipeId);
GO

```

```
-- Внесення запису (рецепту)
INSERT INTO recipes (instrumentWeightKg,
vacuumPressurePa, rotateSpeedPerMinute,
clearFinishTemperatureK, clearTemperatureDeviationK,
coatTimeSec, coatNominalGasFlowMgPerSec,
coatNominalSubstrateVoltageV, coatTemperatureControllerKr,
coatTemperatureControllerTi, coatTemperatureMax,
coatTemperatureMin, coatPressureControllerKr,
coatPressureControllerTi, coatPressureMaxPa,
coatPressureMinPa, coolTimeSec, coolFinishTemperatureK,
coolTemperatureControllerKr,
coolTemperatureControllerTi, coolTemperatureSpeedKPerSec,
coolTemperatureDeviation, gripEquation,
thicknessEquation, mchardnEquation, lifeEquation,
title, descr_text)
VALUES
(25, 0.3, 8, 800, 25, 1000, 1.6, 362, 10.1, 2811, 364, 360,
0.01, 0.33, 0.35, 0.25, 1800, 500, -11.34, 10000, 0.4,
2, '32-(1e4*(800-728)*(1+0.08*p))^2)',
'1.111e-9*ctime*(7.2*exp(0.32*p))',
'4.3e-5-(1e5*3.1e-3*(ctime-786))^2)*(2-exp(0.19*p))',
'0.12*grip*1e-6+1.31*mchardn+4.84*thickness',
'12X18H10T (висока якість)',
'Рецепт для виробництва високоякісних різців
12X18H10T');
GO
SELECT * from recipes;
```

База даних передбачає таблицю користувачів з правами, яка може бути створена засобами SCADA. Також стандартними засобами SCADA можливо створити таблиці для архівації показів трендів за певний проміжок часу. В програмному забезпеченні SCADA необхідно реалізувати програмний код для запису в базу даних окремих таблиць, що містять інформацію про кожен цикл виконання. Саме ці таблиці зручні для побудови звітів стандартними засобами SCADA чи спеціально розробленого для цього програмного забезпечення.

ДОДАТОК В

РЕАЛІЗАЦІЯ ПОКАЗУ ТЕМПЕРАТУРИ В SIMPLE SCADA

Розглянемо задачу демонстрації температури на мнемосхемі при виконанні процесу покриття. Поточне значення температури має отримуватись з OPC-серверу. Ім'я параметру – Bulat.sensors.TemperatureK.

Постановка задачі наступна.

1. Кожну секунду отримувати значення температури з OPC серверу.
2. Перевірити його на відповідність поточному регламенту.
3. У випадку, якщо демонстрацію не здійснено, значення необхідно приховати та створити відповідне повідомлення, яке оператор має підтвердити.
4. У випадку, якщо демонстрацію здійснено та значення температури знаходиться в межах регламенту, необхідно його відобразити на мнемосхемі у вигляді тексту. Місце знімання та колір тексту демонстрації має бути синім. У разі, якщо раніше демонстрація вийшла за регламентовані межі і в останню секунду пройшло повернення до них, потрібно створити відповідне повідомлення, яке оператор має підтвердити.
5. У випадку, якщо демонстрацію отримано і він в межах передаварійних значень, необхідно його відобразити на мнемосхемі в вигляді тексту. Місце знімання та колір тексту демонстрації має бути жовтим. Також необхідно створити відповідне повідомлення, яке оператор має підтвердити.
6. У разі, якщо демонстрацію отримано і її значення в межах аварійних, необхідно її відобразити на мнемосхемі у вигляді тексту. Місце знімання та колір тексту демонстрації має бути червоним. Також необхідно створити відповідне повідомлення, яке оператор має підтвердити.
7. Для того, щоб не було постійного переходу, наприклад, з регламентного значення до передаварійного і навпаки по причині похибки датчика, передбачити зону нечутливості.

Для реалізації відповідного ПЗ для розв'язку поставленої задачі необхідно використати п'ять програм з пакету Simple SCADA.

1. Options – це програма, що налаштовує параметри всіх наступних програм. В діалогах програми можливо обрати мову, параметри та рендер (двигун) відорежиму, параметри автозапуску та автоматичного підключення до проекту, включення віртуальної клавіатури (для застосування в панельному режимі), параметри авторизації, безпеки, архівування, звітів, тощо.

