

продуктивності виробництва. Об'єктом дослідження є технологічний процес затвердіння силіконового напівфабрикату у нагрівальних формах та процес подачі силікону у форми. Предметом дослідження виступають методи автоматизованого керування температурними режимами нагрівальних форм і подачею силіконового напівфабрикату. Дослідження проводилися на підприємстві ТОВ «Високовольтний союз – РЗВА», яке є одним із провідних виробників високовольтної апаратури в Україні та має багаторічний досвід у сфері електротехнічного виробництва. У ході виконання роботи проведено аналіз існуючого технологічного процесу, визначено фактори, що впливають на якість затвердіння силікону, та досліджено залежність температури нагрівальних форм від температури навколишнього середовища й часу роботи обладнання. Встановлено оптимальні та нормативні значення подачі силіконового напівфабрикату, що забезпечують стабільність виробничого процесу та мінімізацію браку.

Ключові слова: автоматизація, силіконовий ізолятор, функціональна схема автоматизації, промисловий контролер, температура, витрата, нагрівальна форма.

Вступ

На заміну застарілим керамічним ізоляторам сьогодні використовуються силіконові, які є міцними, простими у виготовленні та мають покращені характеристики. Завдяки своїй молекулярній структурі силікони ідеально підходять для ізоляційних завдань у техніці середнього й високого класу напруги. Наприклад, струм витoku на силіконових ізоляторах при забрудненні значно менший, ніж у виробів із фарфору, скла чи етилен-пропіленового каучуку. Крім того, силіконові ізолятори стійкі до пробоїв навіть за умов сильного забруднення.

Мета роботи

Оскільки основним процесом у нашій схемі є лиття силіконових напівфабрикатів на стрижнях у нагрівальних формах, доцільно розробити нову систему таймінгів з контролем температури та сигналізацією, яка замінить стару систему, що часто виходить з ладу та негативно впливає на якість продукції. Такий підхід дозволить не лише покращити якість кінцевого продукту, а й знизити витрати, зменшити кількість браку. Дозування силіконових напівфабрикатів у нашій системі не є проблемою, оскільки форми заповнюються до максимального рівня. Основна увага приділяється температурі та часу, адже саме ці параметри є ключовими для забезпечення затвердіння силіконових ізоляторів у процесі нагрівання.

Технологія виробництва силіконових ізоляторів

Процес виготовлення сучасних ізоляторів на основі силіконових матеріалів

включає наступні етапи: перевірка вмісту ємності з силіконовим напівфабрикатом, заправка ємності напівфабрикатом, встановлення ємності з напівфабрикатом на рухомі підставки, змішування та вакуумування напівфабрикатів, закріплення стержнів без ізоляції на нагрівальні форми, запуск установки та очікування на кінцеву продукцію.

Розробка функціональної системи автоматизації

Аналіз технологічного процесу виготовлення силіконових ізоляторів виявив, що облік часу залишається недостатньо точним. Виявлено низку недоліків у поточній схемі автоматизації, які потребують вирішення: перетримка або недотримка силікону в нагрівальних формах; неточне вимірювання температури, що спричиняє брак. Розроблену функціональну схему автоматизації (ФСА) технологічного процесу наведено на рис. 1. Дана ФСА включає звукову сигналізацію по завершенню процесу формування силіконового ізолятора, контроль нагріву форм і функцію аварійного відключення. Подача рідкого силікону розпочинається після закриття форм циліндром, а нагрівання форм активується лише після їх повного заповнення силіконом, що допомагає зменшити кількість браку.

Для вимірювання температури використовується давач HA040202 від фірми OMNIPORT 20. Цей давач має такі технічні характеристики: Робочий діапазон: $-40...190^{\circ}\text{C}$. Температура каналу 1: $T(^{\circ}\text{C})$, $I_{\text{вих}} = 4\text{-}20\text{mA}$ уніфікований сигнал.

Для вимірювання подачі рідкого силікону використано витратомір RPrmagM.

