

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ**

**Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису**

БЕЗУГЛИЙ ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК: 687.053:678.026.3]-048.78(043)

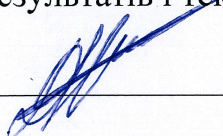
ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ШВЕЙНИХ МАШИН ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОМПОЗИТНИХ ВИРОБІВ**

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


Д.М. Безуглий

Науковий керівник: -

Манойленко Олександр Петрович,
кандидат технічних наук,
доцент

Київ - 2025

АНОТАЦІЯ

Безуглий Д. М. Удосконалення швейних машин для виготовлення армуючих елементів композитних виробів.- Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 133-«Галузеве машинобудування». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено удосконаленню обладнання для виготовлення армуючих елементів композитних виробів з метою автоматизації виробничого процесу, підвищення якості продукції та розширення сфер застосування в легкій, авіаційній, автомобільній, оборонній та інших галузях.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення механізму подачі нитки швейних машини однопниткового ланцюгового стібка типу 101 з урахуванням змін товщини матеріалу, довжини стібка та параметрів механізму, що впливають на стабільність і якість армування 2D- і 3D-текстильних конструкцій армуючих елементів преформ.

Об'єкт дослідження: Швейні машини для утворення однопниткового ланцюгового зокрема механізми подачі нитки, переміщення матеріалу, голки та розширювача.

Предмет дослідження: Удосконалення швейних машин для виготовлення армуючих елементів композитних виробів на основі встановлення законів руху робочих органів механізмів подачі нитки при змінній товщині матеріалів, що зшиваються, та довжині стібка.

Наукова новизна роботи полягає в теоретичному та експериментальному обґрунтуванні удосконалення швейних машин для виготовлення армуючих елементів композитних виробів з автоматизованим регулюванням подачі нитки при формуванні однопниткового ланцюгового стібка.

Зокрема, основними результатами, що містять наукову новизну є такі.

Вперше:

- встановлено закономірності процесу утворення одониткового ланцюгового стібка з урахуванням взаємодії робочих органів механізму подачі нитки з матеріалами, що зшиваються;
- побудовано узагальнену аналітичну модель функції необхідної подачі нитки з урахуванням градієнтної оцінки її зміни залежно від технологічних параметрів стібка;
- експериментально визначено зусилля натягу нитки під час зшивання матеріалів різної товщини;
- побудовано узагальнену синхрограму роботи функціональних механізмів швейної машини, для зшивання багат шарових текстильних матеріалів.

Набули подальшого розвитку:

- підходи до визначення функцій дійсної та необхідної подачі нитки з урахуванням змін товщини матеріалів, що зшиваються, та довжини стібка;
- використання регресійного моделювання для визначення конструктивних параметрів механізму подачі нитки;
- використання методу Монте-Карло для синтезу параметрів механізмів подачі нитки.

Удосконалено:

- класифікацію текстильних армуючих елементів шляхом виокремлення двох рівнів класифікації: за способом їх формування і за технологією створення цілісної просторової форми.
- конструктивну схему механізму для автоматизованого регулювання подачі нитки.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в можливості застосування її результатів для проектування, модернізації та дослідження механізмів подачі нитки в швейних машинах ланцюгового стібка.

Зокрема:

- запропоновану функцію необхідної подачі нитки можна використовувати як еталонну при розрахунку механізмів у системах автоматизованого проєктування (CAD/CAE/CAM);
- розроблені регресійні моделі забезпечують інженерну оцінку впливу технологічних параметрів стібка на подачу нитки та можуть бути застосовані для адаптивного керування процесом зшивання у тому числі для розроблення автоматизованих механізмів;
- результати оптимізаційного синтезу параметрів механізму подачі нитки придатні для модернізації швейного обладнання орієнтованого на виготовленні армуючих текстильних структур для композитних виробів;
- удосконалена швейна машина, оснащена приладами для вимірювання подачі нитки та зусиль її натягу, може бути використана як дослідна установка для подальших наукових досліджень, або в лабораторному практикуму;
- створена експериментальна база може застосовуватись в освітньому процесі підготовки фахівців механічних та технологічних спеціальностей.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд сучасних класифікацій текстильних армуючих елементів за вимірністю (1D, 2D, 2.5D, 3D, 4D), орієнтацією волокон і технологією формування. Проаналізовано основні підходи до створення армуючих структур, зокрема за допомогою ткацтва, трикотажу, в'язання, вишивання, зшивання, тафтингу та Z-штифтування. Оцінено їхню придатність до виготовлення композитних 2D- і 3D-конструкцій. Розглянуто основні критерії вибору способу формування армуючих елементів залежно від умов експлуатації майбутнього виробу. Проаналізовано особливості пошарового та наскрізного армування, переваги використання

гнучких ниткових зв'язків у якості зміцнювальних елементів у багатошарових пакетах. Окрему увагу приділено аналізу кінематичних умов формування однопниткового ланцюгового стібка типу 101 основними способами. Розглянуто взаємодію голки, розширювача та ниткоподавача, їхній узгоджений рух у процесі утворення стібка, а також вплив конструктивних особливостей механізмів на якість з'єднання шарів текстильного матеріалу. Узагальнено конструктивні схеми основних механізмів швейних машин цього типу, виявлено недоліки типових рішень щодо автоматичного регулювання подачі нитки. Показано відсутність повних циклограм і синхрограм, адаптованих до умов змінної товщини зшиваних матеріалів, що ускладнює проектування механізмів для високоякісного армування. Сформульовано основні задачі подальшого дослідження, спрямовані на побудову моделей подачі нитки, розроблення конструкцій із можливістю автоматизованого регулювання та створення узагальненої синхрограми.

У **другому розділі** представлено комплексне теоретичне дослідження, спрямоване на вдосконалення процесів формування армуючих текстильних структур для композитних матеріалів, з акцентом на механічні аспекти їх побудови.

Насамперед, було удосконалено класифікацію текстильних армуючих преформ, що враховує тип волокна, метод формування, ступінь структурної впорядкованості та просторову орієнтацію армуючих елементів. Класифікація базується на провідних технологіях – ткацтві, плетінні, в'язанні та шитті, які визначають геометрію та механічну поведінку текстильних каркасів.

Для опису взаємодії матеріалів, інструментів, виконавчих механізмів і мехатронних модулів побудовано об'єктно-орієнтовану модель механіко-технологічної системи. Вона дозволяє встановити недоліки та переваги обраних технологій та визначити компоновку обладнання.

У межах дослідження проаналізовано процес утворення однопниткового ланцюгового стібка типу 101. Це дозволило визначити характерні моменти і періоди у процесі утворення стібка. Визначено функції положення основних

виконавчих органів – голки, ниткоподавача, розширювача та зубчастої рейки. На основі цього створено типову синхрограму їх взаємодії з урахуванням кінематичних параметрів механізмів. Отримані залежності функцій дійсної подачі нитки та методи їх оцінки дозволяють встановити ступінь відповідності цих функцій, а наведені методи апроксимації будуть застосовані для аналізу і синтезу механізмів зі складними законами руху.

Для глибшого аналізу взаємодії нитки з матеріалом запропоновано трирівневу модель силової рівноваги в стібку, яка враховує пружні властивості нитки, напрямки сил та геометрію зони з'єднання на мікро-, міні- та макрорівнях.

Окрему увагу приділено створенню ієрархічної моделі структури 3D текстильної системи, сформованої на основі в'язання, ткацтва, плетіння та швейного з'єднання. Ця модель побудована відповідно до об'єктно-орієнтованого підходу з урахуванням механічної взаємодії волокон і вузлів, що дозволяє її інтегрувати в CAD/CAE-системи.

Отримані результати формують наукову й методичну базу для розробки адаптивних механізмів подачі нитки, проєктування сучасного швейного обладнання та автоматизованих систем виготовлення армуючих елементів у композитних виробах.

У **третьому розділі** подано результати аналітичного та експериментального дослідження механізмів швейної машини типу GK-9-2 при формуванні одониткового ланцюгового стібка типу 101. Побудовано функції положення основних робочих органів машини – $S(\varphi)$, $L(\varphi)$, $Z(\varphi)$, $T(\varphi)$, а також функції дійсної та необхідної подачі нитки – $P(\varphi)$ і $P'(\varphi)$. На основі цих даних сформовано типову синхрограму, яка дозволила комплексно оцінити кінематичну узгодженість органів і визначити фазові кути ключових моментів процесу утворення стібка.

Дослідження показало, що дійсна подача нитки перевищує необхідну на 6,2–64,4 %, що призводить до нестабільності формування стібка. Надлишок нитки створює надмірну подачу нитки, що призводить до ускладнення затягування стібка, збільшує знос нитки, перетягування в стібку, що негативно

впливає на якість і структуру шва. Найбільше перевищення зафіксовано при $m=0,4$ мм і $t = 8$ мм ($P = 53,3$ мм проти ≈ 30 мм).

Для опису функцій подачі побудовано поліноміальні моделі 3–6-го порядку ($R^2 \geq 0,99$), придатні для CAD/CAE-аналізу. Крім того, експериментально досліджено зусилля натягу нитки: при зростанні товщини матеріалу в 20 разів натяг збільшується у 5 разів (до 6,2 Н), що потребує адаптації механізму.

Двофакторний регресійний аналіз показав домінування впливу товщини матеріалу (x_1) у фазах 10° – 60° і 320° – 360° , тоді як довжина стібка (x_2) має вплив у межах 70° – 310° . Через сталість x_2 у виробничих умовах, її вплив є менш суттєвим. Коефіцієнт взаємодії a_{12} виявився значущим у 31,6 % точок (порогове значення – 0,05), тому за межами локальних зон його можна опускати без втрати точності.

Максимальний модуль градієнта подачі нитки спостерігається при $\varphi=170^\circ$, у фазі скидання попередньої петлі. Незважаючи на значну миттєву зміну напрямку подачі, в реальному процесі цей перехід розтягнутий у часі, що нівелює вплив цього фактору на стабільність стібка.

Сформована синхрограма дозволила простежити взаємодію всіх функціональних органів машини. Аналіз функцій положення робочих органів виявив потенційно нестабільні ділянки в роботі при збільшенні технологічних параметрів стібка та підтвердив узгодженість фаз можливого транспортування матеріалів. Порівняння аналітичних і графічних методів (реалізованих у дослідженні) засвідчило відхилення в межах $0,1^\circ$ – $2,9^\circ$, що відповідає критеріям інженерної точності.

Отримані результати підтверджують адекватність побудованих моделей і створюють надійну основу для проєктування нового адаптивного механізму подачі нитки, здатного забезпечити стабільну якість стібка при змінних технологічних умовах.

У **четвертому розділі** представлено розробку нового механізму подачі нитки з автоматизованим регулюванням, який передбачає використання

додаткового ниткоподавача та нитконапрямників, кінематично пов'язаних із пристроєм притискної лапки. Побудовано функції положення робочих елементів механізму та визначено раціональні параметри ниткоподавачів і нитконапрямників. Запропоновано конструкцію з розгалуженим кінематичним ланцюгом, реалізовано алгоритм оптимізаційного синтезу на основі методу Монте-Карло, що дозволило отримати раціональні геометричні параметри пристрою. Проведено експериментальну перевірку функцій подачі нитки та зусиль натягу на модернізованій машині. Порівняльний аналіз показав, що розроблена конструкція забезпечує зменшення навантажень, підвищення стабільності утворення стібка, а також має більшу відповідність функції необхідної подачі нитки при змінних параметрах зшивання. Встановлено перспективність застосування запропонованого механізму для створення армуючих 2D- і 3D-текстильних структур.

Ключові слова: армуючі елементи, текстильні преформи, композитні матеріали, 2D і 3D структури, механізм подачі нитки, швейна машина, ланцюговий стібкоутворювач, адаптивний механізм, синхрограма, об'єктно-орієнтована модель, зусилля затягування стібка, поліноміальна модель, регресійна модель, надміцні матеріали.

ABSTRACT

Bezuhlyi D. M. Improvement of sewing machines for the production of reinforcing elements of composite products. – Qualification thesis in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 – “Industrial Engineering”. – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the improvement of equipment for the production of reinforcing elements of composite products with the aim of automating the production process, improving product quality, and expanding application areas in the light, aerospace, automotive, defense, and other industries.

The aim of the dissertation is to improve the thread feeding mechanism of single-thread chain stitch type 101 sewing machines, taking into account changes in material thickness, stitch length, and mechanism parameters that affect the stability and quality of reinforcement in 2D and 3D textile preform structures.

Object of research: Sewing machines for forming single-thread chain stitches, in particular, the mechanisms for thread feeding, material feeding, needle motion, and spreader control.

Subject of research: Improvement of sewing machines for the production of reinforcing elements of composite products based on determining the motion laws of the thread feeding mechanisms under varying thicknesses of joined materials and stitch lengths.

The scientific novelty of the work lies in the theoretical and experimental substantiation of improving sewing machines for the production of reinforcing elements of composite products with automated thread feed regulation during the formation of a single-thread chain stitch.

In particular, the main results containing scientific novelty are as follows.

For the first time:

- the patterns of the formation process of a single-thread chain stitch were established, taking into account the interaction of the thread feeding mechanism's working elements with the materials being stitched;
- a generalized analytical model of the required thread feed function was

built, taking into account the gradient estimation of its change depending on the technological parameters of the stitch;

- the thread tension forces during stitching of materials of different thicknesses were experimentally determined;

- a generalized synchronogram of the operation of the functional mechanisms of the sewing machine for stitching multilayer textile materials was developed.

Further developed:

- approaches to determining the actual and required thread feed functions, taking into account changes in the thickness of stitched materials and stitch length;

- the use of regression modeling to determine the design parameters of the thread feeding mechanism;

- the application of the Monte Carlo method for the synthesis of thread feeding mechanism parameters.

