

Філіппова М.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Богдан Г.А.

<https://orcid.org/0000-0001-6745-1509>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демченко М.О.

<https://orcid.org/0000-0003-0436-1092>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕКСТРУЗІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАБЕЛЮ

У роботі проведено комплексне дослідження технологічного циклу виготовлення електричних кабелів з акцентом на етап нанесення ізоляційного покриття методом екструзії. Актуальність дослідження зумовлена високими вимогами до експлуатаційних характеристик сучасної кабельної продукції, таких як термічна стійкість, діелектрична міцність та опір зовнішнім чинникам. Встановлено, що ключовим фактором, який визначає якість готового виробу та стабільність геометричних параметрів ізоляції, є точність синхронізації швидкісних режимів приводних механізмів на різних ділянках лінії. В ході аналізу останніх публікацій виявлено, що існуючі підходи до автоматизації, зокрема з використанням штучних нейронних мереж та методів скінченних об'ємів, дозволяють прогнозувати параметри потоку полімеру, проте проблема динамічної затримки та зашумленості сигналів у контурах регулювання товщини шару залишається відкритою. Особливу увагу приділено ідентифікації критичних вузлів виробничої системи: приводам видачі, відводу та прийому (намотування). В роботі представлено розробку та опису функціональної моделі екструзійної лінії. Обґрунтовано необхідність контролю лінійної швидкості кабелю, оскільки будь-яка розсинхронізація між тяговим пристроєм та приймальною бобіною призводить до варіацій товщини ізоляції, що при високих швидкостях роботи лінії спричиняє значний обсяг браку. Наукова новизна роботи полягає у запропонованій схемі керування, яка базується на використанні прецизійних електроприводів змінного та постійного струму, охоплених єдиною системою регулювання. Математичне моделювання системи реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. У роботі представлено порівняльний аналіз застосування класичного ПІД-регулятора та контролера на основі нечіткої логіки. Шляхом використання інструментарію Autotuning визначено оптимальні коефіцієнти пропорційного (K_p), інтегрального (K_i) та диференціального (K_d) посилення для контурів відводу та прийому. Результати моделювання підтвердили, що запропонована архітектура ПІД-регулятора забезпечує ефективну компенсацію збурень, викликаних зміною моменту навантаження при накопиченні ваги кабелю на бобіні. Система демонструє високу точність відстеження заданої швидкості (60 м/хв) та стабільність перехідних процесів. Впровадження розроблених алгоритмів керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, підвищити продуктивність лінії та забезпечити рівномірність нанесення ізоляції відповідно до міжнародних стандартів якості.

Ключові слова: автоматизація, кабельна продукція, натяг дроту, ізоляція, система керування, ефективність, якість, технологічний процес, екструдер, контроль.

Постановка проблеми. Сучасне суспільство неможливо уявити без широкого використання електроенергії та електромагнітних хвиль. Їх генерація, передача й застосування безпосередньо пов'язані з використанням проводів і кабелів, які виконують роль ключових елементів систем передачі енергії та інформації.

Кабельна продукція виготовляється з матеріалів, стійких до впливу високих температур, електричних навантажень, вологи, масел та інших зовнішніх факторів. Конструктивно кабель являє собою один або декілька провідників (суцільних чи багатожильних), поєднаних між собою та, за

потреби, ізолюваних, що забезпечує передачу електричних або телекомунікаційних сигналів.

Забезпечення довговічності, надійності та високої якості кабельної продукції потребує застосування ефективних технологій виробництва та точного контролю ключових параметрів технологічного процесу. Саме контроль цих параметрів є критичним для отримання продукції, що відповідає сучасним вимогам якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Якість виробництва кабелю в більшій частині залежить від операції нанесення ізоляції [1]. В роботі представлена математична модель, формальною частиною якої є матеріальний баланс, що описує кінетику реакцій зшивання полімеру навколо провідника. Також для зменшення витрат на виробництво кабельної продукції може застосовуватися мобільна лінія, яка виготовляє кабель безпосередньо перед тунелем, де укладають кабель [2]. Використовуються мобільні лінії, які безпосередньо виготовляють продукцію на місці прокладання кабелів, що зменшить затрати на виробництво, але має високу вартість.