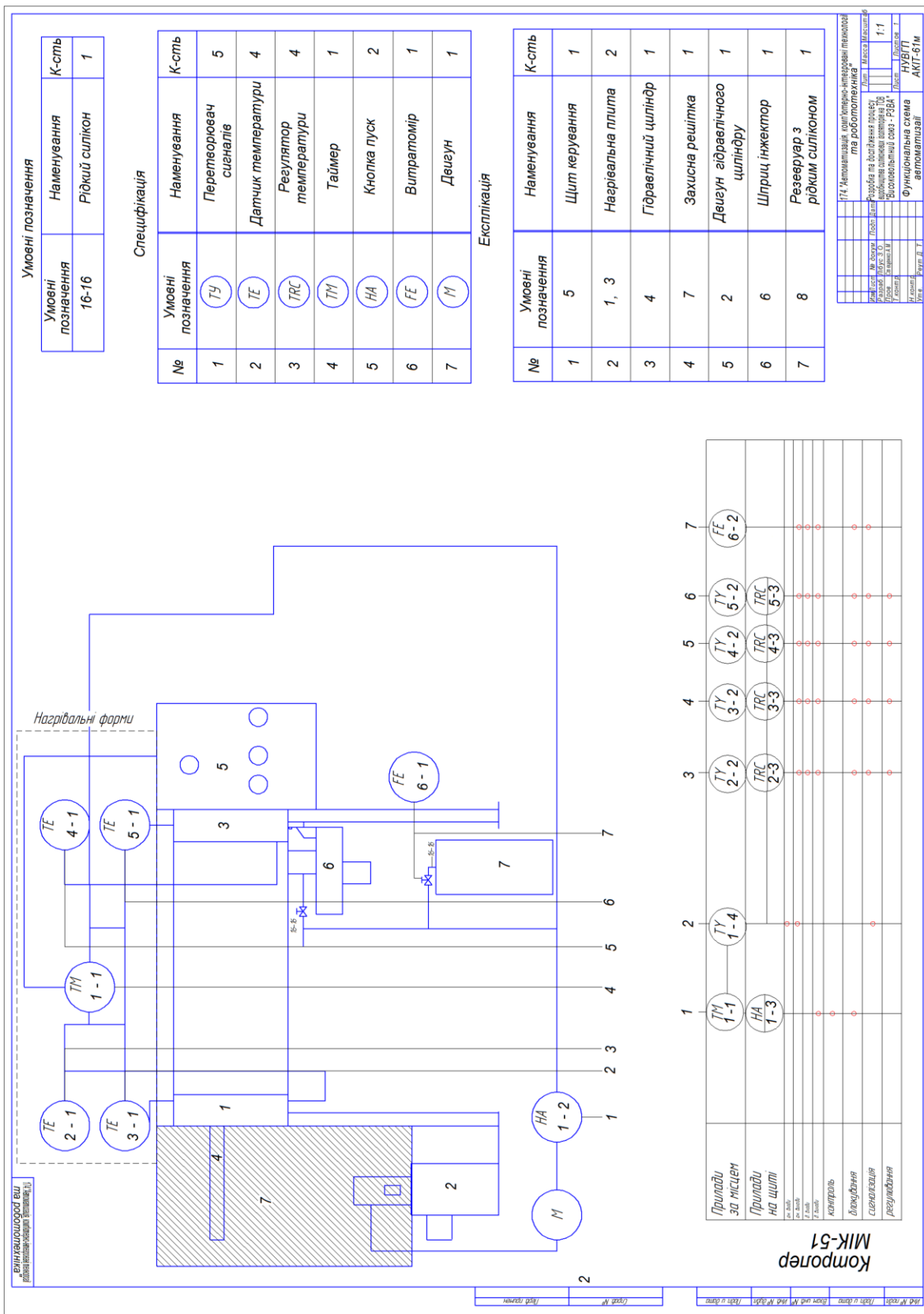


Рисунок 1 – ФСА технологічного процесу виготовлення силіконових ізоляторів

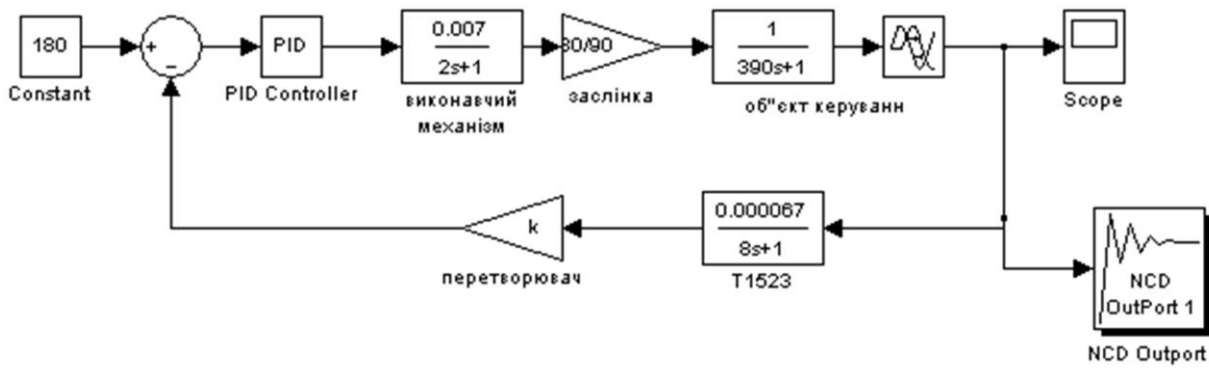


Рисунок 2 – Модель автоматизованої системи регулювання температури нагрівальних форм

Вимірювання витратоміра не залежать від щільності, в'язкості, температури, тиску та електропровідності рідини. Пристрій не має рухомих частин у вимірювальній трубці, що виключає втрати напруги. Він забезпечує низькі вимоги до прямих труб до і після пристрою та підходить для вимірювання суспензій.

Для керування процесом було обрано програмований логічний контролер (ПЛК) фірми Мікрол МІК-51. На лицьовій панелі контролера розташовані засоби оперативного управління, які дозволяють змінювати режими роботи, встановлювати параметри, керувати виконанням програми, вручну управляти пристроями, контролювати сигнали та ідентифікувати помилки.

Для автоматизації процесу керування гідравлічним приводом було використано частотний перетворювач Altivar ATV-58PU29N4 від компанії Schneider Electric.

Розрахунок та моделювання системи автоматизованого регулювання

В результаті дослідження та вимірювання було отримано криву зміни температури нагрівальних форм. Під час активації процесу подачі силікону в форми протягом 1400 с було записано дані про температурні зміни кожні 10 с. За методом дотичної отримано наступний вигляд функції передачі нагрівальної форми:

$$W(s) = \frac{I}{390s + 1} \cdot e^{-160s} \quad (1)$$

У середовищі Matlab Simulink було побудовано модель автоматизованої си-

стеми регулювання (АСР) нагрівальних форм (рис. 2). Було проведено оптимізацію налаштувань ПІД регулятора і отримано перехідну характеристику системи рис. 3. При цьому налаштування ПІД регулятора наступні: $K_p = 662.6$, $K_i = 0.0031$, $K_d = 64$. При проведенні аналізу перехідного процесу нами було отримано такі показники якості: усталена похибка 3.88%, перерегулювання 0%, час регулювання 750с, коливальність 0.

Розробка програмного забезпечення

Програмне забезпечення для керування технологічним процесом на базі ПЛК фірми МІК-51 розроблено у середовищі Альфа і наведено на рис. 4. Програмний пакет редактор FBD-програм АЛЬФА призначений для програмування мовою функціональних блоків мікропроцесорних контролерів серій МІК-51 і МІК-52 виробництва підприємства «МІКРОЛ». Система програмування реалізована відповідно до вимог стандарту Міжнародної Електротехнічної Комісії (МЕК) ІЕС 1131-3 і призначена для розробки прикладного програмного забезпечення для керування технологічними процесами, що виконуються на програмованих контролерах [1].