Improved:

- the classification of textile reinforcing elements by distinguishing two levels of classification: by formation method and by the technology of creating an integrated spatial form;

- the structural scheme of a mechanism for automated thread feed regulation.

The practical significance of the dissertation lies in the possibility of applying its results for the design, modernization, and study of thread feeding mechanisms in chain stitch sewing machines.

In particular:

- the proposed required thread feed function can be used as a reference when designing mechanisms in automated design systems (CAD/CAE/CAM);

- the developed regression models provide engineering assessment of the influence of stitch technological parameters on thread feeding and can be applied for adaptive control of the stitching process, including in the development of automated

mechanisms;

- the results of optimal synthesis of the thread feeding mechanism parameters are suitable for modernizing sewing equipment focused on the production of reinforcing textile structures for composite products;
- the improved sewing machine, equipped with instruments for measuring thread feed and tension forces, can be used as an experimental setup for further scientific research or in laboratory practice;
- the experimental base created can be used in the educational process for training specialists in mechanical and technological fields.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the aim and objectives of the research, and defines the scientific novelty and practical value of the obtained results. Information is provided regarding the approbation of the work, the personal contribution of the applicant, and publications. The connection of the work with scientific programs and topics is indicated.

The first section presents an analytical review of modern classifications of textile reinforcing elements by dimensionality (1D, 2D, 2.5D, 3D, 4D), fiber orientation, and formation technology. The main approaches to creating reinforcing structures are analyzed, in particular by weaving, knitting, embroidery, stitching, tufting, and Z-pinning. Their suitability for the production of composite 2D and 3D structures is evaluated. The main criteria for choosing the method of forming reinforcing elements depending on the operating conditions of the future product are considered. The features of layer-by-layer and through-thickness reinforcement and the advantages of using flexible thread connections as reinforcing elements in multilayer assemblies are analyzed. Special attention is given to the analysis of kinematic conditions for forming a type 101 single-thread chain stitch by basic methods. The interaction of the needle, spreader, and thread feeder, their coordinated movement during stitch formation, and the influence of mechanism design features on the quality of joining textile material layers are considered. The structural schemes of the main mechanisms of sewing machines of this type are generalized, and deficiencies in typical solutions for automatic thread feed regulation are identified. The lack of

complete timing diagrams and synchronograms adapted to variable material thickness conditions is shown, which complicates the design of mechanisms for high-quality reinforcement. The main tasks for further research are formulated, aimed at building thread feed models, designing mechanisms with automated regulation, and creating a generalized synchronogram.

The second section presents a comprehensive theoretical study aimed at improving the formation processes of textile reinforcing structures for composite materials, with an emphasis on the mechanical aspects of their construction.

First of all, a classification of textile reinforcing preforms was improved, taking into account fiber type, formation method, degree of structural ordering, and spatial orientation of reinforcing elements. The classification is based on leading technologies – weaving, braiding, knitting, and sewing, which define the geometry and mechanical behavior of textile frames.

An object-oriented model of the mechano-technological system was developed to describe the interaction of materials, tools, actuating mechanisms, and mechatronic modules. It allows identifying the advantages and disadvantages of selected technologies and determining equipment layout.

The formation process of a single-thread chain stitch type 101 was analyzed, allowing the identification of characteristic moments and periods in the stitch formation process. The position functions of the main actuating elements – the needle, thread feeder, spreader, and feed dog – were determined. Based on this, a typical synchronogram of their interaction was created, taking into account the kinematic parameters of the mechanisms. The obtained actual thread feed functions and methods for their evaluation allow determining the degree of matching between these functions, and the proposed approximation methods are applicable for analysis and synthesis of mechanisms with complex motion laws.

To deepen the analysis of thread-material interaction, a three-level force equilibrium model in the stitch was proposed, which considers the elastic properties of the thread, force directions, and geometry of the joining zone at micro-, meso-, and macro-levels.

Special attention was given to creating a hierarchical model of a 3D textile structure formed through knitting, weaving, braiding, and sewing. This model is built according to the object-oriented approach, considering the mechanical interaction of fibers and nodes, enabling integration into CAD/CAE systems.

The results obtained form a scientific and methodological basis for the development of adaptive thread feeding mechanisms, design of modern sewing equipment, and automated systems for producing reinforcing elements in composite products.

The third section presents the results of analytical and experimental studies of the mechanisms of the GK-9-2 sewing machine during the formation of a single-thread chain stitch type 101. Position functions of the machine's main working parts - $S(\varphi)$, $L(\varphi)$, $Z(\varphi)$, $T(\varphi)$, as well as actual and required thread feed functions $P(\varphi)$ and $P'(\varphi)$, were constructed. Based on these data, a typical synchronogram was created, allowing a comprehensive assessment of the kinematic coordination of the mechanisms and the determination of phase angles of key stitch formation moments.

The study showed that the actual thread feed exceeds the required one by 6.2–64.4%, resulting in unstable stitch formation. Excess thread feed complicates stitch tightening, increases thread wear, and causes overstretching in the stitch, negatively affecting seam quality and structure. The greatest overfeed was recorded at $m=0,4$ mm and $t=8$ mm ($P = 53.3$ mm versus ≈ 30 mm).

Polynomial models of 3rd–6th order ($R^2 \geq 0.99$) suitable for CAD/CAE analysis were constructed to describe feed functions. Additionally, thread tension was experimentally studied: as material thickness increased 20-fold, tension increased 5-fold (up to 6.2 N), necessitating mechanism adaptation.

Two-factor regression analysis showed that material thickness (x_1) dominates in phases 10° – 60° and 320° – 360° , while stitch length (x_2) affects the range of 70° – 310° . Since x_2 is constant under production conditions, its effect is less significant. The interaction coefficient a_{12} was significant in 31.6% of points (threshold – 0.05), so outside local zones it may be omitted without loss of accuracy.

The maximum gradient of thread feed occurs at $\varphi=170^\circ$, in the loop release

phase. Despite significant instantaneous direction changes, the real process is time-stretched, which offsets this factor's influence on stitch stability.

The synchronogram allowed tracking the interaction of all functional parts of the machine. Analysis of the position functions revealed potentially unstable operation zones at increased stitch parameters and confirmed phase agreement for material transport. A comparison of analytical and graphical methods implemented in the study showed deviation within 0.1° - 2.9° , meeting engineering accuracy criteria.

The results confirm the adequacy of the developed models and provide a reliable basis for designing a new adaptive thread feeding mechanism capable of ensuring stable stitch quality under variable technological conditions.

The fourth section presents the development of a new thread feeding mechanism with automated regulation, which includes an additional thread feeder and thread guides kinematically linked to the presser foot unit. Position functions of the mechanism's working elements were constructed, and optimal parameters for thread feeders and guides were determined. A design with a branched kinematic chain was proposed, and an optimization synthesis algorithm based on the Monte Carlo method was implemented, which allowed obtaining rational geometric parameters of the device. Experimental verification of thread feed functions and tension forces on the upgraded machine was conducted. A comparative analysis showed that the developed design reduces loads, improves stitch formation stability, and better matches the required thread feed function under variable stitching conditions. The proposed mechanism is found to be promising for forming reinforcing 2D and 3D textile structures.

Keywords: reinforcing elements, textile preforms, composite materials, 2D and 3D structures, thread feeding mechanism, sewing machine, chain stitch, adaptive mechanism, synchronogram, object-oriented model, stitch tightening force, polynomial model, regression model, high-strength materials.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у зарубіжних та наукових фахових виданнях України, внесених до міжнародних наукометричних баз:

1)) Orlovsky, B.V., Manoilenko, O.P., **Bezuhlyi, D.M.** (2023). Object-Oriented Analysis of Frame 3D Textile Structures. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), 10(2), 26-C35. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).c4) - (Q2) (Особистий внесок автора: розробка методів, підходів, аналітичні дослідження, візуалізація, оформлення, консолідація висновків).

2) Manoilenko, Oleksandr & Dvorzhak, Volodymyr & Horobets, Vasyl & Panasiuk, Igor & **Bezuhlyi, Dmytro** (2024). Assessing the impact of sewing machine thread take-up mechanism parameters on the magnitude and nature of thread take-up. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1(132)), 64-75. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315129> - (Q3) (Особистий внесок автора: формування ідеї дослідження, постановка проблеми, визначення мети, математичне моделювання, візуалізація, розрахунки, оформлення, консолідація висновків).

3) Манойленко О.П., **Безуглий Д.М.**, Горобець В., Бурмістенков О.

Аналітичне дослідження механізмів подачі ідеальної нитки швейних машин одониткового ланцюгового стібка типу 101 / О.П. Манойленко, Д.М. Безуглий, В. Горобець, О. Бурмістенков // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. - 2025. - Т. 351, № 3.1. - С. 341-350. - <https://doi:10.31891/2307-5732-2025-351-43>

<https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1831/1753>

(Особистий внесок автора: формування ідеї дослідження, постановка проблеми, визначення мети, розробка методів та засобів експериментальних дослідження, візуалізація, розрахунки, оформлення, консолідація висновків).

2.Опубліковані наукові праці апробаційного характеру:

1. **Безуглий Д. М.,** Манойленко О. П. 3D каркасні текстильні вироби та їх застосування // Мехатронні системи: інновації та інженерінг : тези доп. 5-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 2021 р., Київ. - Київ : КНУТД, 2021. - С. 113-114. - URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19221/1/MSIE_2021_P113-114.pdf
2. **Безуглий Д. М.,** Гайдук Д. О., Манойленко О. П. Розроблення 3D каркасних технологій текстильних матеріалів з елементами 3D друку // Мехатронні системи: інновації та інженерінг : тези доп. 6-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 2022 р., Київ. - Київ : КНУТД, 2022. - С. 92-93. - URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20716/1/MSIE_2022_P092-093.pdf
3. Орловський Б. В., Манойленко О. П., **Безуглий Д. М.** Об'єктно-орієнтований аналіз каркасних 3D текстильних структур // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023) : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 трав. 2023 р., Чернігів. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. - Т. 1. - С. 304-306. - URL: <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf>
4. **Безуглий Д. М.,** Манойленко О. П. Технологічні процеси створення 3D каркасних конструкцій пресформ на базі швейних технологій // Мехатронні системи: інновації та інженерінг : тези доп. 7-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 2023 р., Київ. - Київ : КНУТД, 2023. - С. 132-133. - URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/26014/1/MSIE_2023_P132-133.pdf
5. **Безуглий Д. М.,** Руснак Ю. В., Манойленко О. П. Дослідження процесу подачі нитки при утворенні однопниткового ланцюгового стібка // Мехатронні системи: інновації та інженерінг : тези доп. 8-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 2024 р., Київ. - Київ : КНУТД, 2024. - С. 32-34. - URL: <https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/28800/1/MSIE%202024-1-2-289-32-34.pdf>

6. Маноїленко О. П., **Безуглий Д. М.** Механізм подачі нитки швейної машини з дискретним регулюванням залежно від товщини матеріалу // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2025) : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., 22-23 трав. 2025 р., Чернігів. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. - Т. 1. - С. 245-246. - URL: https://drive.google.com/file/d/1Lg5F4lEpuJ_dOIOutouc6sNKm7frj8vvZ/view?usp=s_haring

7. **Безуглий Д. М.**, Маноїленко О. П. Експериментальне дослідження впливу технологічних факторів стібка на функцію необхідної подачі нитки // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2025) : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., 22-23 трав. 2025 р., Чернігів. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. - Т. 1. - С. 247-248. - URL: https://drive.google.com/file/d/1Lg5F4lEpuJ_dOIOutouc6sNKm7frj8vvZ/view?usp=s_haring

8. **Безуглий Д. М.**, Маноїленко О. П. Розроблення класифікації текстильних армуючих преформ для композитних виробів // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2025) : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., 22-23 трав. 2025 р., Чернігів. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. - Т. 1. - С. 260-262. - URL: https://drive.google.com/file/d/1Lg5F4lEpuJ_dOIOutouc6sNKm7frj8vvZ/view?usp=s_haring Особистий внесок: постановка та реалізація експериментальних досліджень, формулювання висновків

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1	29
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	29
1.1 Аналіз та характеристика композитних виробів	29
1.2 Аналіз основних процесів формування композитних виробів	31
1.3 Структура та характеристика текстильних виробів	32
1.3.1 Вимірність текстильних матеріалів	32
1.3.2 Структурно-технологічні особливості текстильних армувальних елементів	35
1.4 Аналітичний огляд з існуючих класифікацій текстильних виробів	48
1.5 Аналітичний огляд конструкцій армуючих текстильних елементів та їх властивостей	51
1.6 Аналіз досліджень властивостей армуючих елементів	56
1.7 Аналітичний огляд технологічних процесів утворення ланцюгових стібків типу 10162	
1.8 Аналіз механізмів швейних машин для утворення стібка типу 101	67
1.9 Висновки до розділу 1	73
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕКСТИЛЬНИХ АРМУЮЧИХ СТРУКТУР І ЗАСОБІВ ЇХ ФОРМУВАННЯ	75
2.1 Розроблення класифікацій текстильних армуючих елементів композитних матеріалів	75
2.2 Проектування системи формування армуючих текстильних структур на основі об'єктно-орієнтованого аналізу	78
2.3 Аналіз технологічного процесу утворення стібка типу 101 на базі об'єктно-орієнтований аналізу	82
2.4 Аналіз механічних характеристик 3D текстильних структур каркасного типу з використанням об'єктно-орієнтованих моделей	86
2.4.1 Аналіз ієрархії моделей текстильних структур	86