При аналізі процесів, які відбуваються на стадії екструзії використовують моделі на основі нейромереж [3]. Будується модель штучної нейронної мережі для прогнозування параметрів процесу екструзії, яка може точно передбачити параметри процесу для різних марок кабелю. Це може скоротити терміни налаштування екструзійних ліній.

Також для покращення процесу виробництва кабелів проводять оптимізацію самої конструкції екструдера [4]. При цьому такі дослідження проводяться за допомогою моделювання потоку полімерних гранул вздовж твердого конвеєрного шнека з використанням чисельної моделі на основі методу кінцевого об'єму.

Для виробництва певних видів кабелів використовують нову концепцію процесу виробництва з використанням методології наукових досліджень дизайну [5]. Для даної методології розроблялось нове автоматизоване обладнання для виробництва кабелю Боудена. Використання такої системи призводить до скорочення тривалості циклу на 25% та підвищення продуктивності процесу на 30%.

При аналізі процесу виробництва кабельної продукції важливо ідентифікувати параметри процесу регулювання [6]. Одним з найбільш проблемних місць у виробництві є наявність в контурах регулювання товщини шарів ізоляції шумів вимірювання швидкостей черв'яків екструдерів і діаметрів шарів ізоляції, а також затримка часу. Зашумленість корисних сигналів і затримка часу

негативно впливають на точність контролю товщини шару і швидкість регулювання і можуть призвести до втрати стабільності системи.

Також важливим аспектом покращення процесі виробництва є використання більш якісних приводів [7]. Для цього розроблено конструкцію централізованого нелінійного контролера, заснованого на швидкому інтегральному терміналі керування ковзним режимом для гібридної мікромережі змінного/постійного струму

Щоб виконати завдання намотування дроту якнайшвидше, швидкість виробництва повинна бути відрегульована під час цієї операції [8]. Для вирішення проблеми контролю натягу для систем намотування використовують стратегію керування для фази прискорення за допомогою розширення Тейлора та зменшення коливань натягу. Однак, такий метод складний в реалізації [9].

Не дивлячись на велику кількість досліджень оптимізація процесу виготовлення кабельної продукції є актуальною та потребує побудови системи контролю швидкості подачу кабелю на ділянках відводу та прийому дроту при нанесенні ізоляції екструзійним методом.

Постановка завдання. Для забезпечення відповідності кабельної продукції сучасним вимогам якості необхідно детально дослідити умови перебігу технологічного процесу її виготовлення з урахуванням усіх впливових факторів і підпроцесів. На основі проведеного аналізу поставлено завдання розробити ефективну систему керування процесом екструзії, яка забезпечить підвищення якості готової продукції та зменшення рівня виробничого браку.

Виклад основного матеріалу У процесі виробництва електричних кабелів початковою технологічною операцією є волочіння дроту, в ході якого вихідні металеві заготовки значного діаметра послідовно протягуються через калібровані отвори, що дозволяє отримати провідники необхідних геометричних розмірів і характеристик. Наступним важливим етапом є відпал — термічна обробка, яка забезпечує зниження внутрішніх напружень у матеріалі, підвищення пластичності та покращення електропровідності провідників.

Після цього окремі дроти об'єднують у багатожильні провідники шляхом скручування або іншого способу з'єднання, що дозволяє сформувати необхідну конструкцію кабелю. На наступному етапі здійснюється нанесення ізоляційного покриття: провідники попередньо нагрівають і покривають полімерними матеріалами, такими як полівінілхлорид, поліетилен або зшитий поліе-

тилен. Це забезпечує електричну ізоляцію, захист від механічних пошкоджень і впливу зовнішніх факторів, а також підвищує експлуатаційну надійність кабельної продукції.

Етап нанесення ізоляційного покриття реалізується за допомогою процесу екструзії, під час якого на провідник наноситься рівномірний шар полімерного матеріалу. Така ізоляція забезпечує захист провідника від механічних пошкоджень, впливу зовнішнього середовища та сприяє зменшенню втрат матеріалу, зокрема міді.