2. Server – це програма, що виконує проект в реальному часі та забезпечує підключення до неї клієнтів. При зміні проекту його необхідно в цій програмі перезавантажувати вручну (чи увімкнути функцію автоматичної деактивації проекту, якщо клієнтів немає в програмі Options).

3. Client – це програма, що дозволяє підключатись до серверу і виконувати програмне забезпечення, яке призначене для клієнтської частини. Клієнт SCADA виконується в відеорежимі.

4. Picture Editor – програма для налаштування бібліотеки зображень та створення анімацій для мнемосхем з раскадрованих файлів.

5. Editor – це редактор проектів. Як і клієнт, виконується в відеорежимі. Має просунутий інтерфейс користувача та зручні засоби програмування мовою Free Pascal.

Запустимо програму Editor та створимо в ній новий проект. Розробку екранних форм будемо проводити для недорогого промислового комп'ютера з сенсорним екраном без клавіатури з 15 дюймовим монітором, що має монтуватись біля установки. Оберемо оптимальні параметри монітору. Розширення – 4:3, 1024x768. Інтерфейс розробляється відповідно до рекомендацій ISA 101, налаштуємо схему кольорів: світло-сірий (13%).

Далі налаштуємо підключення до OPC-серверу. Для цього виберемо з переліку InSAT.ModbusOPCServer.DA. Час очікування при втраті сигналу встановимо в 10 секунд.

Встановимо частоту опитування за замовчуванням рівною 1 секунді. Цей інтервал достатній для керування інерційними процесами, що тривають від 15 до 30 хвилин, а часом і більше.

Web-доступ включимо в режимі перегляду, оскільки віддалене керування технологічною установкою недоцільно.

Наступний крок – підключення до серверу баз даних. Simple SCADA підтримує з'єднання до двох серверів баз даних: MySQL і SQL Server. Підключення до SQL серверу може бути реалізовано за допомогою наступних провайдерів: SQL Native Client, передумовлений з Windows, SQL Native Client, SQL Compact Edition. Для підключення необхідно налаштувати проект відповідно до рис. В.1.

The screenshot shows a configuration window for connecting to a database. It has a dark background with light-colored text and input fields. The fields are arranged in a grid-like fashion. At the bottom, there are two buttons: 'ПЕРЕВІРИТИ' (Check) and a trash icon.

Field Label	Value
СУБД:	SQL Server
Провайдер:	SQL Native Client
Ім'я бази даних:	bulatDB
Хост:	(localdb)\Bulat
Порт:	1433
Ім'я користувача:	sa
Пароль:	*****

Additional options: ☒ Аутентифікація Windows

Рисунок В.1 – Налаштування підключення до серверу баз даних в проекті Simple SCADA

Після підключення до серверу баз даних можливо налаштувати параметри зберігання в базі даних трендів і повідомлень, а також параметри авторизації. В відповідності з налаштуванням параметрів часу і структури SCADA створює в базі даних таблиці оптимальної для налаштувань структури і записує в них з вказаним періодом дані.

Для початку необхідно створити перелік параметризованих змінних (тегів). В Simple SCADA присутні два типи змінних (TM_VARIABLE): внутрішні і зовнішні. Для виконання поставленої задачі необхідний наступний перелік змінних, що наведено в таблиці В.1. Деяким змінним, що

пов'язані з засобами автоматизації, необхідно додати шкали, значення яких також приведені в таблиці.

Таблиця В.1 – Перелік тегів проекту Simple SCADA

Змінна	Опис	Тип даних	Шкала	Архівація
TemperatureK	Значення поточної температури в К, отримане з OPC серверу	Зовнішня Double	ScaleTemperatureK (0-1273 K)	за часом
TemperatureC	Перераховане значення TemperatureK в °C	Внутрішня Double	ScaleTemperatureC (0-1000 °C)	–
CurrentProcessTime	Час виконання поточного процесу в секундах	Внутрішня Int64		–