	19
2.4.2 Ієрархічне моделювання швейних 3D структур на основі ООП	88
2.4.3 Розрахунок фізико-механічних характеристик (мікрорівень)	90
2.4.4 Аналіз силової рівноваги в стібку	96
2.5 Уточнений опис процесу утворення стібка типу	97
2.6 Розроблення проєктної синхрограми швейної машини ланцюгового стібка з урахуванням варіативних технологічних параметрів стібка	100
2.7 Аналітичне визначення функцій необхідної та дійсної подачі ідеальної нитки відповідно до характерних періодів процесу утворення стібка	104
2.7.1 Метод розрахунку, прийняті допущення та вихідні дані	104
2.7.2 Аналітичне визначення функції дійсної та необхідної подачі нитки	104
2.8 Визначення функцій положення робочих органів швейних машин	109
2.8.1 Визначення функцій положення голки $S(\varphi)$	109
2.8.2 Визначення функцій положення зубчастої рейки	111
2.8.3 Визначення функцій положення робочих органів на основі експериментальних даних і поліноміального моделювання	112
2.9 Висновки до розділу 2	114
РОЗДІЛ 3	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ШВЕЙНИХ МАШИН ЗА ЗМІННИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІБКА	116
3.1 Експериментальне дослідження механізмів подачі нитки	116
3.1.1 Опис експериментальної установки	116
3.1.2 Порядок проведення та прийняті припущення	116
3.1.3 Тарування експериментальної установки	120
3.1.4 Результати експериментальних досліджень функцій подачі нитки	123
3.1.5 Аналітичне моделювання функцій подачі нитки на основі експериментальних даних	127
3.2 Експериментальне визначення значень функцій положення робочих органів машин ланцюгового стібка типу 101	129
3.3 Аналітичне моделювання функцій подачі нитки на основі експериментальних даних	131

3.4 Аналітичне дослідження механізмів подачі ідеальної нитки швейних машин однониткового ланцюгового стібка типу 101	132
3.5 Експериментальне дослідження натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 базової машини	137
3.5.1 Опис будови експериментальної установки	137
3.5.2 Тарування вимірювального пристрою	138
3.5.5 Повторне тарування	141
3.5.6 Основні результати	141
3.6 Дослідження впливу технологічних параметрів стібка на необхідну функцію подачі нитки	143
3.6.1 Уточнення умов експерименту та побудова моделі об'єкта дослідження	143
3.6.2 Порядок проведення експерименту	144
3.6.3 Опис експериментальної установки	145
3.6.4 Послідовність проведення експерименту	145
3.6.5 Перехід від кодованих змінних до натуральних величин	148
3.6.6 Побудова рівняння регресії в натуральних змінних	149
3.7 Розроблення типової синхрограми швейної машини ланцюгового стібка типу 101 з просторовою траєкторією розширювача	152
3.8 Висновки до розділу 3	156

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ І АНАЛІЗ НОВИХ МЕХАНІЗМІВ ПОДАЧІ ГОЛКОВОЇ НИТКИ	158
4.1 Розробка структури нових механізмів подачі нитки	158
4.2 Визначення функції дійсної подачі нитки у механізмі нової конструкції та формулювання параметричних обмежень	160
4.2.1 Характеристика контурів подачі нитки нових механізмів	160
4.2.2 Аналітичне визначення функції дійсної подачі нитки механізмів подачі нитки запропонованої конструкції	163
4.2.3 Аналітичне визначення функцій положення ниткоподавачів	164

4.2.4 Дослідження впливу параметрів нитконапрямників на функцію дійсної подачі нитки	166
4.2 Оптимізаційний синтез механізму подачі нитки	170
4.2.1 Постановка задачі оптимізації та структуризація параметрів механізму	170
4.2.2 Вибір метода оптимізаційного синтезу механізму подачі голки та опис його алгоритму.	172
4.2.3 Формулювання обмежень вибору параметрів для синтезу механізму подачі нитки	174
4.2.4 Визначення вагових коефіцієнтів методом експертної оцінки	177
4.2.5 Оцінка результатів синтезу механізму подачі нитки та їх технічний аналіз	177
4.3 Експериментальна перевірка ефективності нового механізму подачі нитки та коректності отриманих аналітичних залежностей	181
4.3.1 Умови проведення експерименту	182
4.3.2 Опис експериментальної установки	182
4.3.3 Тарування експериментальної установки	185
4.3.4 Алгоритм проведення експерименту та його результати	186
4.3.5 Аналіз результатів експерименту	190
4.4 Висновки до розділу 4	192
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	194
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	195
ДОДАТКИ	216
ДОДАТОК А	
Аналітичні вирази функцій положення робочих органів, розраховані в Mathcad	217
ДОДАТОК Б	
Експериментальні значення функції подачі нитки базового механізму подачі нитки швейної машини GK9-2	223
ДОДАТОК В	
Експериментальне значення функцій положення робочих органів механізмів швейної	

машини GK9-2	232
ДОДАТОК Г	
Аналітичні значення функції положення механізмів	245
швейної машини GK-9-2	245
ДОДАТОК Д	
Експериментальні значення зусилля натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101	247
ДОДАТОК Е	
Експериментальні дані функції подачі нитки залежно від технологічних параметрів стібка типу 101, отримані за двох факторним планом експерименту	254
ДОДАТОК Є	
Розрахунок власної частоти коливання балочки	265
ДОДАТОК Ж	
Програмний скетч код Arduino для обробки даних визначення зусилля натягу нитки	266
ДОДАТОК З	
Впровадження результатів дисертаційної роботи	267

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1D- одновимірний

2D- двовимірний

3D- тривимірний

МПН - механізм подачі нитки

КВП - крайнє верхнє положення;

КНП - крайнє нижнє положення;

КЛП - крайнє лівє положення;

КПП - крайнє правє положення;

ООП - об'єктно-орієнтований підхід;

ООА -об'єктно-орієнтований аналіз;

$S(\varphi)$ - функція положення голки;

$Tu_i(\varphi)$ - функція положення і-го ниткоподавача;

$L(\varphi)$ - горизонтальна складова функції положення розширювача вздовж строчки;

$Z(\varphi)$ - поперечна складова функції положення розширювача поперек строчки;

$T(\varphi)$ - горизонтальна складова функції положення зубчастої рейки вздовж строчки;

$H(\varphi)$ - вертикальна складова функції положення зубчастої рейки;

$S_x, Tu_{ix}, L_x, Z_x, T_x, H_x$ - величини ходів, відповідно голки, і-х ниткоподавачів, розширювача та зубчастої рейки;

$P(\varphi)$ - функція дійсної подачі нитки;

$P'(\varphi)$ - функція необхідної подачі нитки;

m - товщина матеріалу;

t - довжина стібка;

c - товщина голкової пластини;

d - діаметр голки;

δ_1 - зазор між розширювачем і нижньою поверхнею голкової пластини;

$\delta_{1, 2, 3}$ - зазори між голкою та розширювачем;

μ_1 - коефіцієнт тертя нитки і матеріалу,

Δ , b , e - геометричні розміри носика розширювача, відповідно, довжина, ширина, висота;

h - довжина вістря голки;

a - перевищення верхньої поверхні розширювача та верхньої кромки вушка голки;

- висота розширювача

St - відстань від вістря голки до матеріалів при її крайньому верхньому положенні;

S_A - величина переміщення голки з крайнього нижнього її положення необхідна для утворення «петлі-напуску»;

S_B - величина що визначає положення вістря голки в момент «заколу»;

FRP- композити (Fibre Reinforced Polymer).

RTM (resin transfer molding)

PBO - Poly (p-phenylene-2,6-benzobisoxazole),

3DSC - 3D зшитий композит (Three-Dimensional Stitched Composite)

ВСТУП

У сучасних технологічно розвинених галузях дедалі ширше впроваджуються тривимірні (3D) каркасні текстильні матеріали, які забезпечують новий рівень міцності, жорсткості та стійкості до пошкоджень. Такі конструкції використовуються для армування в текстильній, авіаційній, космічній, автомобільній, суднобудівній промисловості, а також у сфері оборонної техніки, виробництві безпілотних літальних апаратів, бронежилетів, шоломів, спортивного спорядження та інших елементів конструкцій, де вимагається висока механічна ефективність.

Основною перевагою 3D каркасних текстильних виробів є здатність поєднувати матеріали з різними фізико-механічними властивостями, утворюючи композиційні структури з підвищеними характеристиками. Завдяки об'ємній архітектурі волокон, орієнтованих у трьох ортогональних напрямках, досягається рівномірна міцність, стійкість до розшарування та стабільність форми виробів.

Світова наукова школа з дослідження тривимірних текстильних структур активно формується з кінця XX століття. Значний внесок у розвиток теорії й практики 3D текстилю зробили Ко F.K. та Chou T.W. (США) [1], які обґрунтували переваги таких структур у підвищенні стійкості до розшарування та пошкодження. Практичні аспекти застосування 3D тканин для легких композитів досліджували також Mouritz A.P. (Австралія), Weilin Yu (Китай), R.S. Advani (США), зокрема у галузі авіації, де продемонстровано зниження маси конструкцій на 20-30% без втрати міцності.

Разом із розвитком автоматизованих технологій зростає роль швейних процесів у формуванні каркасів, особливо при виробництві 2D і 3D преформ з текстильних матеріалів. Однониткові ланцюгові стібки типу 101, що традиційно застосовуються для тимчасового з'єднання або зашивання, набувають нового значення як елемент технології формування армованих текстильних структур. Основною проблемою при їх застосуванні залишається неможливість точного

регулювання подачі нитки залежно від товщини матеріалу і довжини стібка, що призводить до нестабільності якості шва.

Недостатня цілісних досліджень, присвячених опису функцій подачі нитки в процесі утворення стібка типу 101, а також механізмів для їх реалізації та впливу технологічних параметрів на його структуру. Це створює наукову проблему, вирішення якої є актуальним для подальшого вдосконалення механізмів подачі нитки швейного обладнання для забезпечення процесів наскрізного армування нитковими з'єднаннями текстильних компонентів композитних виробів.

Зв'язок теми дослідження з планами науково-дослідних робіт.

Дисертація виконувалася на кафедрі механічної інженерії КНУТД у межах науково-дослідної роботи «Розробка каркасних 3D текстильних структур для композитних матеріалів та робочого процесу обладнання на засадах об'єктно-орієнтованого проєктування» (№ держреєстрації 0123U100902, 2023-2026 рр.). Автором проведено аналітичний огляд технологій і обладнання для виготовлення 2D і 3D текстильних каркасів, виконано розрахунки механізмів, розроблено окремі вузли, а також здійснено експериментальні дослідження формування однопниткового ланцюгового стібка типу 101 у багат шарових структурах.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.

Здобувачем самостійно сформульовано наукову ідею, визначено мету та завдання дослідження. Особисто розроблено методику експериментальних досліджень, побудовано аналітичні моделі функцій подачі нитки, запропоновано конструкцію нового механізму, виконано експерименти з тензометричним вимірюванням зусилля натягу, оброблено результати та сформульовано практичні рекомендації щодо застосування отриманих рішень у конструкціях швейних машин.

Апробація результатів дослідження.

Основні теоретичні положення, наукові результати та практичні розробки, викладені в дисертаційній роботі, доповідались, обговорювались та отримали позитивну оцінку на міжнародних наукових конференціях:

- на V Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інженерінг» (21-22 жовтня 2021 р., Київ, КНУТД);
- на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інженерінг» (20-21 жовтня 2022 р., Київ, КНУТД);
- на XV Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023)» (25-26 травня 2023 р., Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка»);
- на VII Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інженерінг» (19-20 жовтня 2023 р., Київ, КНУТД);
- на VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інженерінг» (травень 2024 р., Київ, КНУТД);
- на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2025)» (22-23 травня 2025 р., Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка»).

Матеріали апробації опубліковані у збірниках тез зазначених конференцій, що підтверджується авторськими публікаціями у співавторстві з науковим керівником, колегами здобувачами вищої освіти. Здобувачем особисто виконано розробку технічних рішень, моделювання процесів, аналіз результатів і формулювання висновків.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у яких повністю відображено основні результати дослідження. Із них: 2 статті - у періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus (категорії Q2, Q3), 1 стаття - у науковому фаховому виданні України (у співавторстві понад трьох осіб), 8 - у вигляді тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Наукові публікації відповідають вимогам пунктів 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44).

У публікаціях, підготовлених у співавторстві, здобувачеві належать: основні наукові ідеї, теоретичне обґрунтування, постановка експерименту, математична обробка результатів, формулювання висновків, а також реалізація досліджень у межах тематики дисертаційної роботи.

Обґрунтованість і достовірність результатів підтверджується узгодженням аналітичних моделей із результатами експериментів, що проводились на швейній машині типу GK-9-2 з використанням спеціально розробленої вимірювальної установки.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження, здійснено постановку проблеми, розроблено математичні моделі, виконано експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів дослідження. Основні результати оприлюднено на наукових міжнародних конференціях і впроваджено в освітній процес Київського національного університету технологій та дизайну.

Публікації. За темою дисертації опубліковано три наукові статті у фахових виданнях: дві - у виданнях категорії А, одна - категорії В. Апробація результатів дослідження здійснена у формі восьми тез, оприлюднених на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 194 сторінок основного тексту, 78 рисунків, 48 таблиць, список використаних джерел - 191 найменувань, додатки на 51 сторінках. Загальний обсяг дисертації - 267 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз та характеристика композитних виробів

У низці наукових праць [1-5] композити визначаються як багатофазні матеріали, що поєднують матрицю та армувальний компонент з метою досягнення заданих механічних, фізичних або хімічних властивостей. Основна увага в оглядах [4, 6] приділяється полімерним матрицям із використанням армування у вигляді волокон, тканин або каркасних структур. При цьому не всі джерела детально аналізують геометрію преформ та її вплив на просторову орієнтацію волокон і характеристики міцності.