Після завершення екструзії ізолюваний кабель проходить стадію охолодження в спеціальному жолобі, де стабілізуються його геометричні та фізичні параметри. Надалі здійснюється контроль якості: за допомогою вимірювальних пристроїв перевіряється відповідність діаметра кабелю заданим параметрам, а іскровий тестер використовується для виявлення можливих дефектів ізоляційного покриття.

На завершальному етапі кабель розрізають на стандартні довжини, намотують на котушки та готують до транспортування і реалізації. Функціональна схема технологічного процесу виготовлення електричного кабелю з відображенням екструзійної лінії наведена на рис. 3.1.

Технологічний процес розпочинається в екструдері, де металевий провідник (мідний або алюмінієвий) рівномірно покривається шаром розплавленого полімерного матеріалу методом екструзії. Після цього кабель потрапляє в нагріту частину труби, заповнену азотом під високим тиском 10 бар, де відбувається реакція зшивання за рахунок тепла, що передається від стінки труби випромінюванням і конвекцією. Ця частина труби розділена на шість незалежних теплових зон, а також перед охолоджуваною водою части-

ною є одна зона труби, заповнена азотом, який не нагрівається. Після цього кабель охолоджують до температури навколишнього середовища в два етапи. Спочатку в частині труби, охолодженої холодною водою, також під тиском 10 бар і, нарешті, після виходу з труби кабель охолоджується в навколишньому повітрі за допомогою стисненого повітря та вільної конвекції до кінця процесу на колесі намотування.

Для правильного проведення процесу необхідно ретельно вибирати багато параметрів виробничої лінії, а саме: швидкість лінії (регулює час перебування в трубі), температуру в нагрітій частині труби, заповненої азотом, температуру і швидкість потоку охолоджуючої води. Усі ці вимоги та обмеження є частиною комплексного виробництва силових кабелів, і виробники самостійно обирають ці значення.

На основі проведеного аналізу сформовано узагальнену модель керування процесом екструзії, що представлена на рис. 2.

Лінійна швидкість процесу екструзії характеризує швидкість переміщення кабелю вздовж виробничої лінії та визначає режим його витягування і намотування. Вона формується в результаті узгодженої роботи механізмів витягування та прийому, які забезпечують безперервний рух кабелю.

Основне регулювання швидкості здійснюється приводами видачі, відводу та прийому, причому її значення має залишатися стабільним для запобігання виникненню дефектів продукції. Для цього необхідна синхронна робота приводів із взаємним узгодженням їх швидкісних режимів, що дозволяє підтримувати постійну лінійну швидкість і забезпечувати рівномірність товщини ізоляційного покриття.