CurrentProcessWorking	Процес виконується?	Внутрішня Boolean		–
TemperatureState	Стан показу температури (1-не має сигналу, 2 – сигнал в межах регламенту, 3 – передаварійний, 4 – аварійний)	Внутрішня Int		–
TemperatureNominalK	Значення бажаного значення температури в К, в 1 и 3 етапах змінюється динамічно	Внутрішня Double		за часом
ProjectWorkingTime	Час виконання поточного процесу в секундах	Внутрішня Int64		–

Зовнішній вигляд режиму редагування мнемосхеми програми з вже розробленим проектом показано на рис В.2.

На вкладці за замовчуванням змінимо назву і додаємо ще три вкладки. Таким чином, в проєкті має стати 4 вкладки: Вибір рецепта, Проведення процесу, Корекція параметрів рецепту, Діагностика системи.

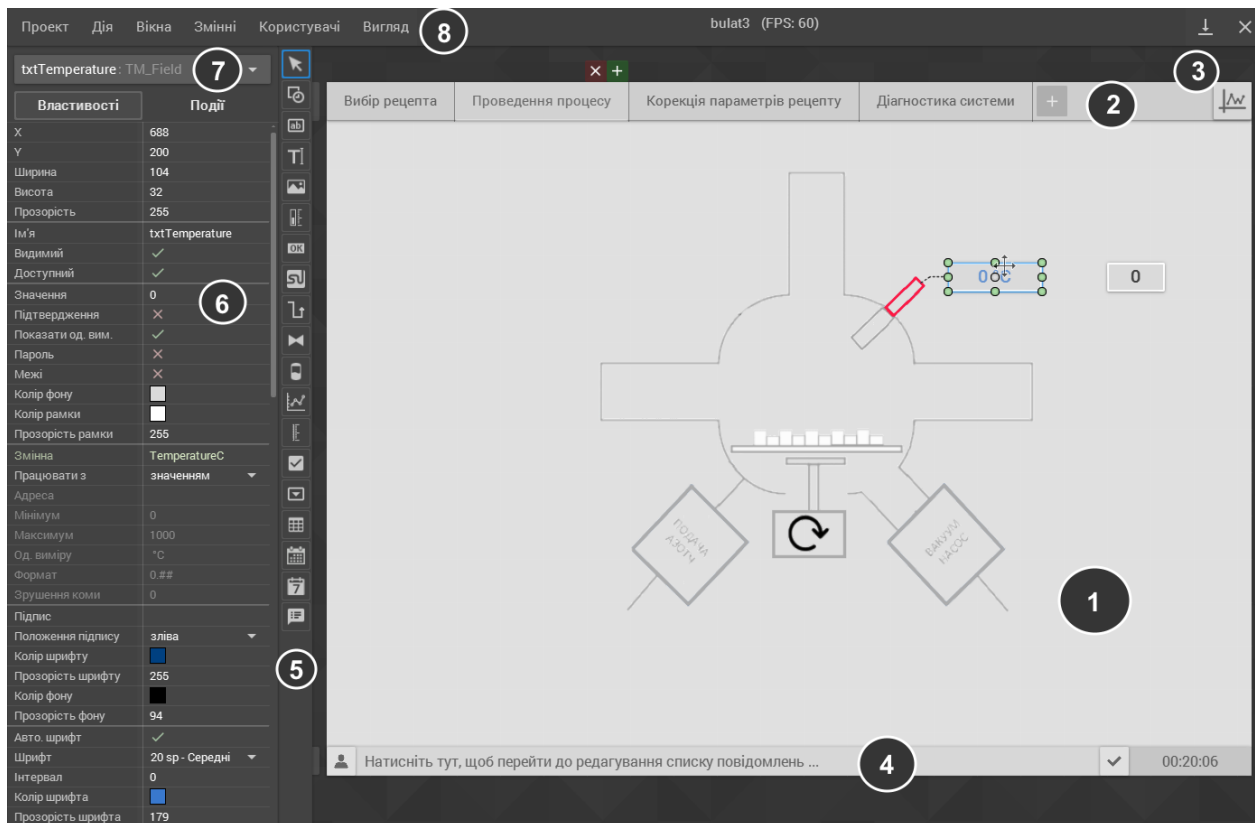


Рисунок В.2 – Головне вікно редактора Simple SCADA: 1 – мнемосхема, 2 – вкладки, 3 – налаштування трендів, 4 – повідомлення, 5 – панель інструментів, 6 – налаштування поточного елемента, 7 – вибір елемента для налаштування, 8 – меню програми.

Переключимось до вкладки Проведення процесу. Основним елементом цієї вкладки в відповідності до рис. 4.4 – 4.7 є мнемосхема, на якій розміщуються текстові індикатори, кнопки, елементи кольорової сигналізації. Тому першим кроком необхідно розробити мнемосхему з прозорим фоном в форматі PNG і зберегти зображення в папці pictures Simple SCADA.

Мнемосхема представляє собою статичний елемент, який буде розміщено в якості фонового елементу. Зовнішній вигляд розробленого зображення показано на рис. В.3.

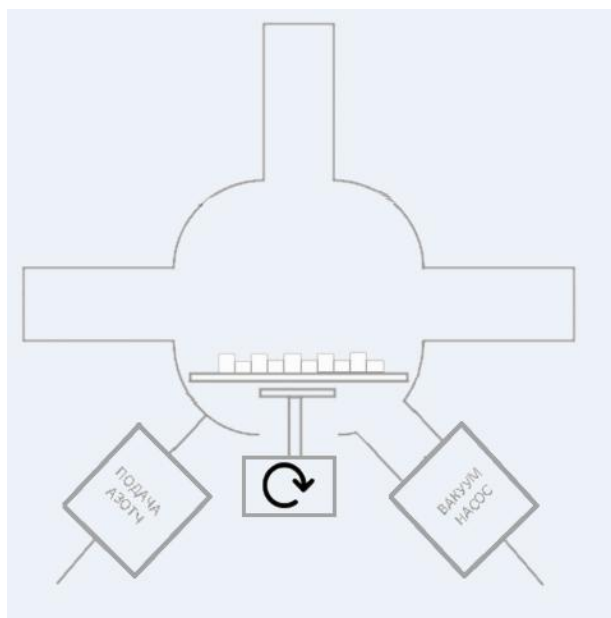


Рисунок В.3 – Зображення фонові мнемосхеми

На мнемосхему за допомогою елементу TM_IMAGE зображення рис. В.3 необхідно додати і встановити пріоритет 1.

Стандартними засобами Simple SCADA неможливо створювати програмовані лінії, що розміщені під кутом, тому необхідно розробити зображення для реалізації функції зміни кольорів елементів мнемосхеми.

Отже, необхідно розробити кадрове зображення з підключенням термометра, що відображає 4 стани: немає сигналу, сигнал в межах регламенту, сигнал відповідає передаварійному стану, сигнал відповідає аварійному стану. В Simple SCADA кадрове зображення необхідно зберегти в папку pictures та налаштувати за допомогою програми Picture Editor. Після того, як вказано скільки кадрів по ширині та висоті в певному зображенні, воно додається до переліку зображень з можливістю вибору номера кадру.

Результат налаштування зображення в програмі Picture Editor показано на рис. В.4.

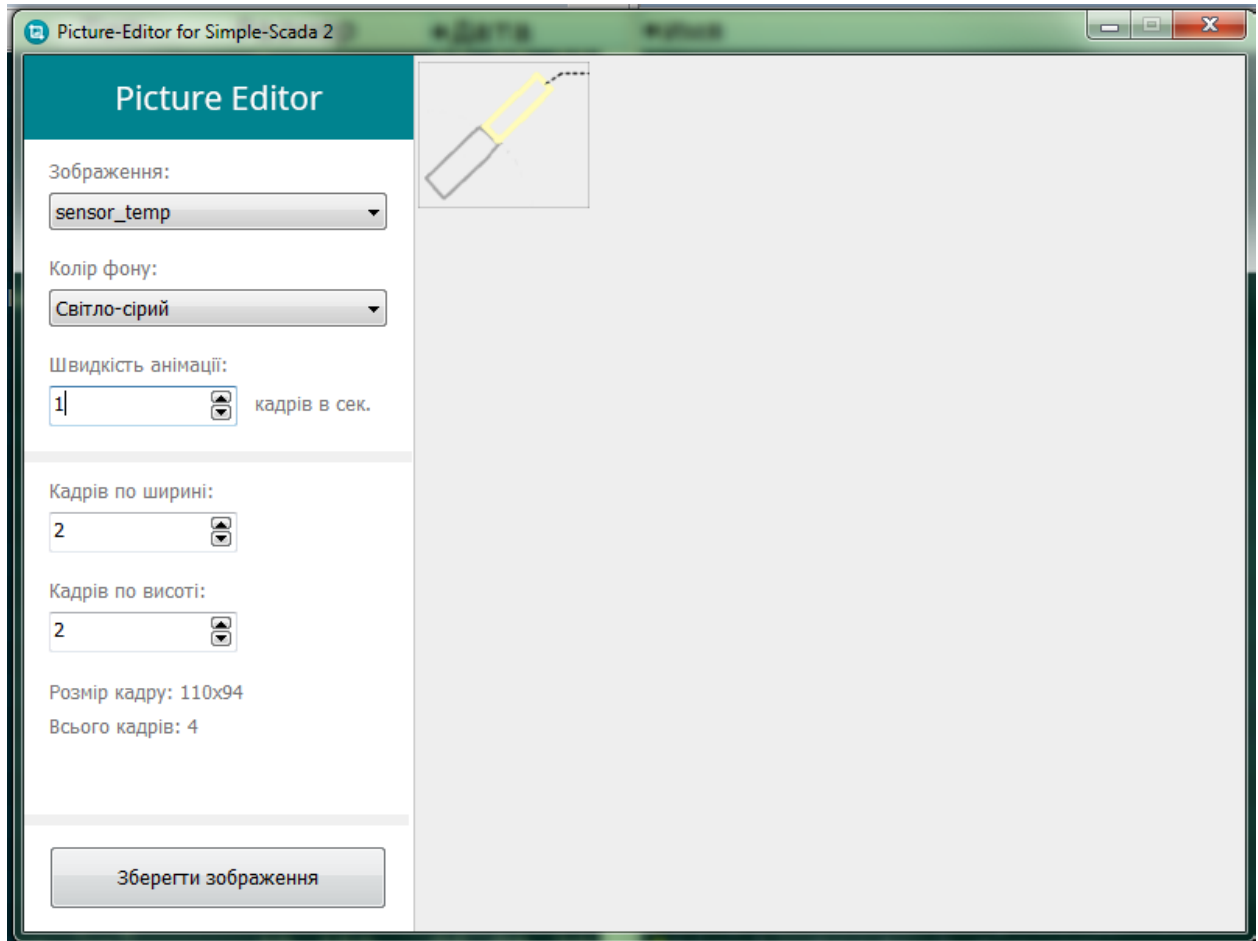


Рисунок В.4 – Налаштоване зображення в Picture Editor

Далі, необхідно додати два текстових поля (TM_FIELD) та зображення (TM_IMAGE). Перше текстове поле необхідно назвати txtTemperature та зв'язати зі змінною TemperatureC. Друге, необхідне для відлагодження, необхідно назвати txtError та розмістити правіше першого. Зображення слід назвати imgTemperature та зв'язати з файлом, що було розкадровано.

В завершення, перейдемо до програмної реалізації. В Simple SCADA скрипти пишуться мовою Free Pascal. Технічно вони компілюються стандартним компілятором цієї мови в виконавчі файли, однак функціональні можливості мови в порівнянні зі стандартною реалізацією обмежені (тому ми

назвали їх не програмами, а скриптами). Взаємодія в скриптах можлива тільки з елементами графічного інтерфейсу проекту SCADA, файловою системою. Інший функціонал (в т.ч. робота з базами даних) в різних редакціях обмежується.

Скрипти в Simple SCADA виконуються за подіями. Ми будемо використовувати скрипти з двома подіями: проект запущено та пройшла 1 секунда.

Програмний код скрипта ініціалізації InitVariable, що виконується при запуску проекту, наступний.