Візуалізацію технологічного процесу розроблено на базі програмного забезпечення Visual Intellect (рис. 5). SCADA Visual Intellect" надає широкий набір інструментів для діагностики стану системи, обробки збоїв, внесення змін до бази даних та інтерфейсів без зупинки роботи.

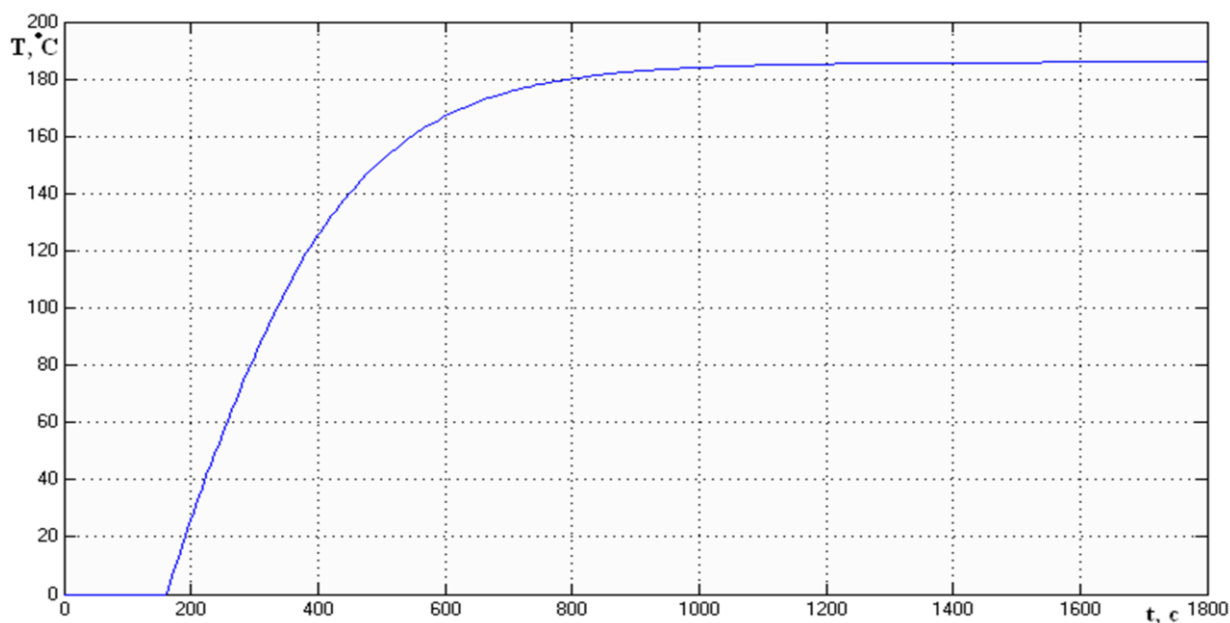


Рисунок 3 – Перехідна характеристика системи регулювання температури нагрівальних форм