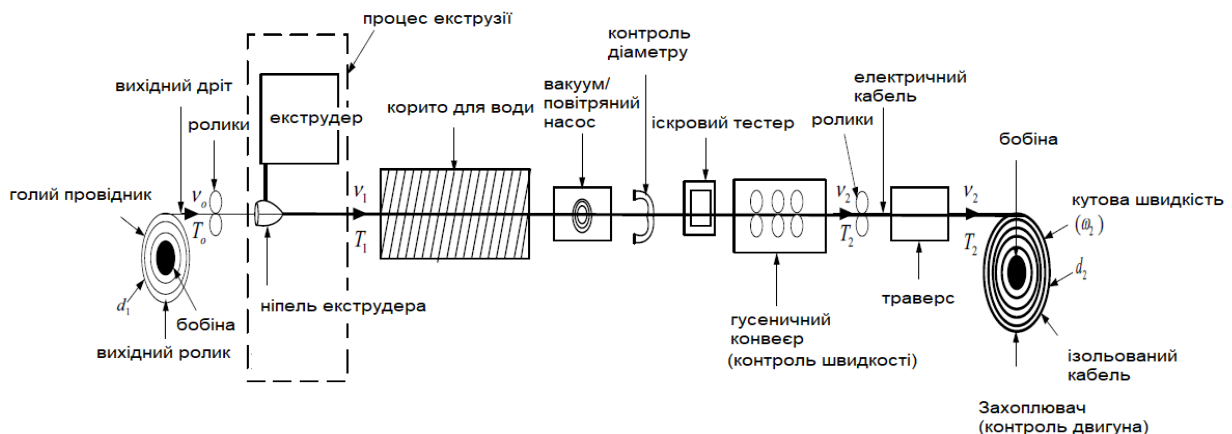


Рис. 1. Функціональна схема лінії екструзії електричного кабелю

З огляду на те, що екструзійні лінії часто працюють на високих швидкостях, навіть незначні відхилення параметрів можуть призвести до суттєвого зростання кількості браку. Тому ефективне керування швидкістю приводів є критично важливим для забезпечення стабільності технологічного процесу та отримання кабельної продукції високої якості.

Отже, ключовим параметром, що підлягає контролю, є лінійна швидкість переміщення дроту в екструзійній лінії. Її формування та підтримання забезпечуються трьома електроприводами: видачі, відводу та прийому. Привід видачі здійснює розмотування дроту з вихідної бобіни та подачу його до екструдера, привід відводу протягує дріт через зону екструзії та охолодження, а привід прийому відповідає за намотування готового кабелю на приймальну бобіну.

Для забезпечення стабільності технологічного процесу необхідно здійснювати безперервний контроль швидкості в режимі реального часу із застосуванням відповідних регуляторів, що підтримують узгоджену роботу всіх приводів.

У виробництві електричних кабелів зазвичай використовують електроприводи постійного

струму для ділянки відводу, тоді як на ділянках видачі та прийому застосовуються асинхронні двигуни. У деяких випадках також можуть використовуватися сервоприводи.

Регулювання швидкості таких приводів здійснюється шляхом зміни параметрів електродвигуна, зокрема опору якоря, магнітного потоку або напруги живлення.

Збільшення напруги або магнітного потоку призводить до підвищення швидкості обертання двигуна, тоді як збільшення опору, навпаки, зменшує швидкість як самого двигуна, так і руху кабелю по лінії.

Моделювання роботи системи здійснювалося з використанням пакету прикладних програм MATLAB Simulink. Було розроблено модель для електропривода постійного струму ділянки відводу та асинхронного привода ділянки прийому. У процесі дослідження застосовано регулятор із пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом керування, а також контролер на основі нечіткої логіки (рис. 3).

Для налаштування параметрів регуляторів для ліній прийому та відводу використовували утиліту MATLAB/Simulink/Autotuning. В результаті нала-