Преформи, як зазначено в [2, 7], можуть мати ниткову, ткану, в'язану або комбіновану структуру. У ряді джерел [8, 9] також підкреслюється значення багаторівневого підходу до армування (мікро-, мезо-, макрорівень), проте комплексного аналізу переваг і недоліків кожного рівня в контексті різних виробничих задач часто бракує. Крім того, варто відзначити дослідження матеріалів зі змінними властивостями, здатних адаптуватися до впливу зовнішніх чинників, зокрема температури, вологості або навантаження.

Традиційно армування реалізується за допомогою скляних, вуглецевих, поліефірних або арамідних волокон [2], які забезпечують високу питому міцність і термостійкість, однак мають недоліки щодо маси та утилізації. Як показано в [3], ефективною альтернативою є біокомпозити з армуванням дискретними волокнами коноплі та льону, які демонструють добру адгезію до полімерної матриці за вмісту 25-30 мас. ч. За умови правильного дозування матриці такі біокомпозити зберігають когезійну міцність і мають кращі показники екологічної безпеки.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють використанню високоміцних поліамідних, пара-арамідних (Kevlar) та поліетиленових ниток з надвисокою молекулярною масою (UHMWPE, Dyneema) [10]. Ці нитки

застосовуються як для виготовлення трикотажних полотен [11], так і для реалізації швейних армувальних елементів у преформах спеціального призначення. Їх переваги полягають у високій питомій міцності, гнучкості, стабільності форми та сумісності з полімерними матрицями під час просочення.

Методи формування армуючих структур охоплюють ткацтво, плетіння, в'язання, шиття та адитивні технології. Як засвідчено в [7], швейні технології є перспективними завдяки гнучкості розташування ниток, простоті реалізації та можливості застосування для локального підсилення в складних або багатошарових структурах. У порівнянні з тканими чи плетеними методами, швейне армування забезпечує швидке й адресне підсилення, хоча й поступається за рівномірністю розподілу зусиль у всьому об'ємі виробу.

Актуальними залишаються дослідження з використання 3D-текстильних преформ, що забезпечують багатовекторне армування та просторову стабільність конструкцій. У цьому контексті роль швейних технологій полягає у створенні адаптивних і модульних схем армування, що дозволяє формувати комбіновані структури з локальним підсиленням, орієнтованим на ділянки з підвищеним навантаженням.

На додаток, сучасні підходи включають використання інтелектуальних матеріалів і 3D-друк армувальних структур із заздалегідь заданою топологією. Це дозволяє формувати складні геометрії без використання класичних ткацьких або швейних машин, що розширює можливості інженерного проектування та кастомізації виробів.

У підсумку, незважаючи на широку номенклатуру методів, актуальною залишається концепція локального армування готових преформ, особливо у виробках зі змінною або складною геометрією та незначними перепадами по товщині. Саме в таких випадках швейні технології забезпечують ефективне адресне підсилення, зберігаючи гнучкість у проєктуванні, низьку масу та високу технологічність.

1.2 Аналіз основних процесів формування композитних виробів

Ключовим етапом у формуванні композиційних матеріалів на основі текстильних структур є ефективне просочення сухої армувальної заготовки (преформи) полімерною матрицею. Для реалізації цього процесу застосовують різні технології просочення, зокрема: метод ручного ламінування [12], вакуумного інфузування [13], RTM (мало- та високотискового формування) [14], а також методи автоклавного пресування[6], які забезпечують контроль параметрів насичення та дозволяють досягати високої якості кінцевого композиту.

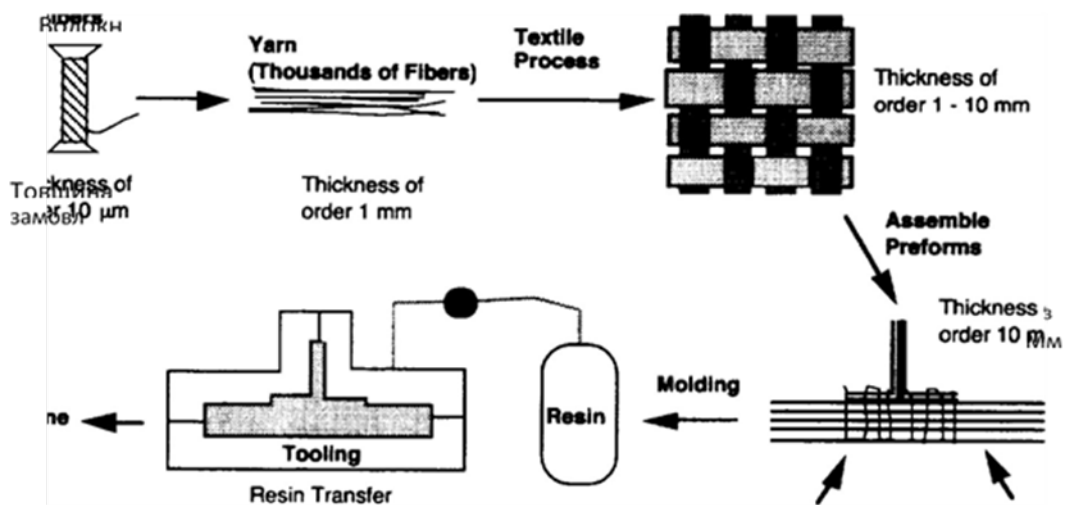


Рис 1.1 Процес виготовлення композитного виробу[6]

Інші технології, такі як осадження з парової фази, були розроблені для композитів на основі вуглецю, металевої матриці та керамічної матриці [6].

Один із підходів до вливання матриці називається формуванням із перенесенням смоли або RTM. У цьому процесі преформу поміщають у форму з формою центральної частини. Низький смола в'язкості закачується через серію ін'єкційних отворів [14]. Вентиляційні отвори, підключені до вакуумного насоса, видалять гази та надлишки смоли. Потім деталь затверджується при підвищенні температурі ще в формі. У успішному процесі RTM преформа повністю готова змочена смолою, але досягнення повного змочування може бути складним завданням у складній частині. Смола потік контролюється проникністю заготовки волокна та в'язкістю смоли.

Проникність вища для низьких об'ємних фракцій волокон, але, звичайно, з високим об'ємом зазвичай вимагається для максимізації конструктивних характеристик. Незважаючи на цей конфлікт, висока якість частини були виготовлені з об'ємною часткою волокна, що перевищує 60%. Успіх часто залежить від наявності хороших моделей процесів для визначення оптимального місця впорскування та вентиляції [6].

1.3 Структура та характеристика текстильних виробів

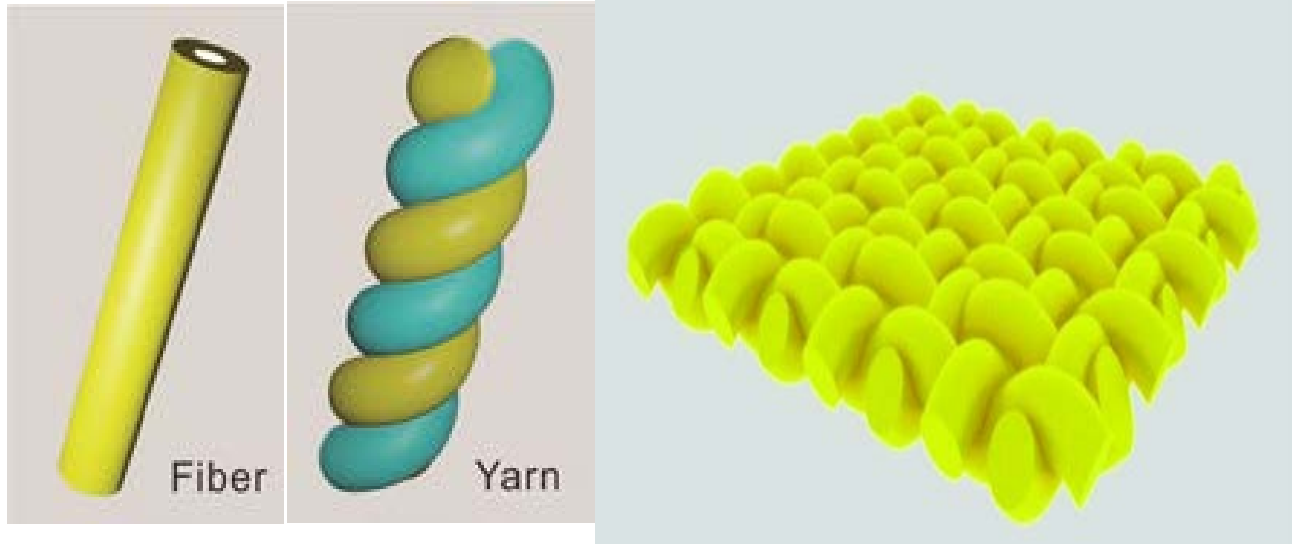
1.3.1 Вимірність текстильних матеріалів

Текстильні матеріали, що застосовуються для виготовлення преформ, класифікуються за просторовою вимірністю залежно від орієнтації армувальних компонентів текстильної структури - ниток, волокон, стрічок, тканин або об'ємних форм. Їх вибір визначається вимогами до жорсткості, міцності, термостійкості, а також геометричних характеристик цільового виробу.

Залежно від кількості координатних напрямків (X, Y, Z), у яких орієнтовані армувальні елементи, текстильні структури поділяються на одновимірні (1D), двовимірні (2D), проміжні (2,5D), тривимірні (3D) та адаптивні (4D) [4, 15-23].

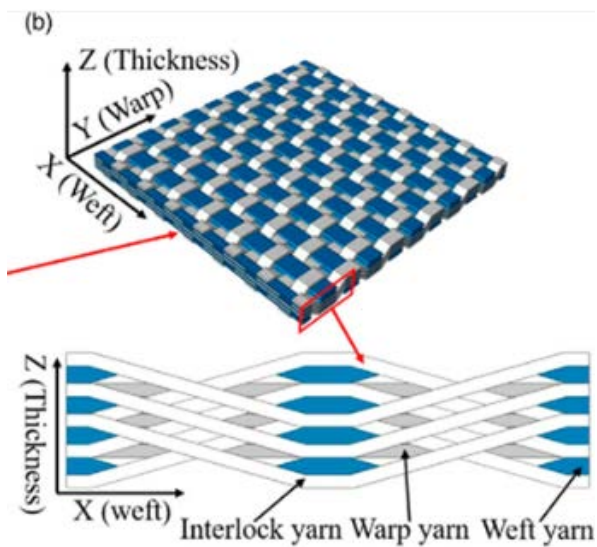
Нижче наведено типологію текстильних структур преформ відповідно до їхньої просторової вимірності:

- *1D текстильні матеріали* (рис. 1.1, а) - одновимірні структури, представлені окремими нитками, волокнами або монопнитками. Вони є базовими елементами для формування більш складних текстильних систем, зокрема пряжі, армуючих волокон тощо [18, 24].
- *2D текстильні матеріали* (рис. 1.1, б) - площинні структури, утворені шляхом переплетення або з'єднання ниток у двох напрямках (X і Y). Вони мають сталі або слабо виражені характеристики за товщиною без активного формування об'ємної геометрії. До таких структур належать тканини, трикотаж, неткані полотна [18, 25].

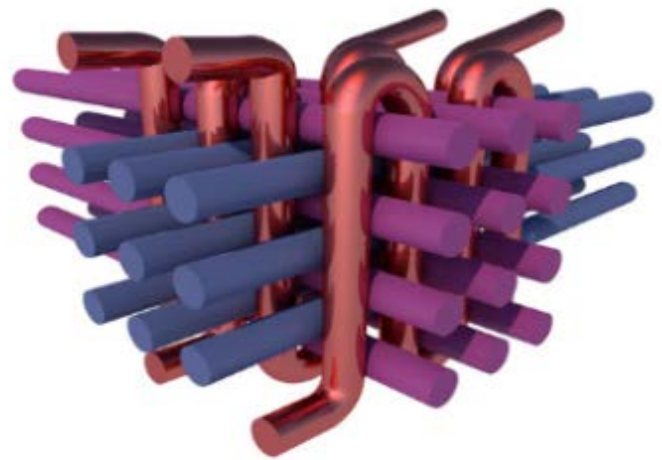


а

б



в



г

Рис. 1.2 Структура каркасних матеріалів: а) 1D одновимірні[18],
 б) 2D двовимірні [18] в) 2,5D особливий тип тривимірної структури [19],
 г) 3D тривимірні

- *2,5D текстильні матеріали* (рис. 1.1, в) - структури з проміжними властивостями між 2D і 3D матеріалами. Армувальні компоненти в них сполучені по осі Z за допомогою додаткових ниток, стібків, голкопрошивних або спеціалізованих переплетень (наприклад, зшиті, Z-stitching, тафтингові або плетені структури) [19, 26, 27].
- *3D текстильні матеріали* (рис. 1.1, г) - об'ємні структури, в яких нитки або волокна орієнтовані в трьох напрямках: X, Y і Z. Такі матеріали забезпечують підвищену механічну стабільність і використовуються як армувальні преформи у композиційних матеріалах. До них належать тривимірні тканини, об'ємно-плетені структури, зшиті 3D-каркаси тощо [17, 28].
- *4D текстильні структури* - адаптивні текстильні матеріали, здатні змінювати свою форму, структуру або властивості з часом під впливом зовнішніх факторів, таких як температура, вологість, магнітне або електричне поле. Такі матеріали поєднують тривимірну архітектуру з часовим компонентом, що розширює функціональність традиційних армувальних систем [23, 29].