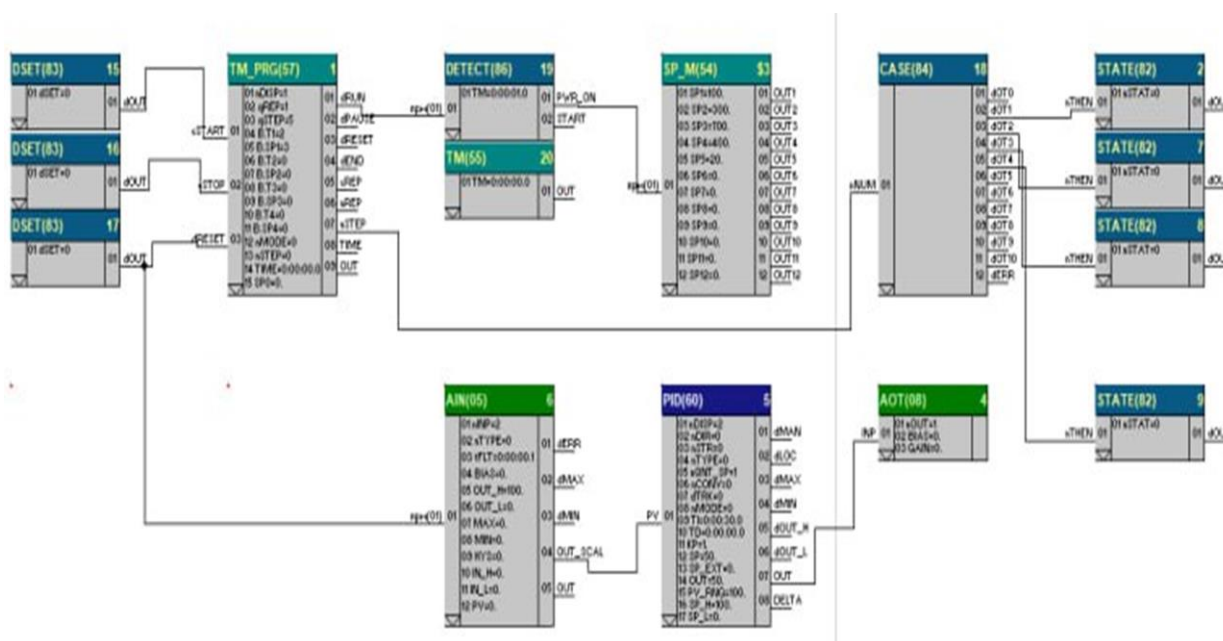


Рисунок 4 – Програмне забезпечення для керування технологічним процесом

Технічні характеристики та функції: Ядро системи є багатопотоковим, що забезпечує ефективний розподіл ресурсів між паралельними завданнями. Підтримка мікропроцесорних пристроїв виробництва «МІКРОЛ», а також можливість підключення стороннього обладнання, що використовує протокол ModBus RTU. Можливість реалізації розподілених клієнт-серверних архітектур. У дистрибутив SCADA системи входить значна кількість готових

шаблонів для опису апаратної та програмної частини системи керування. Для пристроїв виробництва «МІКРОЛ2» передбачені стандартні файли-шаблони, які автоматично описують їх внутрішню структуру. Користувач лише імпортує потрібний шаблон у логічну базу та прив'язує його до технологічних змінних.