```
const
  STATE_NOSIGNAL = 1;
  STATE_NORMAL   = 2;
  STATE_WARNING  = 3;
  STATE_ALARM    = 4;
var
  blueColor: Cardinal;
begin
  blueColor := RGB(57,120,205);

  CurrentProcessWorking.Value := True;
  CurrentProcessTime.Value := 0;
  ProjectWorkingTime.Value := 0;
  TemperatureState.Value := STATE_NORMAL;
  TemperatureNominalK.Value := 800;
  imgTemperature.Frame := 2;
  txtTemperature.FontColor := blueColor;
end.
```

Програмний код скрипта оновлення параметрів RefreshParameters, що виконується кожну секунду, наступний.

```
const
  STATE_NOSIGNAL = 1;
  STATE_NORMAL   = 2;
  STATE_WARNING  = 3;
```

```

STATE_ALARM      = 4;

procedure indicateParam (img:TM_IMAGE; fld:TM_FIELD;
stateVar:TM_VARIABLE; curVariable:TM_VARIABLE;
nominalValue:Real;
alarmErrorValue:Real; warningErrorValue:Real;
deadZoneValue:Real; parameterNameInMessage:String);
var
    state_before:Integer;
    state_after:Integer;
    redColor, yellowColor, blueColor: Cardinal;
    warningValue, alarmValue: Real;
    strCompare:String;
    errorValue:Real;
begin

    blueColor := RGB(57,120,205);
    yellowColor := RGB(255, 251, 186);
    redColor := RGB (225,25, 67);

    errorValue := curVariable.Value - nominalValue;
    txtError.Text := FloatToStr(errorValue);
    state_before:=stateVar.Value;
    if curVariable.IsGoodQuality then begin

        if alarmErrorValue<=Abs(errorValue) then begin
            stateVar.Value:=STATE_ALARM;
        end
        else begin
            if Abs(errorValue) < (alarmErrorValue-deadZoneValue)
then begin
                if
Abs(errorValue)>(warningErrorValue+deadZoneValue) then
begin
                    stateVar.Value:=STATE_WARNING;
                end
                else begin
                    stateVar.Value:=STATE_NORMAL;
                end
            end;
        end;
    end;
    state_after := stateVar.Value;

```

```

if state_after <> state_before then begin
    fld.Visible := True;
    //font color
    if stateVar.Value=STATE_NOSIGNAL then begin
        AddMessage (Now, mkWarning, 'Показ сигналу
параметра ' + parameterNameInMessage + ' не отримано',
True, True);
        img.Frame := 1;
        fld.Visible := False;
    end;
    if stateVar.Value=STATE_NORMAL then begin
        AddMessage (Now, mkWarning, 'Показ сигналу
параметра ' + parameterNameInMessage + ' відновлено',
True, True);
        img.Frame := 2;
        fld.FontColor := blueColor;
    end;
    if errorValue > 0 then begin
        strCompare := 'вище';
        warningValue := nominalValue + WarningErrorValue;
        alarmValue := nominalValue + AlarmErrorValue;
    end
    else begin
        strCompare := 'нище';
        warningValue := nominalValue - WarningErrorValue;
        alarmValue := nominalValue - AlarmErrorValue;
    end;
    if stateVar.Value=STATE_WARNING then begin
        AddMessage (Now, mkWarning,
parameterNameInMessage + ' ' + curVariable.Value + ' ' +
curVariable.Units +
        ' ' + strCompare + ' дозволеної ' +
FloatToStr(warningValue) + ' ' + curVariable.Units +
        ' (на ' + CurrentProcessTime.Value + ' с
процесу)', True, True);
        img.Frame := 3;
        fld.FontColor := yellowColor;
    end;
    if stateVar.Value=STATE_ALARM then begin
        AddMessage (Now, mkAlarm, parameterNameInMessage
+ ' ' + curVariable.Value + ' ' + curVariable.Units +
        ' ' + strCompare + ' аварійної ' +
FloatToStr(alarmValue) + ' ' + curVariable.Units +

```