Розглянута типологія відображає основні підходи до класифікації текстильних преформ за просторовою вимірністю та орієнтацією армувальних елементів. Аналіз показує, що ключовим критерієм поділу на 2D, 2,5D та 3D структури є здатність армуючих компонентів забезпечувати безперервне перенесення навантажень у відповідних координатних напрямках. У 2D-композитах зберігається шарова будова без наскрізного армування по осі Z, що може знижувати міжшарову міцність. Натомість у 3D-преформах волокна орієнтовані у трьох просторових напрямках (X, Y, Z), що забезпечує цілісність структури та підвищує її здатність до механічних навантажень. Такий підхід дозволяє здійснювати обґрунтований вибір типу армувальної структури відповідно до умов експлуатації композиційного матеріалу, що зазначено в роботах [6, 25].

1.3.2 Структурно-технологічні особливості текстильних армувальних елементів

До текстильних виробів, що застосовуються як армувальні елементи в композиційних матеріалах, належать ткани, в'язальні, плетені, зшиті, та комбіновані структури [6, 28, 30-35].

1.3.2.1 Ткани армуючі текстильні елементи

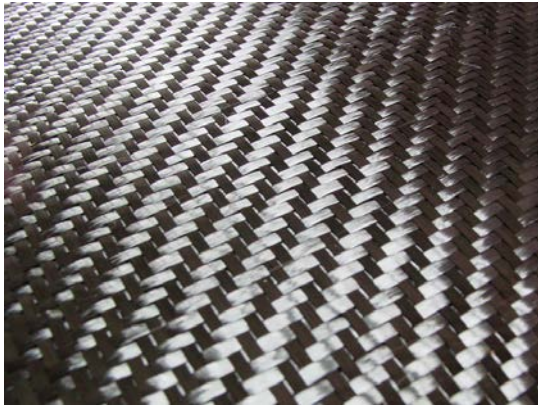
Ткани преформи є одним із найпоширеніших типів текстильних армувальних структур, що застосовуються в композиційних матеріалах, завдяки широким можливостям ткацьких технологій і варіантів структур тканин. Їх виготовлення базується на переплетенні двох або більше систем ниток - основи та утку - для формування плоскої або об'ємної структури, придатної до подальшого просочення полімерною матрицею [12, 13].

Залежно від конфігурації ткани армувальні матеріали поділяють на:

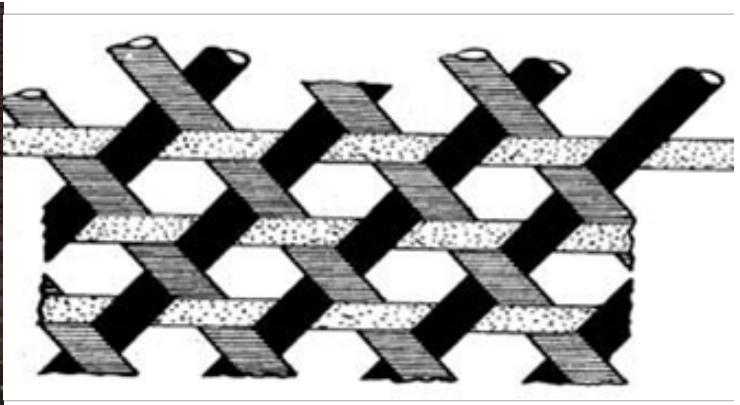
- 2D тканині структури (рис. 1.3, а);
- трьохосьові тканині структури (рис. 1.3, б);
- 3D ортогональні тканині структури (рис. 1.3, в);
- 3D циліндричні тканині структури (рис. 1.3, г).

2D ткани структури (рис. 1.3, а) - це площинні текстильні вироби, створені шляхом переплетення ниток основи (X) та утку (Y) у площині XY без розвиненого армування по товщині (ось Z) [6, 17]. Вони є найбільш розповсюдженим типом армування в композиційних матеріалах із плоскою або слабковигнутою геометрією. Перевагою є простота виробництва, висока щільність переплетення, сумісність з класичними технологіями ламінування.

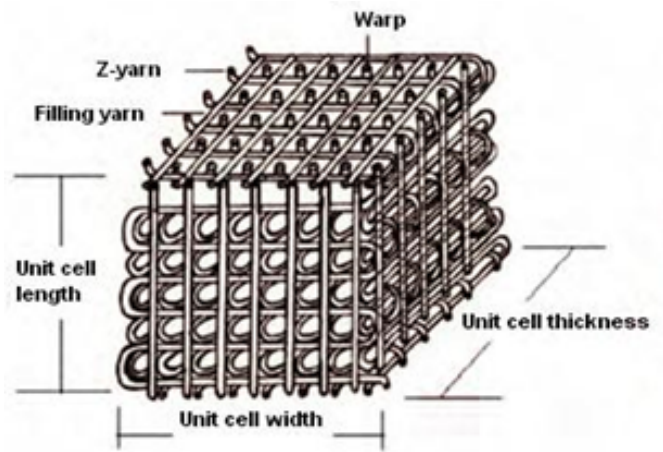
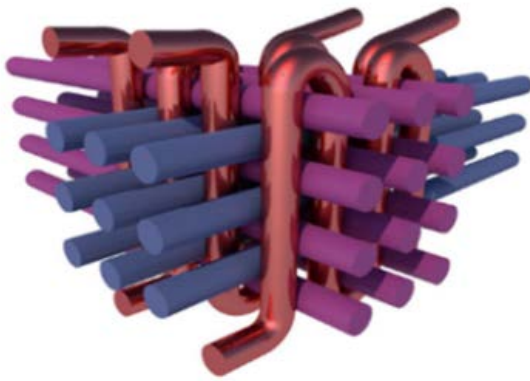
Трьохосьові ткани структури (рис. 1.3, б) складаються з трьох систем ниток: основної, наповнювальної та на косу, що переплітаються під кутом приблизно 60° [30, 36]. В роботах [30, 36, 37] зазначається, що таке розташування забезпечує ізотропну міцність у площині. Водночас, як зазначають ці



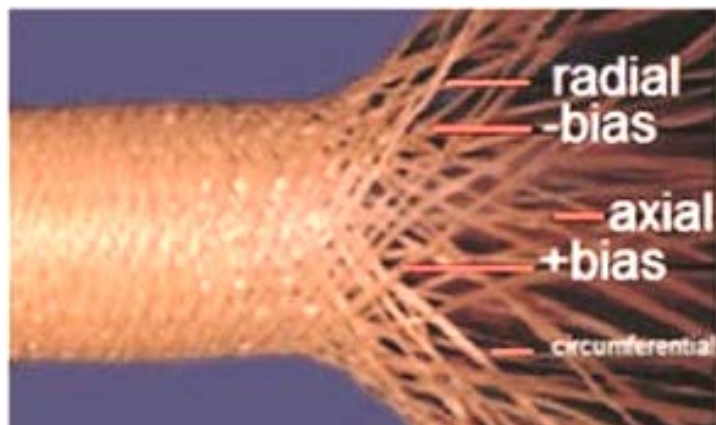
а



б



в



г

Рис 1.3 Структура тканих текстильних виробів: а) 2D тканини [38], б) трьохосьові [31], в) 3D ортогональні, г) 3D циліндричні [32]

дослідники, одним із обмежень трьохосьових структур є неможливість досягнення високої щільності ткацтва, що зумовлено технологічними особливостями процесу та конструктивними вимогами до складних геометрії преформ.

3D ортогональні ткані структури (рис. 1.3, в) формуються з трьох незалежних наборів ниток: основи, утку та ниток Z-напрямку, які з'єднують між собою усі шари, утворюючи об'ємну армуючу структуру з підвищеною цілісністю. Така конфігурація забезпечує ефективне протидію міжшаровому розшаровуванню та підвищує міцність на зсув [6, 31, 32].

3D циліндричні ткані структури (рис. 1.3, г) - це спеціалізовані об'ємні армувальні структури, що формуються за допомогою технологій кругового ткацтва, в процесі якого інтегруються нитки різної орієнтації: осьові (вздовж осі циліндра), радіальні (від центру до периферії), окружні (по колу) та діагональні (під кутом до осьової та окружної ниток) [32]. Така багатовекторна орієнтація волокон дозволяє забезпечити рівномірний розподіл навантажень у циліндричних виробах та підвищену міцність у всіх напрямках.

Конструктивна геометрія преформи може змінюватись залежно від технічного призначення: варіюються діаметр, довжина, товщина стінки, а також локальна густина волокон у різних зонах. Як зазначено в [28], товщина стінки преформи визначається вимогами до жорсткості, стійкості до тиску, термічного розширення та умов взаємодії з полімерною матрицею. Використання кругових ткацьких машин із багатонитковою подачею забезпечує високу повторюваність структури та дає змогу виготовляти безшовні трубчасті елементи зі складною топологією.

Загальна оцінка тканих структур

Аналіз літературних джерел [28, 30, 33, 36, 37, 39, 45] дозволяє узагальнити переваги та обмеження використання структури армувальних елементів у композитних виробах, отриманих на основі ткацьких технологій. Зокрема, до ключових переваг тканих преформ відносять контрольовану орієнтацію волокон, що забезпечує передбачувані механічні властивості композиту та підвищену

стабільність при експлуатації [38, 33]. Також важливою перевагою є здатність тканих преформ зберігати сталі розміри та геометричну форму у площині ХУ навіть під час виготовлення композитного виробу, що забезпечує точність і повторюваність форми заготовки протягом усього технологічного циклу [39]. Окрім того, сумісність із серійними технологіями виготовлення композитних виробів, зокрема методами RTM (resin transfer molding), вакуумного формування та автоклавного пресування, робить ткани преформи придатними для широкого промислового використання [30, 33]. Варто відзначити й можливість автоматизованого великосерійного виробництва, що зумовлює їх економічну ефективність [37].

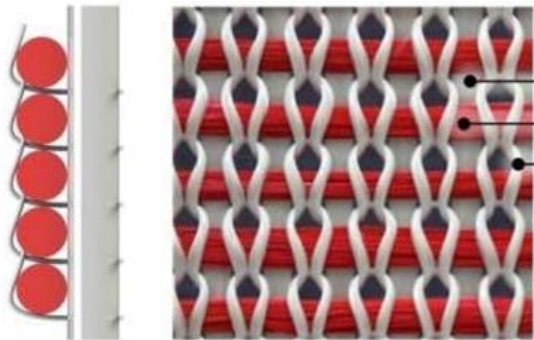
Разом із тим, у наукових джерелах наголошується на низці обмежень, властивих передусім класичним 2D тканим структурам, що відображено в роботах [33, 39, 40]. Йдеться, зокрема, про недостатнє армування по товщині (вздовж осі Z), що призводить до зниження опору міжшаровому зсуву [33, 39].

Крім того, складність відтворення складної геометрії без попереднього формування зменшує гнучкість тканих структур до нетипових геометричних преформ [37].

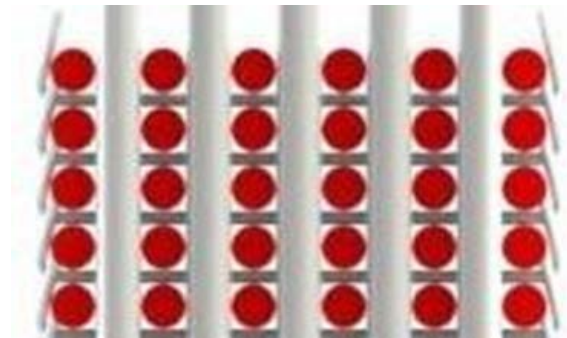
Таким чином, ефективне використання тканих структур у композитних виробках вимагає зваженого підходу до вибору конфігурації преформи. Переваги, притаманні цим армувальним елементам, відкривають широкі можливості для їх використання, однак конструктивно-технологічні обмеження потребують врахування на етапі проєктування [41].

1.3.2.2 В'язальні армувальні текстильні елементи

В'язальні текстильні преформи - це армувальні елементи, сформовані з використанням технологій в'язального виробництва шляхом переплетення ниток у петельну структуру (система петля в петлю). Такі преформи можуть мати плоску або просторову конфігурацію рис. 1.4 [42] і застосовуються для армування композитів. Характеризуються своєю гнучкістю



а



б



в



г

Рис 1.4 Структура в'язаних армуючих елементів: а) двошарові полотно, б) багатошарове [42], в) трубчате, г) об'ємний в'язальний

і високим формоутворенням та можливістю створення складних геометричних форм. Вони відзначаються достатньою ударостійкістю, однак у порівнянні з тканими структурами мають нижчу жорсткість [42].

В'язальні армуючі елементи поділяють за типом:

- 2D в'язані структури (рис. 1.4, а);
- багатошарові в'язані структури (рис. 1.4, б);
- трубчасті в'язані структури (рис. 1.4, в);
- об'ємні в'язані структури (рис. 1.4, г);
- багатошарові оснований'язані структури (рис. 1.4, д).

2D в'язані вироби (рис. 1.4, а) - ці вироби формуються з одного шару петель, в якому нитки переплітаються у площині ХУ. Вони забезпечують достатню гнучкість, рівномірну товщину і підходять для армування плоских або слабо вигнутих поверхонь [43].

Багатошарові в'язальні структури (рис. 1.4, б) [44] складаються з кількох петельних шарів, з'єднаних між собою. Така структура покращує здатність виробу до сприйняття навантажень і розширює можливості його застосування в композитах зі змінними умовами експлуатації. Такі структури дозволяють формувати зони зі змінною щільністю або товщиною, що особливо важливо для преформ складної геометрії [42] .

Трубчасті в'язальні структури (рис. 1.4, в) [32] утворюються шляхом кругового в'язання і призначені для армування елементів з циліндричною або кільцевою геометрією. Вони зберігають безперервність волокон по колу, що знижує кількість стиків та підвищує структурну цілісність. Такі елементи ефективно використовуються для посилення труб, резервуарів, валів тощо.