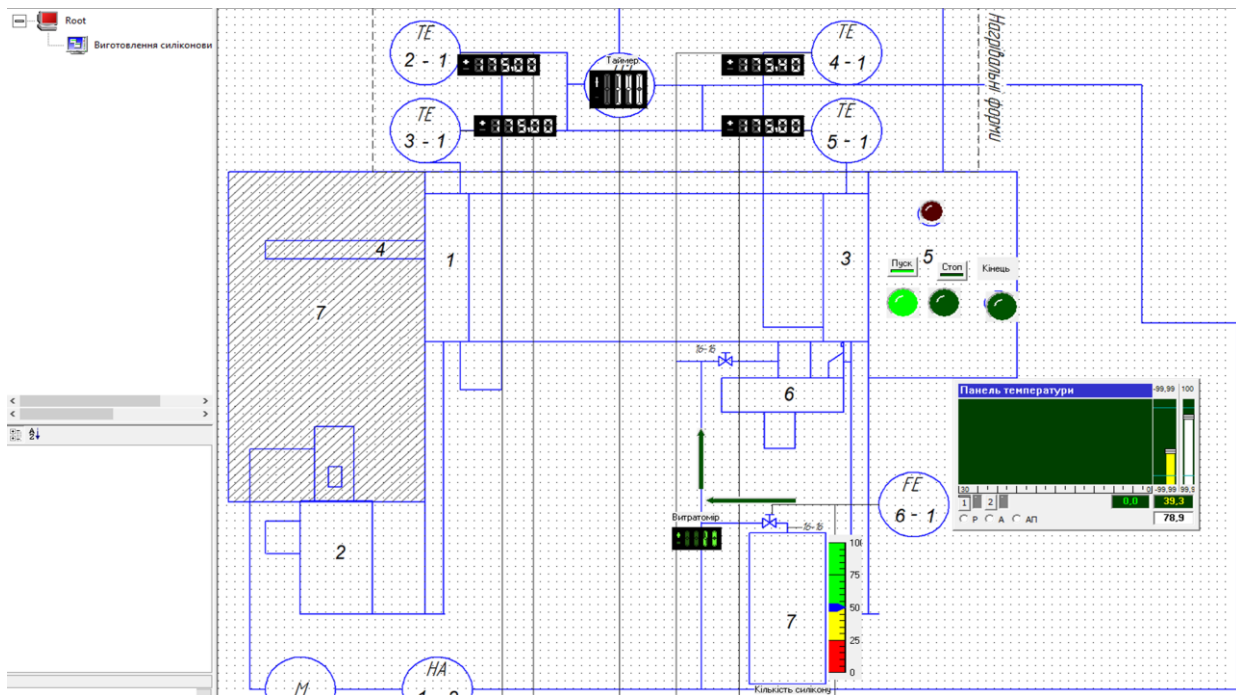


Рисунок 5 – Візуалізація технологічного процесу

Висновки

У роботі було проведено дослідження та розробку автоматизованої системи керування процесу виготовлення силіконових ізоляторів. Була здійснена детальна оцінка теплового балансу на об'єкті, побудована математична модель АСР температури нагрівальних форм, вибрані оптимальні налаштування ПІД регулятора. Структура розробленої системи автоматизації має дворівневу організацію, що дозволяє здійснювати безперервний контроль за станом технологічного процесу, а також

вчасно вносити необхідні корективи у процес регулювання. Оператору надається можливість зручного відображення результатів роботи системи, створення звітів, здійснення керуючих впливів на параметри процесу.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Ельперін І. В. Промислові контролери : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2003. 320 с.
2. Клепач М. І. Теорія автоматичного керування. Лабораторні роботи : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2008. 206 с.
3. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2009. 96 с.
4. Шумілов М. Ю. Підвищення електричної та механічної міцності високовольтних полімерних ізоляторів в умовах комплексної дії експлуатаційних факторів : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків : Національний технічний університет «ХПІ», 2010. 20 с.
5. Дьяков В. Д. Повітряні лінії електропередачі. Конспект лекцій з дисципліни «Кабельні та повітряні лінії електропередачі». Харків : Харківська національна академія міського господарства, 2008. 67 с.
6. Денисюк Р. О. Хімічна технологія : підручник. Житомир, 2017. 350 с.

7. Тютюнник О. О. Аналіз методів розрахунків конструкцій повітряних ліній електропередач : кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Суми : Сумський державний університет, 2023. 99 с.
8. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А., Співак О. В., Котиш А. І., Величко Т. В. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / Центрально-український національний технічний університет. Кропивницький, 2019. 272 с.
9. Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії : збірник наукових праць. Вип. 6. Кропивницький ; Херсон : ХДАЕУ, 2024. 174 с.