```

        ' (на ' + CurrentProcessTime.Value + ' с
процесу)', True, True);
        img.Frame := 4;
        fld.FontColor := redColor;
    end;
end
end
else
    if state_before <> STATE_NOSIGNAL then begin
        stateVar.Value := STATE_NOSIGNAL;
    end;
end;
begin
    ProjectWorkingTime.Value := ProjectWorkingTime.Value +
1;
    if CurrentProcessWorking.Value = True then begin
        CurrentProcessTime.Value := CurrentProcessTime.Value
+ 1;
    end;
    if ProjectWorkingTime.Value > 3 then begin //на перших
двох секундах виконання проекту значення можуть бути
нульовими
        TemperatureC.Value := TemperatureK.Value - 273.15;
        indicateParam (imgTemperature, txtTemperature,
TemperatureState, TemperatureC,
TemperatureNominalK.Value-273.15, 15, 7, 2,
'Температура');
    end;
end.

```

Основною наведеного вище програмного коду є процедура `indicateParam`. Це універсальна процедура, що може бути застосована для зображення параметрів на мнемосхемі. Її параметри наступні: `img` – розкадроване зображення, `fld` – текстове поле для цифрового відображення значення параметру, `stateVar` – параметризована змінна, що зберігає поточний стан параметру (1-немає сигналу, 2 – сигнал в межах регламенту, 3 – сигнал вийшов за передаварійну межу, 4 – сигнал вийшов за аварійну межу), `curVariable` – параметризована змінна зі значенням параметру, що відображується, `nominalValue` – значення номіналу параметру, `alarmErrorValue` – аварійна межа

відхилення, `warningErrorValue:Real` – передаварійна межа відхилення; `deadZoneValue` – значення зони нечутливості параметра; `parameterNameInMessage` – назва параметру текстом).

В прикладі використаний номінал 800 К, аварійна межа $\pm 15\text{K}$, передаварійна межа $\pm 7\text{K}$, зона нечутливості 2К. Відмітимо, що в прикладі деякі значення параметрів функції задані числами, а не змінними. В реальній ситуації значення параметрів відхилення та номіналу треба брати з рецепту чи розраховувати (в випадку, наприклад) номіналу температури для 1 і 3 стадії процесу) окремим скриптом.

Результат виконання скрипту показаний на рис. В.5. Показана технологічна ситуація, коли значення температури впало на 10 К, що призвело до появи передаварійного повідомлення, яке має підтвердити оператор.

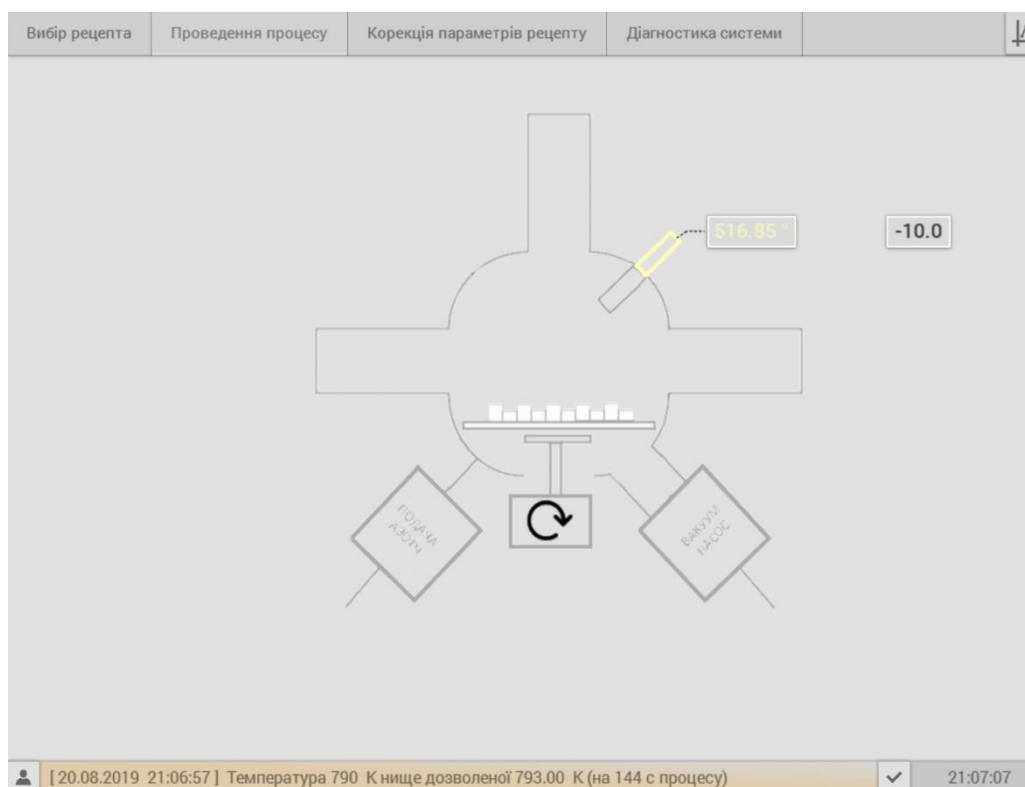


Рисунок В. 5 – Перевірка результату розробки

Таким чином, поставлена мета досягнута. Реалізація показу інших показників та логіка інтерфейсу реалізується аналогічно. Докладні приклади наведені в документації Simple SCADA.

ДОДАТОК Г

ПРОГРАМА АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЦЕПТУ

При розробці параметрів рецепту необхідно вводити параметри технологічного регламенту. Визначити параметри для будь-якого інструменту автоматично неможливо. Однак, для тих інструментів, для яких є емпіричні формули, можливо отримати основні параметри технологічного процесу достатньо просто.

В прикладі розв'яжімо наступну задачу: для різця Р6М5 з бажаною мікротвердістю 29.5 ГПа, зчепленням 0.42 МПа і товщиною покриття 6.78 мм визначити наступні параметри процесу покриття: тиск в камері і час покриття. При знайдених параметрах оцінити очікувану стійкість інструменту. Залежності між зв'язаними параметрами показати в вигляді графіків.

Для визначення тиску за мікротвердістю розробимо наступну програму.

```
%Задаємо діапазон зміни мікротвердості
hh=27.957:0.001:30.392;
%Температура процесу
T=800;
%ініціалізація масиву для збереження елементів
pp=zeros(1,length(hh));
%параметри рівняння
k=-0.1345; a=4.270;
%лічильник масиву
i=1;
for h=hh,
    p=k*h+a;
    pp(i)=p;
    i=i+1;
end;

%побудова графіку
figure(1)
plot (hh,pp, 'LineWidth',3), grid
hold on
```

```

y=0;
for i=1:length(hh),
    if hh(i)==29.5, y=i; break; end;
end
plot(hh(y),pp(y),'r*', 'LineWidth', 10), grid;
set (gca, 'FontSize', 14)
xlabel ('Мікротвердість, ГПа')
ylabel ('Тиск, Па')
grid

```

Результат виконання програми показано на рис. Г.1. Як бачимо, для мікротвердості 29.5 ГПа необхідно обрати тиск в камері 0.3 Па.

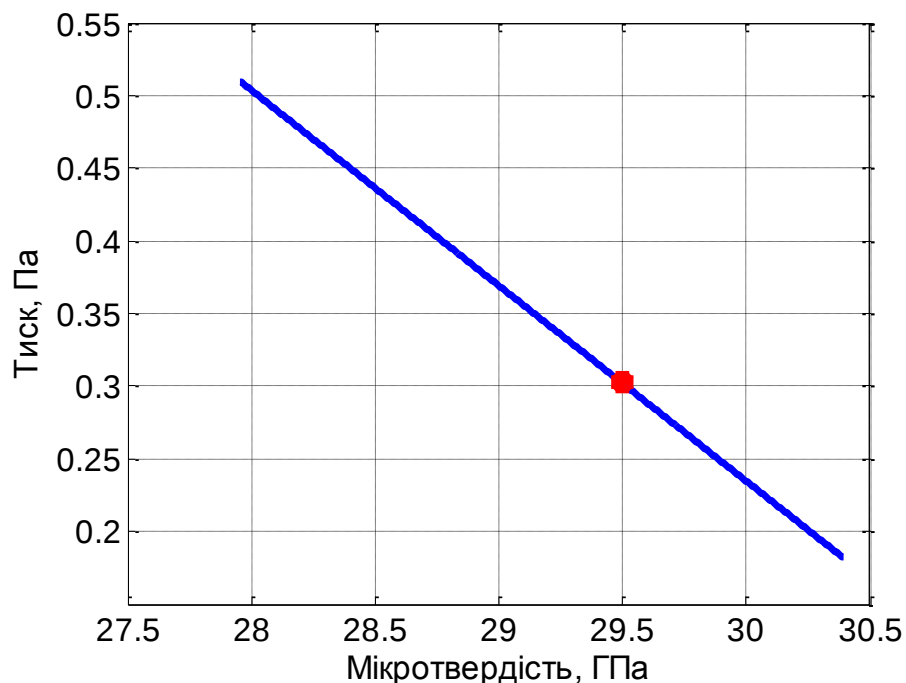


Рисунок Г.1 – Залежність мікротвердості інструменту від тиску в камері

Для визначення зчеплення за температурою і тиском розробимо наступну програму.