Об'ємні в'язані структури (рис. 1.4, г) [44] створюються з урахуванням просторової геометрії майбутнього виробу. Завдяки індивідуальному керуванню голками кожної зони, дозволяється сформувати складну топологію преформи без потреби у післяобробці чи додаткового формування.

Багатоосьові оснований'язані структури (рис. 1.4, д) [13] поєднують технології оснований'язального виробництва де шари формуються з натягнутих

волокон з катушок, орієнтованих у кількох напрямках та скріплюються тонкою поліефірною ниткою шляхом в'язання. Ця нитка, єдина, що формує петлі, які проходить перпендикулярно до площини в'язання, забезпечуючи тривимірну в'язальну структуру. В результаті досягається надійне армування у кількох площинах із фіксацією кожного шару.

Такі армуючі структури виготовляються на спеціалізованих в'язальних машинах з числовим програмним керуванням, що дозволяє необхідне керування робочим органом та реалізацію процесу в'язання складної геометрії преформ, її щільності та орієнтації ниток (волокон) [42, 46].

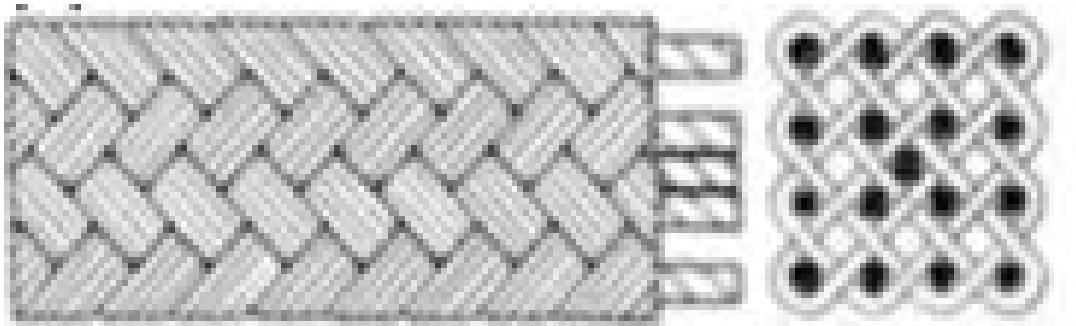
1.3.2.3 Плетені армувальні текстильні елементи

Плетені текстильні армувальні преформи - це армувальні елементи, сформовані шляхом переплетення трьох або більше ниток за спеціальними траєкторіями, що відрізняються від ткацтва (де нитки переплітаються під прямим кутом) і в'язання (де утворюються петлі). Такі структури можуть бути одно-, дво- та тривимірними (1D, 2D, 3D) [47], і застосовуються у виробництві композитів, які вимагають складної геометрії, високої механічної міцності та надійності.

Плетені армувальні елементи поділяються на:

- 1D плетені структури;
- 2D плетені структури;
- 3D плетені структури.

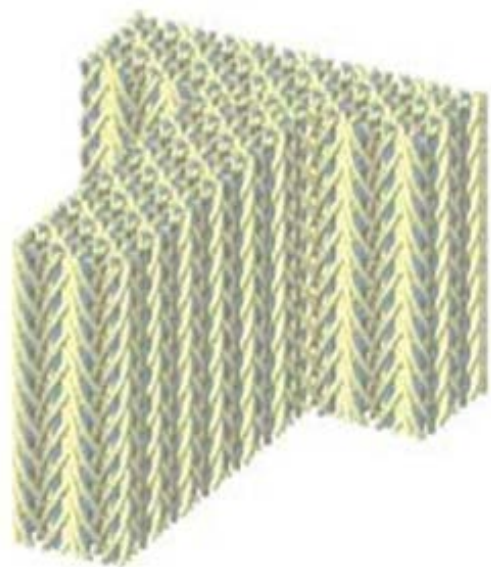
1D плетені структури формуються із волокон, переплених у напрямку однієї осі. Зазвичай це шнури або джгути, які застосовуються як елементи локального підсилення в композитах або як армуючі елементи при зшиванні компонентів. Вони мають високу міцність на розтяг і є гнучкими для інтеграції в різноманітні зони виробу.



а



б



в

Рис. 1.5 Структура плетених армувальних елементів [40, 48, 49]: а) 2D плетена структура, б) 3D прямокутна балка, в) Т-подібна балка

2D плетені армуючі структури (рис. 1.5, а) [47] це плоскі структури, в яких нитки переплітаються під кутами, утворюючи плетений шар із високою стійкістю до зсуву і достатні для огинання викривлених поверхонь. Такі структури забезпечують рівномірний розподіл навантаження та мають переваги над класичними 2D ламінатами завдяки щільнішому зчепленню ниток між собою.

3D плетені армуючі структури (рис. 1.5, б-г) [40] формуються в об'ємі, зокрема з переплетенням ниток по довжині, ширині та висоті. Завдяки цьому забезпечується повноцінне армування у трьох вимірах, що суттєво підвищує стійкість до розшаровування та механічну цілісність. Типові форми включають двотаврові балки, Н- і Т-подібні профілі, швелери, оболонки, труби. У багатоосьових структурах нитки орієнтуються в кількох напрямках (основному, радіальному, окружному), що забезпечує складну сітчасту топологію з покращеними характеристиками жорсткості, стійкості до деформацій та здатність поглинати механічну енергію при навантаженні.

Переваги технології плетіння включають універсальність конструкцій, високі механічні й еластичні властивості, а також перевагу над аналогічними 2D ламінатами [51-53]. У багатоосьовій 3D плетеній структурі нитки плетіння переплітаються з осьовими нитками, тоді як нахилені нитки, орієнтовані під кутами (наприклад, $\pm 45^\circ$) до осі, розміщуються на поверхні структури й фіксуються радіальними нитками. Властивості таких структур можуть бути покращені шляхом підсилення в поперечному напрямку та зменшення нерівномірності цільових коефіцієнтів Пуассона, що підвищує енергоємність і ударостійкість готового виробу [12, 54].

Плетені композити мають низку переваг: високу міцність і жорсткість на зсув і кручення, поперечний модуль пружності, в'язкість до руйнування, стійкість до пошкоджень, довговічність, низьку чутливість до локальних дефектів. Вони дозволяють створювати складні форми без ламінування та додаткових стиків, що підвищує їх ефективність для відповідальних конструкцій [12, 51-54].

1.3.2.4 Армовані по всій товщині

Армовані текстильні елементи по всій товщині можуть бути утворені технологією пошарового з'єднання 2D текстильних елементів технологічними способами: z-прошиванням, тафтинг, зшиванням [34, 55-58]. Ці способи дозволяють значно підвищити міжшарову зв'язність та міцність при дії навантажень у напрямку осі Z, що критично важливо для зменшення ризику деламінації в багатошарових композитних виробках.

Z-штифтування армування текстильних елементів

Z-штифтування (рис. 1.6) - це технологія, що передбачає введення додаткових армувальних елементів (ниток, штифтів або стрижнів) у напрямку, перпендикулярному до площини укладання шарів (вздовж осі Z). Такий метод застосовується для значного підвищення опору міжшаровому зсуву та зменшення ймовірності розшарування. Z-армування поєднується з 2D або 2.5D преформами, підвищуючи тривимірну цілісність та механічну стійкість конструкцій, що особливо актуально в авіації, автомобільній та оборонній промисловості.

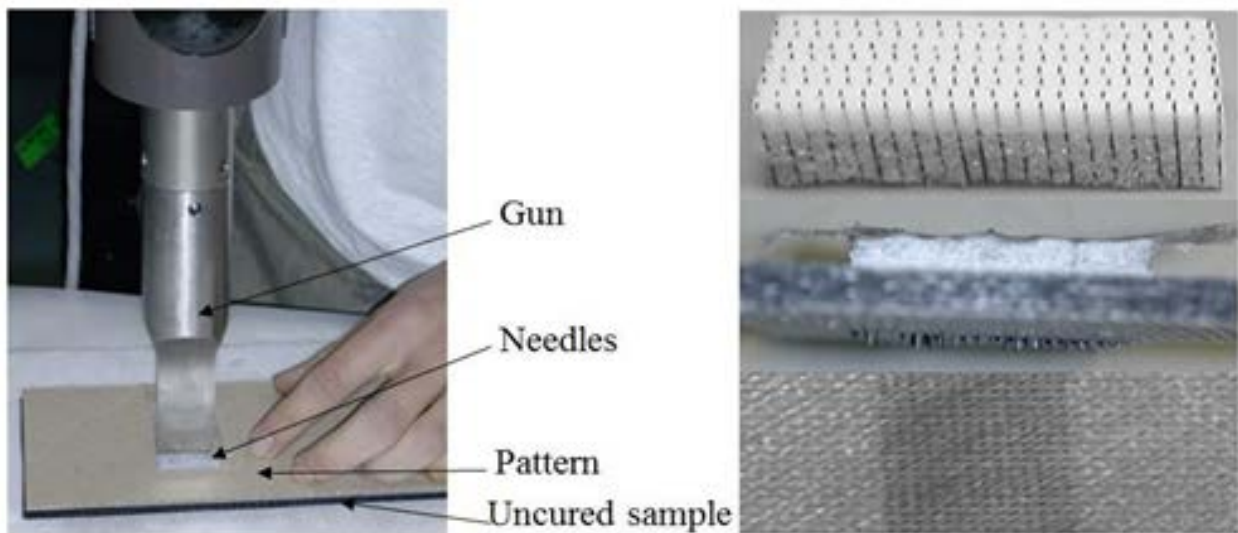
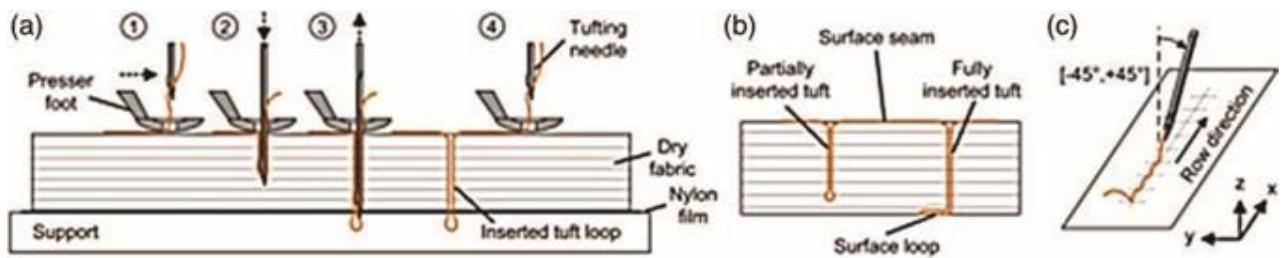


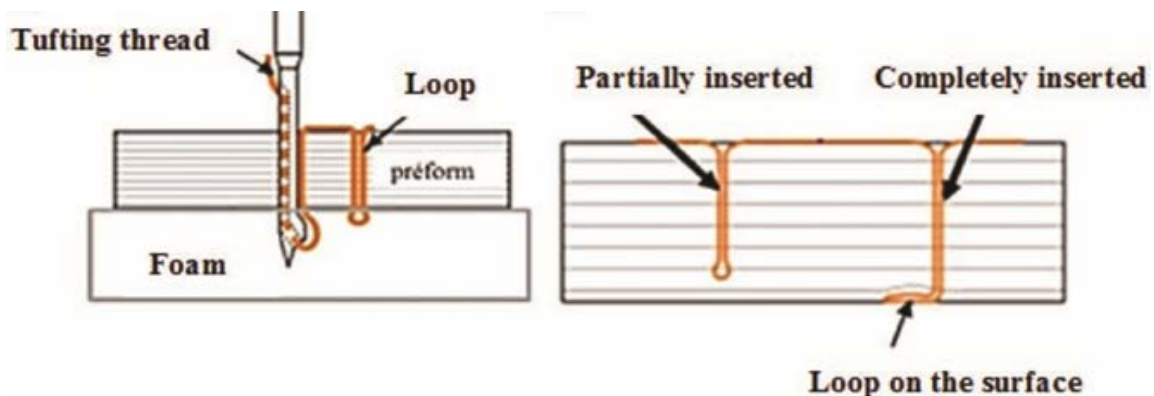
Рис. 1.6 Технології армування Z-штифтуванням [55]

Тафтингове армування текстильних елементів

Тафтинг (рис. 1.7) - метод, за якого додаткові нитки або пучки волокон вводяться через товщу багатшарової текстильної заготовки за допомогою спеціальних порожнистих голок [34, 56-58]. Нитки проходять крізь шари або до певної глибини, створюючи петлі, які фіксуються за рахунок тертя. На відміну від класичного зшивання, нитки при тафтингу не натягуються, що зменшує ризик пошкодження волокон і дозволяє проводити армування з одностороннім доступом. Як зазначено в роботах [34, 56, 58] застосування технологій на базі тафтингу при виробництві армуючих елементів преформ дозволяє ефективно підвищує стійкість до деламінації, покращує загальну механічну міцність і одночасно забезпечує отримання складних геометричних форм опуклої геометрії.



а



б

Рис. 1.7 Тафтингове армування: а) принципова схема процесу, б) часткове і повне наскрізне укладання ниток [34, 56]

Армування зшиванням

Зшивання як технологія наскрізного армування передбачає з'єднання шарів текстильного матеріалу за допомогою різних типів швейних стібків. До найбільш поширених відносяться:

Ручний двонитковий стібкок типу 201 (рис. 1.8, а) [59-61] - утворюється послідовним з'єднуванням ручних стібків за допомогою голкової нитки. Для прямолінійного стібка голку тримають з нахилом, проколюють матеріал згори донизу і виводять її знизу догори, просуваючись вперед.