References

1. Elperin, I. V. (2003). *Promyslovi kontrolery: Navchalnyi posibnyk zakladiv* [Industrial controllers: Educational manual for institutions]. NUKHT. (in Ukrainian)
2. Klepach, M. I. (2008). *Teoriia avtomatychnoho keruvannia. Laboratorni roboty. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh* [Theory of automatic control. Laboratory works. Educational manual for higher education students]. NUVHP. (in Ukrainian)
3. Bakhovets, B. O. (2009). *Avtomatyзованыi електропрывод. Navchalnyi posibnyk* [Automated electric drive. Educational manual]. NUVHP. (in Ukrainian)
4. Shumilov, M. Y. (2010). *Pidvyshchennia elektrychnoi ta mekhanichnoi mitsnosti vysokovolnykh polimernykh izoliatoriv v umovakh kompleksnoi dii ekspluatatsiinykh faktoriv* [Increasing the electrical and mechanical strength of high-voltage polymer insulators under the complex action of operational factors] (Extended abstract of Candidate's thesis, National Technical University "KhPI"). (in Ukrainian)
5. Diakov, V. D. (2008). *Povitriani linii elektroperedachi. Konspekt leksii z dystsypliny "Kabelni ta povitriani linii elektroperedachi"* [Overhead power lines. Lecture notes on the discipline "Cable and overhead power lines"]. Kharkiv National Academy of Municipal Economy. (in Ukrainian)
6. Denysiuk, R. O. (2017). *Khimichna tekhnolohiia: Pidruchnyk* [Chemical technology: Textbook]. Zhytomyr. (in Ukrainian)
7. Tiutiunyk, O. O. (2023). *Analiz metodiv rozrakhunkiv konstruktsii povitrianykh linii elektroperedach* [Analysis of methods for calculating structures of overhead power transmission lines] (Bachelor's thesis, Sumy State University). (in Ukrainian)
8. Orlovych, A. Y., Plieshkov, P. H., Kozlovskyy, O. A., Spivak, O. V., Kotysh, A. I., & Velychko, T. V. (2019). *Elektrychne obladnannia pidstantsii system elektropostachannia* [Electrical equipment of substations for power supply systems]. Central Ukrainian National Technical University. (in Ukrainian)
9. Kherson State Agricultural and Economic University. (2024). *Suchasni tekhnolohii ta dosiahnennia inzhenernykh nauk v haluzi hidrotekhnichnoho budivnytstva ta vodnoi inzhenerii: zbirnyk naukovykh prats* [Modern technologies and achievements of engineering sciences in the field of hydraulic engineering and water engineering: Collection of scientific papers] (6th ed.). KHDAEU. (in Ukrainian)

AUTOMATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF SILICONE INSULATORS

Libus Z. O.

Master

National University of Water Management and Natural Resources

33028, 11 Soborna St., Rivne, Ukraine

e-mail: Libus232@gmail.com

Stetsenko A. M.

Candidate of Technical Sciences, Associated Professor

National University of Water Management and Natural Resources

33028, 11 Soborna St., Rivne, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-1366-7974>

e-mail: a.m.stetsenko@nuwm.edu.ua

Komar A. V.

Software engineer

LLC "Softserve Dynamics"

82482, 27 Ivana Franka St., Morshin, Stryi district, Lviv region, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0009-1754-0410>

e-mail: komarandrii499@gmail.com

Abstract. In this paper, the technological process of silicone insulator production was studied and improved in order to improve the quality of finished products by precisely controlling the holding time, temperature conditions and consumption of silicone semi-finished product. The relevance of the work is due to the need to reduce the number of production scrap and increase the efficiency of technological equipment in the manufacture of high-voltage insulators. The main attention is paid to the process of curing silicone semi-finished products in heating molds fixed on rods, as well as the process of metered silicone feed into molds. It is these stages that have a decisive impact on the physical and mechanical characteristics of finished products, their reliability and compliance with technical requirements. Insufficient temperature control or inaccuracy in material feed can lead to product defects, overconsumption of raw materials and a decrease in production productivity. The object of the study is the technological process of curing silicone semi-finished products in heating molds and the process of feeding silicone into molds. The subject of the study is methods of automated control of temperature regimes of heating molds and supply of silicone semi-finished product. The research was conducted at the enterprise LLC "High-voltage Union - RZVA", which is one of the leading manufacturers of high-voltage equipment in Ukraine and has many years of experience in the field of electrical engineering production. In the course of the work, an analysis of the existing technological process was carried out, factors affecting the quality of silicone curing were identified, and the dependence of the temperature of heating molds on the ambient temperature and equipment operating time was studied. Optimal and regulatory values of the supply of silicone semi-finished product were established, which ensure the stability of the production process and minimize defects.

Keywords: automation, silicone insulator, functional automation diagram, programmable logical controller, temperature, flow rate, heating mold, mathematical model.