```

%Задаємо діапазон зміни зчеплення
ss=[0.05:0.01:0.43];
%ініціалізація масиву для збереження елементів
tt=zeros(1,length(ss));
%параметри рівняння
a=-0.1*0.031^2; b=0.1*0.031^2*2*786;

```

```

%лічильник масиву
i=1;
for s=ss,
    c=-0.1*0.031^2*786^2-s+0.43;
    t=(-b-sqrt(b^2-4*a*c))/(2*a);
    tt(i)=t;
    i=i+1;
end;
%побудова графіку
figure(2)
plot (ss,tt, 'LineWidth',3), grid
hold on
y=0;
for i=1:length(ss),
    if ss(i)==0.42, y=i; break; end;
end
plot(ss(y),tt(y),'r*', 'LineWidth', 10), grid;
set (gca, 'FontSize', 14)
xlabel ('Зчеплення, МПа'), ylabel ('Температура, К')
grid

```

Результат виконання програми показано на рис. Г.2.

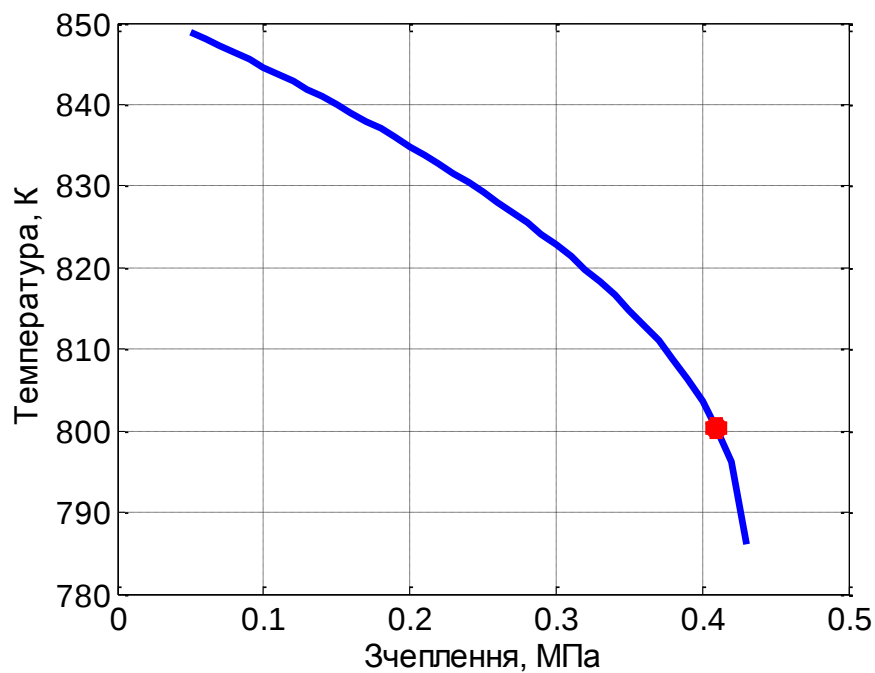


Рисунок Г.2 – Залежність температури від зчеплення інструменту

Як бачимо, для зчеплення 0.42 МПа необхідно обрати температуру 800 К.

Для визначення часу нанесення покриття за тиском і товщиною покриття розробимо наступну програму.

```
%Задаємо діапазон товщини покриття
dd=[5.5:0.1:10];

%ініціалізація масиву для збереження елементів
tt=zeros(1,length(ss));

%лічильник масиву
i=1;
for d=dd,
    tau=1e3*d/(1.111*(7.2-exp(0.32*0.3)));
    tt(i)=tau;
    i=i+1;
end;

%побудова графіку
figure(3)

plot (dd,tt, 'LineWidth',3), grid
hold on
y=0;
for i=1:length(ss),
    if dd(i)==6.8, y=i; break; end;
end

plot(dd(y),tt(y),'r*', 'LineWidth', 10), grid;
set (gca, 'FontSize', 14)
xlabel ('Діаметр покриття, мкм')
ylabel ('Час нанесення, с')
grid
```

Результат виконання програми показано на рис. Г.3. Як бачимо, залежність майже лінійна. Для товщини покриття 6.78 мкм час нанесення складає 1000 с.

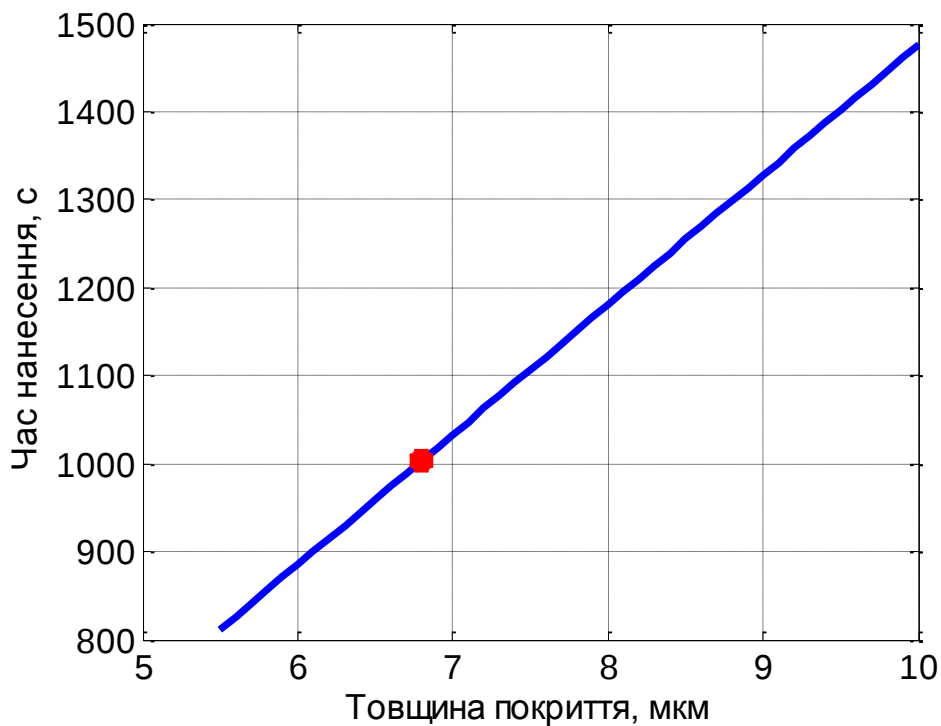


Рисунок Г.3 – Залежність діаметру покриття від часу нанесення

Тепер, маючи всі параметри можливо визначити стійкість інструменту. Для цього за допомогою MATLAB виконаємо наступний розрахунок.