Човниковий стібкок типу 301 (рис. 1.8, б) [59-61] - формується двома нитками: голковою та човниковою. Голка проводить нитку крізь матеріал, утворюючи петлю, яку захоплює човник, що обводить її навколо шпульки. Переплетення розміщується в товщі з'єднуваних шарів, забезпечуючи надійне з'єднання за рахунок натягу ниток.

Модифікований човниковий стібкок (рис. 1.8, в) [59-61] - різновид стібка 301, у якому вузол виводиться на зовнішню поверхню з'єднуваного матеріалу. Це зменшує деформації, зберігаючи поверхню гладкою. Керованими параметрами є крок проколу, міжряддя, вид нитки та її натяг.

Ланцюговий одонитковий стібкок типу 101 (рис. 1.8, г) [59-61] - створюється однією ниткою, коли нова петля вводиться в попередню. Петельник (гачок) захоплює нитку і передає її до осі обертання, де відбувається формування ланцюгового переплетення зі зворотного боку матеріалу.

Потайний стібкок типу 103 (рис. 1.8, д) - виконується вигнутою голкою з одного боку виробу. Вводиться і виводиться з того самого боку, не проходячи наскрізь, забезпечуючи майже невидимий шов.

Зигзагоподібний стібкок типу 304 (рис. 1.8, е) [59-61] - створюється аналогічно 301, але голка відхиляється поперек шва після кожного проколу. У результаті утворюється зигзагоподібна лінія шва, що дозволяє компенсувати деформації.

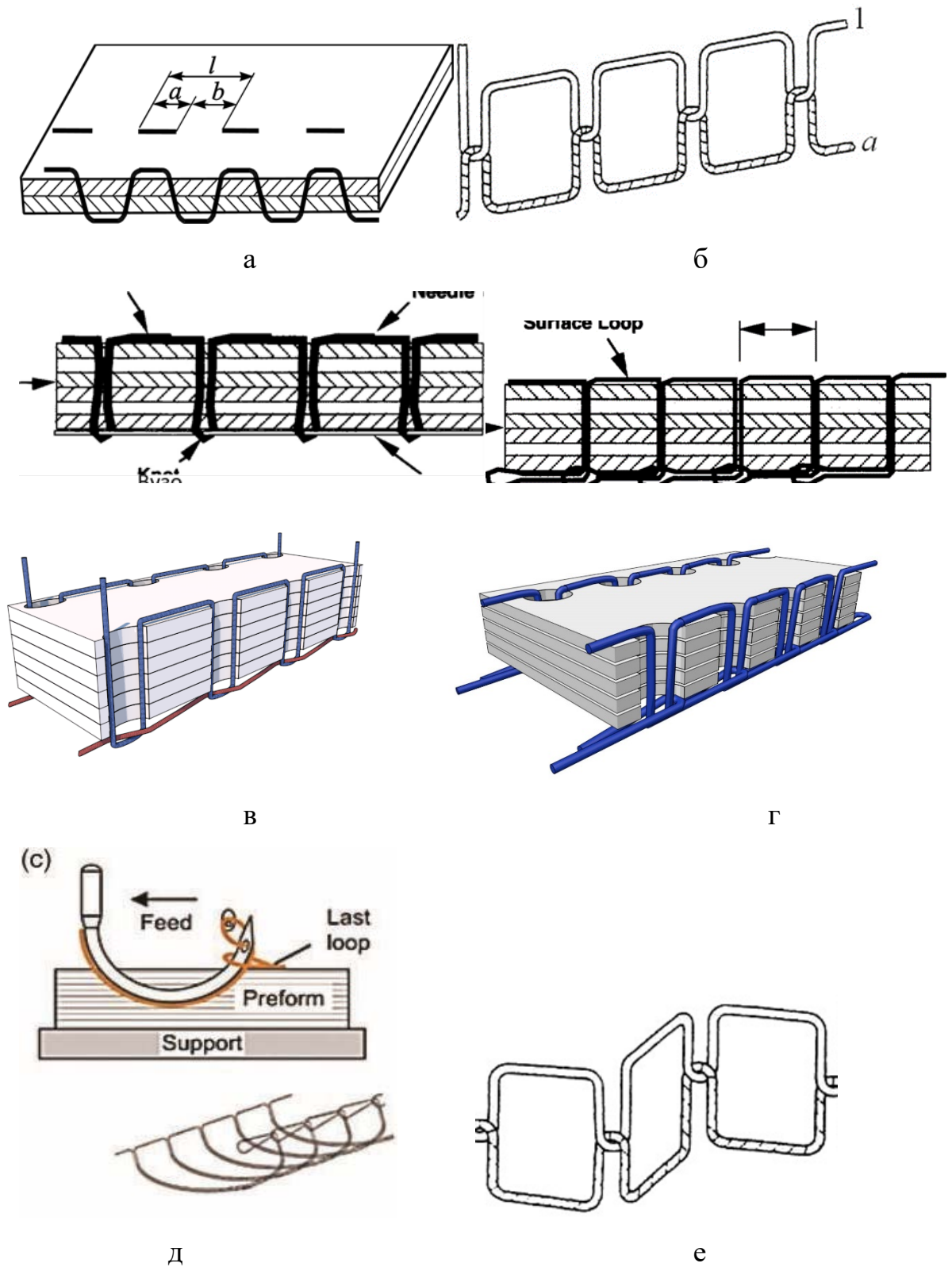


Рис. 1.8 Види зшивальних стібків для наскрізного армування: а) ручний [35], б) човниковий 301 [50], в) модифікований [50], г) ланцюговий 101 [6], д) потайний 103 [34], е) зигзагоподібний 304 [35]

Наскрізне армування текстильних елементів по всій товщині дозволяє створювати просторово цілісні багат шарові композити з підвищеною стійкістю до розшарування. Реалізація таких технологій, як Z-штифтування, тафтинг і зшивання, забезпечує міцне з'єднання між шарами, сприяє формоутворення армуючих преформ до складної геометрії виробів та підвищує експлуатаційну надійність.

1.4 Аналітичний огляд з існуючих класифікацій текстильних виробів

В існуючих класифікаціях армуючих елементів їх класифікують за типом технології та способом утворення (ткацтво, плетіння, в'язання, намотування, прошивання, адитивних технологій та зшивання) [6]. Поряд з цим зазначається, що різні технології забезпечують різні фізико та механіко-технологічні властивості готового виробу (жорсткість, міцність та здатність до формоутворення) [6, 8]. Вибір типу технології залежить від експлуатаційних характеристик готового виробу та призначення. Наразі існують класифікації [8, 11, 19], які забезпечують вибір типу технологій та способу утворення 2D та 3D текстильних виробів в залежності від структури та матеріалів. Однак, в роботах [44, 39] наведена лише якісна оцінка вибору та спосіб їх отримання, в цей же час в роботах [6, 8] наводиться тільки їх типи з прив'язкою до технологій. Слід відмітити роботи автора [31-33], в яких наведені якісні характеристики типу переплетень пряжі (ниток) та можливість формування 3D текстильних виробів в залежності від їх складності ткацькими, плетеними та в'язаними способами. Така класифікація полегшує вибір необхідних технологій та дозволяє вибрати тип плетіння в залежності від необхідної геометрії армувальних елементів. В цей же час у відомих класифікаціях [22, 23] відсутня повна інформація щодо вибору типу швейних технологій для створення 2D та 3D каркасних текстильних виробів. Крім того, не надано об'єктивної оцінки раціональності вибору типу стібка, що ускладнює процес їх вибору.

Найбільш обґрунтована класифікація, наведена за [41] на рис. 1.9, охоплює поділ текстильних матеріалів на 2D та 3D. Згідно з класифікацією [41], виділяють такі типи: ткані, плетені, трикотажні, зшиті та неткані текстильні матеріали. Однак, як зазначено в [20], особливості кожного типу технологічного процесу формування геометрії армуючих елементів зумовлюють відмінності у їх функціональних властивостях.

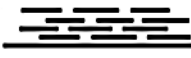
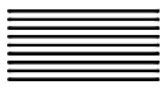
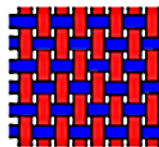
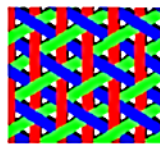
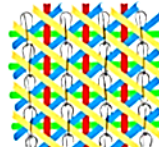
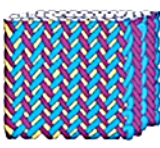
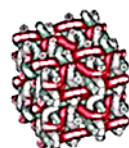
Axis Dimension		0 Non-axial	1 Mono-axial	2 Biaxial	3 Triaxial	4 Multi-axial
1D			 Roving yarn			
2D		 Chopped strand mat	 Pre-impregnation sheet	 Plain weave	 Triaxial weave knit /12/	 Multi-axial weave, knit /13/
3D	Linear element	 3-D braid /14/	 Multi-ply weave	 Triaxial 3D-weave /15/	 5-Direction construction	
	Plane element	 Laminate type	 H or I Beam /16/	 Honeycomb type	 Integral throat exit for nuclear missile /17/	

Рис. 1.9 Класифікація текстильних виробів [8]

Аналогічно в класифікації [6, 20, 21] текстильні матеріали розрізняють 1D, 2D та 3D структур, однак вона не враховує способи їх отримання. У відповідності до [19, 22] автори вказують що текстильні матеріали мають 2,5 D структуру, яка ґрунтується на поєднанні 1D компонентів таке твердження відображено і в роботі [22]. В цей же час цей автор [22] класифікує текстильні армуючі вироби за вимірністю та напрямком волокон. З точки зору

технологічного процесу, всі текстильні технології можуть застосовуватися для виготовлення армуючих елементів композитних виробів.

Автори [4] запропонували класифікацію текстильної армуючих елементів префом, яка базується на оцінці розмірності текстильного матеріалу та його геометричних особливостях. Автор враховує не лише тривимірність структури, а й конкретні напрямки волокон, що застосовуються у матеріалі.

Найпоширенішою є класифікація [4] яка дає кількісну оцінку за критеріями міцності (максимальну напругу при руйнуванні) і функціональності (велика коерцитивна сила, значний магнітоопір, слабке поглинання радіохвиль тощо), що забезпечує їх вибір та область застосування. Згідно з даними автора [62], текстильні арматури класифікуються на чотири групи залежно від їхньої архітектури: дискретні, безперервні, з плоскою та з просторовою геометрією.

Відомі також роботи де автори [50] запропонували класифікацію композитних матеріалів за матрицею та типом армування. Класифікація заснована по типом армуючих елементів: армуючі частинками, армуючі волокном або структурно армовані.

З аналізу існуючих класифікацій текстильних армуючих елементів встановлено, що жодна з них не є вичерпною: не охоплюється повний спектр сучасних технологій формування, таких як зшивання або комбіновані методи; не враховується складність геометрії 3D- та 4D-структур; а також відсутній поділ за функціональними ознаками преформ. Це ускладнює вибір оптимальної технології для виготовлення армуючих елементів відповідно до вимог до композитних виробів.

Проведений аналіз показав, що існуючі класифікації текстильних армуючих елементів є фрагментарними та не охоплюють повного спектра сучасних матеріалів і технологій їх формування. Більшість з них базується на окремих критеріях - або структурі виробу, або типі переплетення, або лише технологічному процесі. Водночас відсутні узагальнені підходи, які б одночасно враховували:

- тип армуючого матеріалу (волокно, нитка, пучок, 2D- або 3D-структура);

- технологію його формування (ткацтво, плетіння, зшивання, тафтинг, адитивні методи тощо);
- рівень просторової організації армуючої структури (від 1D до 4D).

Існуюча невідповідність між технологічним різноманіттям та наявними класифікаційними підходами ускладнює раціональний вибір типу армуючого елементу для конкретного композитного виробу. Це зумовлює потребу у створенні узагальненої класифікації, яка б охоплювала тип матеріалу, рівень структурної складності та спосіб формування армуючих елементів. Такий підхід сприятиме ефективному проектуванню і застосуванню 2D, 3D та 4D текстильних преформ, а також забезпечить обґрунтований вибір відповідних технологій їх виготовлення.

1.5 Аналітичний огляд конструкцій армуючих текстильних елементів та їх властивостей

Підходи до розробки 3D FRP матеріалів із позиції ткацтва, в'язання, плетіння та швейних технологій розкрити в роботі [63]. Більшість досліджень [63-72] фокусуються на формуванні армуючих структур і патентах на способи створення 3D FRP об'єктів. У роботах [73-75] були запропоновані різні варіанти тканих структур, а також досліджено їхню загальну міцність і стійкість до розшарування. Це підтверджує доцільність застосування тканих армуючих елементів для зміцнення конструкцій.

У публікаціях [76-80] розглянуто ударну міцність 3D-тканих каркасних виробів. Було показано, що завдяки товстій армуючій пряжі ці структури добре працюють зі складною геометрією. Це відкриває перспективи для їх застосування в авіації та автомобілебудуванні де виникає потреба в деталях складної форми. Водночас, як показано в [81-89], технологія ще не набула широкого впровадження через деформації, зсуви шарів та складність масового виробництва.

Автори [92] підкреслюють вплив типу переплетення на характеристики тканини та показують, що зміна параметрів може змінити щільність і поведінку матеріалу. Це дає змогу точніше обрати структуру армуючих елементів до заданих характеристик. Проте відсутність уніфікованих критеріїв їх вибору ускладнює вибір типу структури.

У роботах [91-93] описується виготовлення 3D-тканин із розпірними стінками в одному технологічному процесі. Як вказано це забезпечує кращу якість з'єднання волокон із матрицею композиту, проте складність цього процесу і його низька масштабованість не призводить до широкого впровадження.