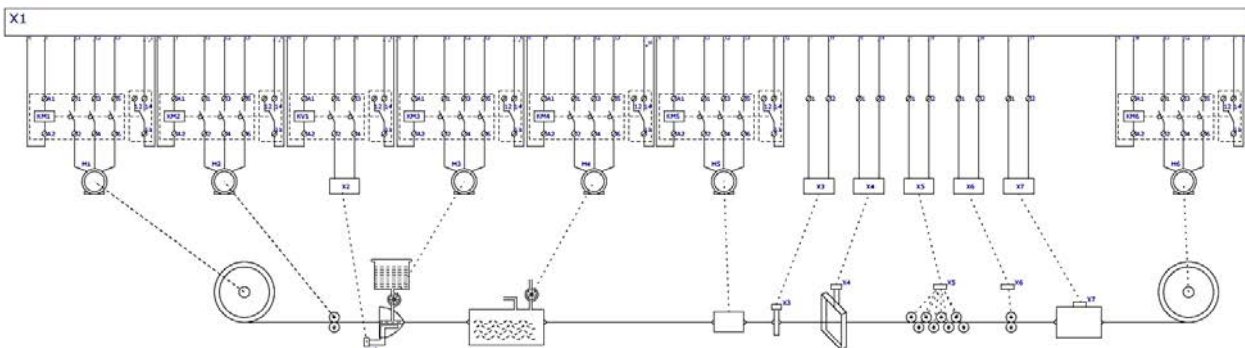


Рис. 2. Схема електрична принципова прототипу системи керування

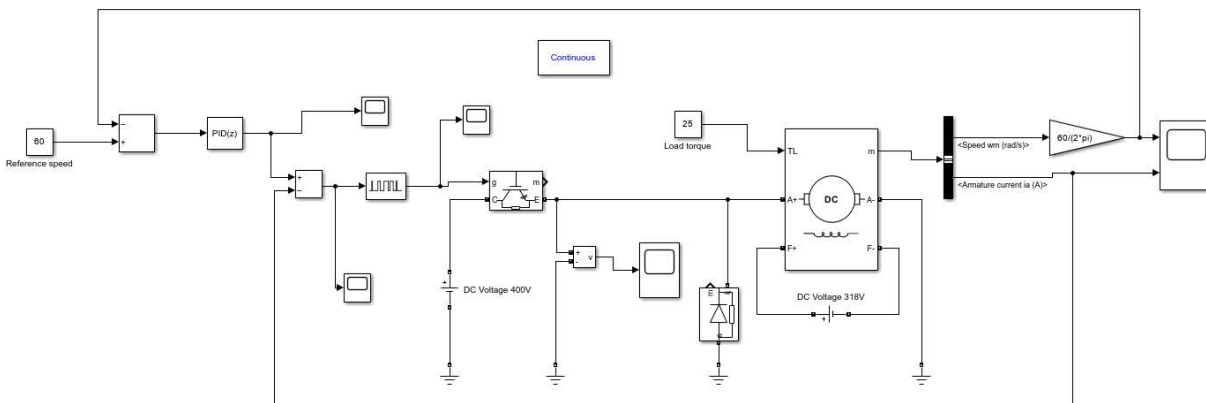


Рис. 3. Модель системи керування лінією відводу із застосуванням ПІД регулятора

Таблиця 1
Значення коефіцієнтів ПІД регуляторів для системи керування.

Вид системи	Параметри ПІД регулятора		
	K_p	K_i	K_d
Система відводу	54.00	324.32	2.23
Система прийому	24.00	58.40	2.47

штувань ПІД регуляторів приведені в таблиці 1, де параметри контролера включають пропорційне посилення (K_p), інтегральне посилення (K_i) і похідний диференціал (K_d).

Двигун постійного струму для витягування та серводвигун змінного струму для приймання були змодельовані окремо, але з такою ж заданою швидкістю 60 м/хв, що й швидкість екструзійної лінії, і тим самим крутним моментом навантаження 25 Нм, як навантаження всієї екструзійної лінії. Це пояснюється тим, що коли швидкість намотувального приводу падає через накопичення ваги на бобіні в результаті намотування кабелю на бобіну, контролер повинен забезпечити подачу більшого струму до натяжного двигуна, щоб збільшити крутний момент і привести двигун до необхідної або заданої швидкості, щоб підтримувати постійну швидкість лінії.

Висновки. Проведений аналіз технологічного процесу виготовлення електричних кабелів

підтвердив необхідність ефективного керування швидкістю та натягом дроту під час його проходження через екструдер, оскільки їхні відхилення можуть призводити до нерівномірності нанесення ізоляційного шару. Встановлено, що контроль лінійної швидкості кабелю є ключовим технічним завданням, від якого залежить підвищення продуктивності, покращення якості продукції та зменшення рівня браку. З урахуванням високих швидкостей виробництва навіть незначні похибки в регулюванні електроприводів можуть суттєво впливати на кінцеві характеристики виробу, що обумовлює необхідність синхронної роботи приводів для забезпечення стабільної товщини ізоляції.

У роботі запропоновано електричну принципову схему прототипу системи керування екструзійною лінією та розроблено модель системи керування ділянкою відводу із застосуванням ПІД-регулятора. Результати моделювання засвідчили, що ПІД-регулятор є ефективним інструментом забезпечення стабільної та точної швидкості роботи екструзійної лінії.

Крім того, проаналізовано можливості застосування контролера нечіткої логіки для автоматизованого регулювання параметрів технологічного процесу. Для обох підходів проведено моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило оцінити їх ефективність та перспективи впровадження у виробничих умовах.