```
s=0.42;d=6.7;h=29.5;
C=0.12*s+1.31*h+4.84*d
```

Таким чином, мікротвердість складає 71.12 хв.

Вибір режиму нанесення покриття (основної частини рецепту виконаний)

ДОДАТОК Д

ПРОГРАМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Для керування технологічним процесом в запропонованому рішенні використовується окрема керуюча програма, що в першу чергу виконує функції регулювання етапів процесу. Необхідність окремої програми обумовлена порівняно низькою надійністю існуючих на ринку SCADA. Сервер SCADA, серверна частина якого реалізує автоматичне регулювання, може перестати працювати значно з більшою ймовірністю, ніж ПЛК відомої фірми, а отже для відновлення регулювання його треба буде перезавантажувати, на що піде деякий час. Ймовірність відмови окремої керуючої програми, якщо вона написана якісно, менша.

В цьому додатку ми розглянемо розв'язання наступної задачі: створення програмного додатку засобами мови програмування Python для ОС Windows, що виконується в командному рядку з інтервалом циклу 0.5 с, і реалізує функцію релейного регулювання температури на етапі іонно-плазмового бомбардування.

Для розв'язання задачі будемо використовувати мову Python 2.7, оскільки саме ця версія має стабільну реалізацію OPC. Для реалізації задачі нам потрібні наступні бібліотеки, які можуть бути встановлені за допомогою стандартного інсталятора pip.

1. PyWin32 – бібліотека, що забезпечує доступ до викликів системних бібліотек Windows.

2. OpenOPC – бібліотека, що забезпечує доступ до OPC-серверу. На відміну від інших рішень ця бібліотека використовує спеціальну службу для Windows OpenOPCService, що встановлюється і запускається в операційній системі.

3. Signal – забезпечує обробку сигналів процесів. Python реалізує близький до BSD інтерфейс обробки.

4. Time, DateTime – функції для роботи з часом.

Таким чином, розроблена програма починається з імпорту необхідних модулів.

```
import OpenOPC
import time
import pywintypes
import signal
import datetime
```

Далі реалізуємо функцію для заміни розділювача цілої і дрібної частини на крапку, оскільки з OPC можливо отримати значення з комою, використання якого в Python призведе до програмної помилки.

```
def floatcm(num):
    return float(num.replace(",", ".", ""));
```

Далі реалізуємо функцію обробки переривання програми за натисненням Ctrl+C.

```
def keyboardInterruptHandler(signal, frame):
    print("Переривання (ID: {}) оброблено.  
Завершую...".format(signal));
    opc.close();
    exit(0);
```

```
signal.signal(signal.SIGINT, keyboardInterruptHandler)
```

Підключаємось до OPC-серверу та ініціалізуємо необхідні змінні.

```
pywintypes.datetime = pywintypes.TimeType
opc=OpenOPC.client()
opc.servers()
dt=0.5;
opc.connect('InSAT.ModbusOPCServer.DA')
```

Далі реалізуємо з кроком дискретності dt цикл очищення

while True:

```
    reg_on_coating    = opc['Controller.reg_clear.on'];
    ArcPowerOn        = opc['Bulat.actuators.ArcPowerOn'];
    clear_finished    = opc['Controller.reg_clear.finished'];
```

```

if ArcPowerOn == True and reg_on_clear == True and clear_finished == False:
    opc['Bulat.actuators.ArcOn'] = True;
    print ('Started clearing (1)..')
    process_elapsed_time=0;
    TempSP      = floatcm(opc['Bulat.sensors.TemperatureK']);
    process_time = floatcm(opc['Controller.reg_clear.process_time']);
    endTemp     = floatcm(opc['Controller.reg_clear.endTemperatureK']);
    diapason    = floatcm(opc['Controller.reg_clear.diapason']);
    T_for_sec=(endTemp-TempSP)/process_time;

while True:
    try:
        Temperature = floatcm(opc['Bulat.sensors.Temperature']);
        if Temperature >= endTemp:
            opc['Controller.reg_clear.finished'] = True;
            opc['Controller.reg_clear.on']      = False;
            opc['Bulat.actuators.ArcOn'] = True;
            print ('Finished clear (1)..');
            break;
        e = TempSP-Temperature;
        if e > diapason:
            opc['Bulat.actuators.ArcOn'] = True;
        elif e < -diapason:
            opc['Bulat.actuators.ArcOn'] = False;
        ArcOn=opc['Bulat.actuators.ArcOn'];
        now = datetime.datetime.now()
        curtime=now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S");
        out = "%s,  T_PV=%.2f,  T_SET=%.2f,  err=%.2f  (max=%.1f),
T_for_sec=%.2f,  Process_time=%d/%d,  ArcOn=%s" % (curtime, Temperature,
TempSP, e, diapason, T_for_sec, process_elapsed_time, process_time, ArcOn)
    except OpenOPC.TimeoutError:
        print ("OPC TimeoutError occured")
        time.sleep(dt)
        TempSP += T_for_sec*dt;
        process_elapsed_time += dt;
    #except:
        #opc.close();
else:
    print ('Waiting');
    time.sleep(1)

```

В результаті виконання програми очищення буде проведено за лінійною програмою в відповідності до налаштувань, що мають бути передані з SCADA до OPC-серверу.

ДОДАТОК Е

ПРОГРАМА ДЛЯ РУЧНОГО УПРАВЛІННЯ

Програма для ручного управління установкою (див. розділ 4.2.) дозволяє змінювати параметри OPC-сервера (показання датчиків та керування) безпосередньо в режимі симуляції і взаємодіяти безпосередньо з виконавчими механізмами установки для налагодження роботи сенсорної мережі і OPC-сервера в реальному режимі.

Програма може бути розроблена в MATLAB. Розробка програми виконується в два етапи. Перший етап – розробка графічного інтерфейсу. Для розробки графічного інтерфейсу бажано використовувати вбудовану програму GUIDE. Розроблений графічний інтерфейс за допомогою програми GUIDE показано на рис. Е.1.

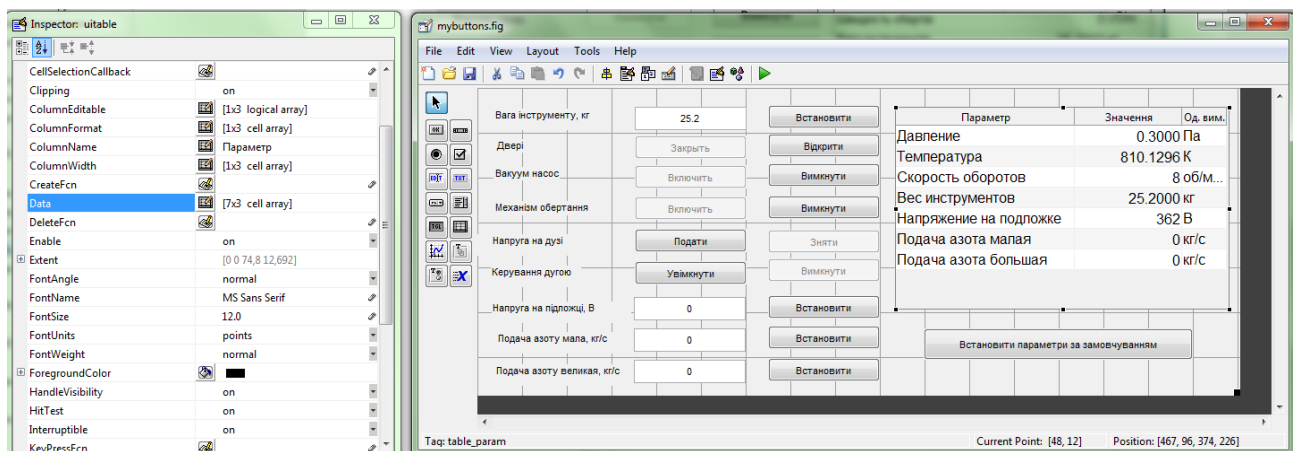


Рисунок Е. 1 – Розроблений за допомогою програми GUIDE інтерфейс

Програми з графічним інтерфейсом пишуться за допомогою подієвої парадигми програмування, тобто кожен елемент, наприклад кнопка, має деякі події (наприклад, натиснення, переміщення курсору та ін), які обробляються деякою функцією.

Розробимо функцію для обробки події натиснення на кнопку «Встановити параметри за замовчуванням». При цьому має бути проведено

підключення до OPC серверу та встановлення значень за замовчуванням для всіх параметрів системи автоматизації.

Програмний код обробника наступний.