Список літератури:

1. Kosar V., Gomzi Z. Modeling of the power cable production line. *Thermochimica Acta*. 2007. Vol. 457, no. 1-2. P. 70–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.02.020>.
2. Severengiz M., Sprenger T., Seliger G. Challenges and Approaches for a Continuous Cable Production. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 40. P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.040>.
3. Manohar B., Chinnapalaniandi P. Computational fluid dynamics simulation of single screw extruders in cable industries. 2016. Т. 05, № 03. С. 85–89.
4. Sousa V. F. C. et al. Developing a Novel Fully Automated Concept to Produce Bowden Cables for the Automotive Industry. *Machines*. 2022. Vol. 10, no. 5. P. 290. URL: <https://doi.org/10.3390/machines10050290>.
5. Ostroverkhov M., Silvestrov A., Kryvoboka G. Identification of the parameters of the cable production process. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, no. 1(37). P. 29–34.
6. Armghan H. et al. Design of integral terminal sliding mode controller for the hybrid AC/DC microgrids involving renewables and energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 119. P. 105857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105857>.
7. X. Chu X. Nian, X. Fu. Tension Control of Web Winding Systems for Speed-up Phase. 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang, China. 2020. p. 1756-1761. doi:10.23919/CCC50068.2020.9189375.
8. Оробчук Б., Сисак І., Бабюк С. Автоматизована система релейного захисту від замикань на землю. *Вісник ТНТУ*. 2012. Т. 66, № 2. С. 198–206.
9. Fadhe F. S., Noaman S. F. The Generalized Backstepping Control Method for Stabilizing and Solving Systems of Multiple Delay Differential Equations. *Al-Nahrain Journal of Science*. 2018. Vol. 00, no. 1. P. 150–156. URL: <https://doi.org/10.22401/anjs.00.1.20>.
10. Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації [Електронний ресурс] : підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-проф. прогн. «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / С. П. Вислоух та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 267 с.

Filippova M.V., Bohdan H.A., Demchenko M.O. CONTROL OF THE ELECTRICAL CABLE EXTRUSION PROCESS

This work presents a comprehensive study of the technological cycle of electrical cable manufacturing, with a specific focus on the insulation coating stage using the extrusion method. The relevance of this research is driven by the stringent requirements for the performance characteristics of modern cable products, such as thermal stability, dielectric strength, and resistance to environmental factors. It has been established that the key factor determining the quality of the finished product and the stability of the insulation's geometric parameters is the precision of speed mode synchronization across the various drive mechanisms of the production line. The analysis of recent publications reveals that existing automation approaches—particularly those utilizing artificial neural networks and finite volume methods—allow for the prediction of polymer flow parameters; however, the issues of dynamic delay and signal noise within the insulation layer thickness control loops remain unresolved. Particular attention is paid to identifying the critical nodes of the production system: the payoff (feed), haul-off (take-out), and take-up (winding) drives. The paper presents the development and description of a functional model of the extrusion line. The necessity of controlling the linear speed of the cable is substantiated, as any desynchronization between the haul-off device and the take-up bobbin leads to variations in insulation thickness, which results in significant scrap rates at high operating speeds. The scientific novelty of this work lies in the proposed control scheme based on high-precision AC and DC electric drives integrated into a unified regulation system. Mathematical modeling of the system was implemented using the MATLAB Simulink environment. The study provides a comparative analysis of the application of a classical PID controller and a fuzzy logic controller. By utilizing the Autotuning toolset, the optimal proportional (K_p), integral (K_i), and derivative (K_d) gain coefficients for the haul-off and take-up loops were determined. Simulation results confirmed that the proposed PID controller architecture provides effective compensation for disturbances caused by changes in load torque as the weight of the cable accumulates on the bobbin. The system demonstrates high precision in tracking the setpoint speed (60 m/min) and exhibits stability in transient processes. The implementation of the developed control algorithms allows for the minimization of human error, an increase in line productivity, and the ensuring of uniform insulation application in accordance with international quality standards.

Keywords: Automation, cable production, wire tension, insulation, control system, efficiency, quality, technological process, extruder, control.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026