```
function cmdReset_Callback(hObject, eventdata, handles)

da = opcda('localhost','opcserver.vsim.Instance.1');
connect(da);
grp = addgroup(da, 'Grp5');
itm =
additem(grp, {'Bulat.sensors.DoorClosed', 'Bulat.sensors.To
olWeight', 'Bulat.sensors.Pressure', 'Bulat.sensors.Tempera
ture', ...
'Bulat.sensors.RotationSpeed', 'Bulat.actuators.VacuumPump
On', 'Bulat.actuators.RotationMechanismOn', ...
'Bulat.actuators.NitrogenFlow1', 'Bulat.actuators.Nitrogen
Flow2', 'Bulat.actuators.ArcOn', 'Bulat.actuators.ArcPowerO
n', ...
'Bulat.actuators.SubstrateVoltage', ...
});

write(grp, {'false', 0, 1e5, 300, 0, 'false', 'false', 0, 0, 'false
', 0, 0})

grp2 = addgroup(da, 'Grp6');
itm =
additem(grp2, {'Controller.reg_coating.on', 'Controller.reg
_coating.diapason', 'Controller.reg_coating.endTemperature
K', ...
'Controller.reg_coating.finished',
'Controller.reg_coating.process_time'});

write(grp2, {'false', 23, 800, 'false', '1800'})
disp('Встановлено параметри за замовчуванням')
disconnect(da);
```

ДОДАТОК Ж

КОПІЇ АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Кіркопуло Катерини Григорівни,
представленої на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю
151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Довідка підтверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Кіркопуло К.Г. «Автоматизація процесів керування установкою іонно-плазмового напilenня» виконано відповідно до науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету «Підвищення ефективності функціонування технічних систем» № державної реєстрації 0114U005502 та «Розробка компонентів інтелектуальних інформаційних систем для моделювання та проектування складних об'єктів та систем» № державної реєстрації 0115U000835, в яких Кіркопуло К.Г. брала участь, як співвиконавець.

Довідка надана в зв'язку з захистом дисертації.

Проректор з наукової та
науково-педагогічної роботи



Д.В. Дмитришин

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
Кіркопуло Катерини Григорівни,
представленої на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю
151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Довідка підтверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Кіркопуло К.Г. «Автоматизація процесів керування установкою іонно-плазмового наплення» використовуються Одеським національним політехнічним університетом при викладанні дисциплін кафедрою Комп'ютерних технологій автоматизації:

- Моделювання теплоенергетичного обладнання в АСУ;
- Методологія автоматизованих процесів проектування;
- Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів;
- Структурна та параметрична оптимізація.

Довідка надана в зв'язку з захистом дисертації.

Проректор з науково-педагогічної
та виховної роботи



С.А. Нестеренко



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ХК «Мікрон»

В.О. Вайсман

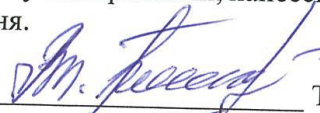
АКТ

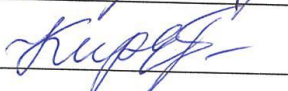
Цим актом підтверджується, що в холдинговій компанії «Мікрон» було проведено випробування різального інструменту з іонно-плазмовими зносостійкими покриттями. Були випробувані пластини з твердого сплаву ВК6 та Т15К6 на операціях точіння та фрезерування, свердла та циліндричні фрези з швидкорізальної сталі Р6М5 на операціях свердління та фрезерування.

Нанесення покриттів здійснювалось на установці моделі «Булат-3Т» за технологією та з застосуванням системи управління іонно-плазмовою установкою, що були розроблені представниками кафедри «Інформаційних технологій проектування в машинобудуванні» Одеського національного політехнічного університету професором Тонконогим В.М. та аспіранткою кафедри Кіркопуло К.Г. Моделі і методи керування установкою, розроблені представниками ОНПУ, були використані при нанесенні покриттів на інструмент для випробувань. Запропоноване програмне забезпечення системи автоматизації установки іонно-плазмового напilenня дозволило проводити синтез і налагодження систем автоматичного керування установкою з заданими оператором параметрами технологічного процесу і вимогами до якісних показників інструменту.

Проведені випробування показали стабільне підвищення стійкості випробуваних різальних інструментів на 80 – 100% в порівнянні з інструментами без покриттів. Підвищення стійкості при використанні стандартних систем управління іонно-плазмовою установкою складало 60 – 85%. Слід також зауважити, що при випробуваннях не зафіксовано жодного випадку зниження твердості інструменту із швидкорізальної сталі внаслідок перегріву при нанесенні покриття. При використанні стандартних систем управління іонно-плазмовою установкою такий брак складав 2 – 3%.

ХК «Мікрон» вважає за доцільне проведення впровадження шляхом модернізації установки моделі «Булат-3Т» з метою застосування системи управління іонно-плазмовою установкою, що була розроблена представниками Одеського національного політехнічного університету. Економічні показники від впровадження будуть визначені в процесі експлуатації різального інструменту з покриттями, нанесеними з використанням запропонованої системи управління.

 Тонконогий В.М.

 Кіркопуло К.Г.