Щодо плетених конструкцій, дослідження [94-99] показали, що вони мають достатню стійкість до міжшарового зсуву, тобто добре працюють у напрямку товщини. Водночас автор [100] звертає увагу, що через низьку жорсткість на зсув такі структури мають низьку пружність і складні для моделювання. Це свідчить про обмеження застосування в жорстких режимах навантаження.

Плетені 3D структури також мають обмеження, пов'язані з високою вартістю, складністю виробництва та недостатньою кількістю експериментальних даних [96]. Це обмежує їхнє поширення і потребує подальших досліджень для оптимізації процесів.

Втомна поведінка плетених 3D каркасів ще недостатньо досліджена. Циклічні навантаження особливо впливають на зони концентрації напружень [101-104]. Це ускладнює прогнозування ресурсу виробів та вимагає залучення чисельного моделювання для підвищення точності.

Трикотажні матеріали як армуючі елементи мають обмеження через свою гнучкість. Проте покращення можливе за рахунок вкладених ниток у їх структуру. Це дозволяє використовувати їх у гнучких або багатовісних армуючих елементах композитних виробів, хоча їхня міцність поступається тканим і плетеним матеріалам. В цей же час вибір типу в'язання також впливає на просторову стабільність отриманих виробів.

Технологія Z-штифтування [104-109] показала, що прошивка волокнами по товщині значно покращує опір до розшарування та підвищує ударну в'язкість. Це дає ефективний засіб зміцнення ламінованих конструкцій, особливо в умовах складних навантажень. Проте технологія потребує точного налаштування параметрів штифтування, і не всі типи преформ сумісні з цим методом.

Поряд з цим отримання армуючих елементів на базі швейних технологій [6, 110, 111], відзначено їхню доступність, адаптованість до складних форм і ефективність у запобіганні розшаруванню в різні зонах концентраторів напруг.

Найбільш напруженими зонами у багатошарових армованих структурах є ділянки вигинів, переходів шарів, отворів, крайових областей і стиків (рис. 1.10).

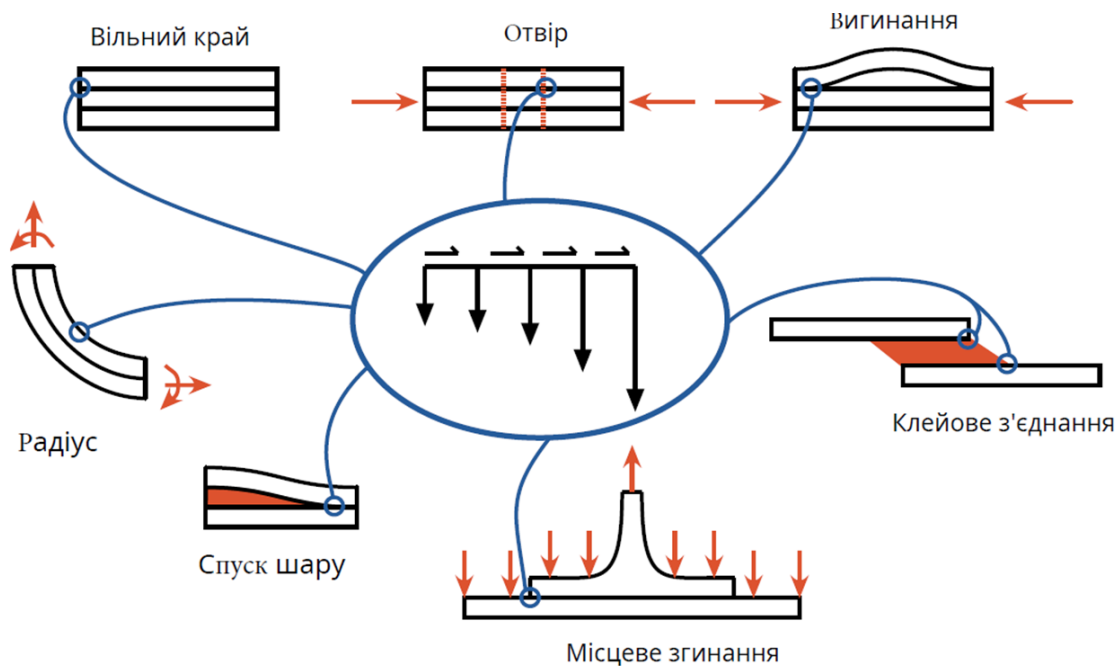


Рис. 1.10 - Проблеми які вирішують швейні технології при армуванні елементів преформ [70]

Саме ці місця найчастіше виступають осередками появи дефектів (зон руйнувань) під впливом експлуатаційних навантажень. Технологія наскрізного зшивання шарів дає змогу здійснювати локальне підсилення зазначених ділянок. Це сприяє рівномірнішому розподілу напружень по товщині, обмежує ріст та розвиток деламінацій [112-114] та забезпечує просторову цілісність текстильної преформи. Завдяки високій технологічній гнучкості та точності позиціонування

місць з'єднання, швейні методи мають потенціал для інтеграції в технологічні маршрути виготовлення 3D армуючих структур із заданими механічними властивостями на базі вшивальних автоматів [115].

Утім, недостатньо вивчено вплив конструктивних і технологічних параметрів зшивання - зокрема типу стібка, вплив довжини стібка - t та товщини - m матеріалів - на міцність і стабільність з'єднання, що вимагає додаткових досліджень.

Поряд з цим дослідження [112, 113] свідчать, що зшиті 3D композити на основі склотканини та кевларової нитки демонструють зниження міцності на вигин на 22% і жорсткість на 19% порівняно з еквівалентами 2D-ламінату [114], але водночас мають високу стійкість до міжшарового розшарування та зберігають цілісність після руйнування. Це робить їх неприпустимим застосуванням для конструкцій в яких деталі мають навантаження лише такого характеру.

У роботах [81, 82] вказано, що використання наскрізного прошивання призводить до пошкодження шару матеріалу, але зменшення довжини стібка частково знижує негативний ефект. Аналогічні ефекти досліджені авторами [116, 117].

В роботі [118] виконано аналітичний огляд 3D-тканин та способів їх утворення на базі швейних технологій. Однак, відсутність кількісного та якісного аналізу ускладнює практичне використання результатів дослідження. Це обмежує можливість верифікації структур для конкретних застосувань.

У роботі [7] наведено якісну схему механізму розшарування прошитого багатошарового композитного полімерного матеріалу та варіанти конструктивного виконання човникових і ланцюгових стібків, відповідно типів 301, 101, 401. Водночас відсутня оцінка ефективності ниткових з'єднань, що обмежує розробку рекомендацій щодо вибору оптимального типу стібка.

Дослідження [119] зосереджені на мікромеханічному аналізі із застосуванням методу скінченних елементів. У працях [120, 121] запропоновано об'єктно-орієнтований підхід до проєктування швейних і трикотажних машин.

Робота [61] розглядає топологію машинних стібків як основу для формування каркасної структури пакених матеріалів. Ці підходи мають потенціал для цифрового моделювання структури армування.

В роботах [122-124] описані САПР для легкої і текстильної промисловості, проте армуючі текстильні структури не розглядалися. У [125] запропоновано диференціально-геометричне моделювання процесу плетіння, що враховує релаксацію ниток і їх ковзання по оправці. В роботі [126] змодельований процес ковзання ниток, а в [127-129] розглянуто вплив тертя в зоні з'єднання ниток. Це дає інструменти для підвищення точності моделювання формування каркасу.

У [24, 130] поєднано експериментальний підхід з методом скінченних елементів, а в [131] представлено мікромеханічне моделювання властивостей 3D-структур на основі повторюваної геометрії волокон. Це дозволяє прогнозувати механічну поведінку конструкцій ще на етапі проєктування.

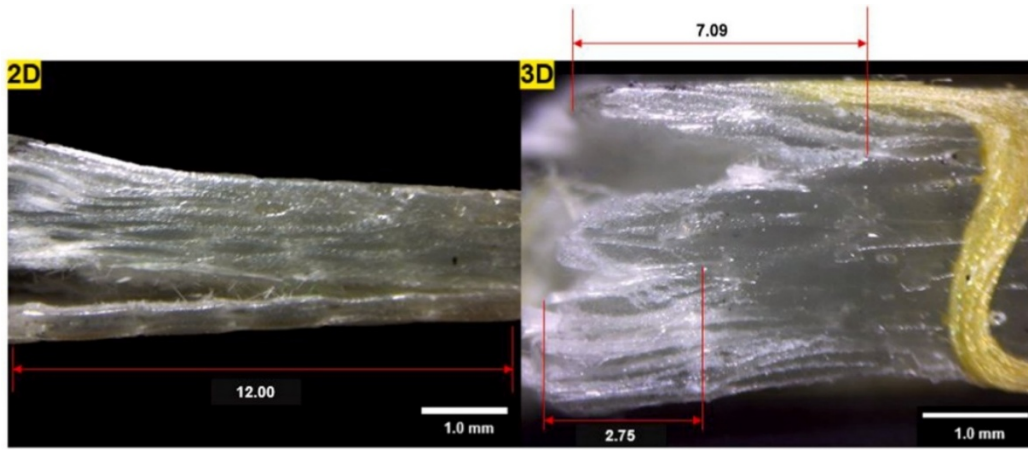
Роботи [132-134] досліджують в'язко-пружні властивості тканин при циклічних навантаженнях, що важливо для створення надійних композитів з прогнозованими експлуатаційними характеристиками. Застосування таких результатів дозволяє підвищити стійкість виробів до втомних навантажень.

З огляду на наведений аналіз, варто підкреслити, що швейні технології залишаються одним з найбільш адаптивних, економічно доцільних і технологічно гнучких способів формування тривимірних армуючих текстильних елементів. Застосування ланцюгових стібків, зокрема однопниткових типу 101, дозволяє автоматизувати процеси армування, здійснювати локальне підсилення зон концентрації напружень та зміцнення текстильних шарів по всій площині. Незважаючи на окремі обмеження, пов'язані з товщиною матеріалу та впливом її на міцність при згині, швейні технології можуть бути застосовані для рельєфних поверхонь не значної товщини від 0 до 8 мм на типових машинах [135, 136], та значно більших товщин при застосуванні спеціального обладнання, що є підтвердженням актуальності обраного напрямку дослідження.

1.6 Аналіз досліджень властивостей армуючих елементів

Структура та класифікація різних типів стібків наведена в роботах [59,60], а величина витрат ниток в стібках, як економічної доцільності застосування певного типу стібка визначена в роботах [61, 110, 111, 137, 138]. Вказано, що структура певного типу стібка визначає складність технологічного процесу, число робочих органів та послідовність їх взаємодії. В роботі [139] окрім кількості витрат ниток для кожного типу стібків, розглянуті також обмеження щодо їхнього застосування при деяких значеннях технологічних параметрів : довжини стібка - t , ширини зигзагу - z , ширини строчки - h та товщини матеріалів - m , а також його фізико механічних властивостей (розтяжності, еластичності, стійкості до розпускання тощо). Доцільність застосування стібка 101-го типу в машинобудуванні для армування та з'єднання пакетів із композитних матеріалів під час виробництва армуючих елементів висвітлена в роботах [115, 140], а в роботах [6, 115, 141, 142] виконана порівняльна оцінка якості і вартості армування ланцюговим стібками типів 401 та 101. З аналізу обох типів стібків випливає, що 401-й завдяки двонитковій структурі забезпечує кращий розподіл навантаження, тоді як застосування 101-ого стібка завдяки його простоті, зменшує витрати нитки та має менші вимоги до контролю технологічного процесу на його утворення.

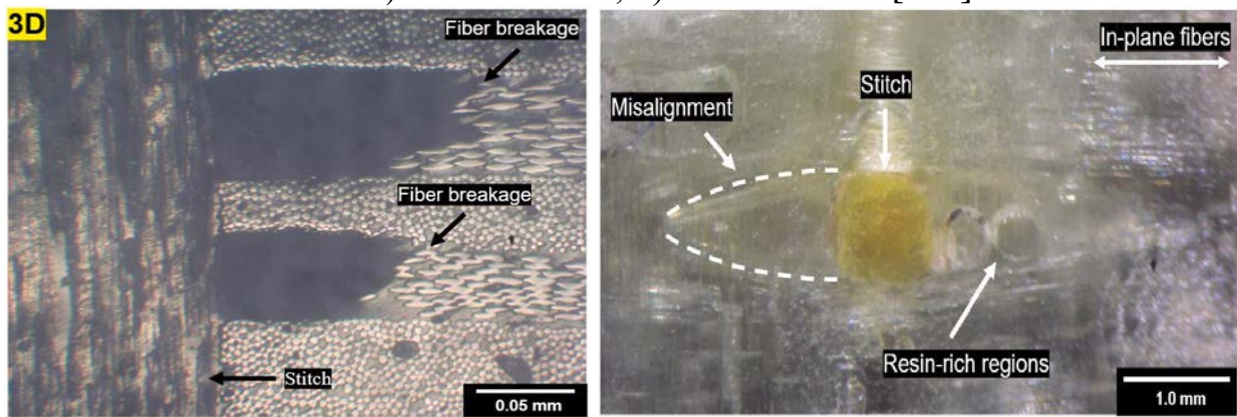
Одним з основних переваг, що прогнозують виконання якісного армування, є підвищення в'язкості міжламінарного руйнування [112]. В роботах [143-146] зазначено, що порівняльний аналіз між 2D і 3D композитами демонструє, що армувальні стібки пригнічують поширення тріщин розшарування. Ефект підвищеної в'язкості руйнування у 3D-композитах, досліджених у роботі [112] (рис. 1.11), проявляється в характері навантаження під



а

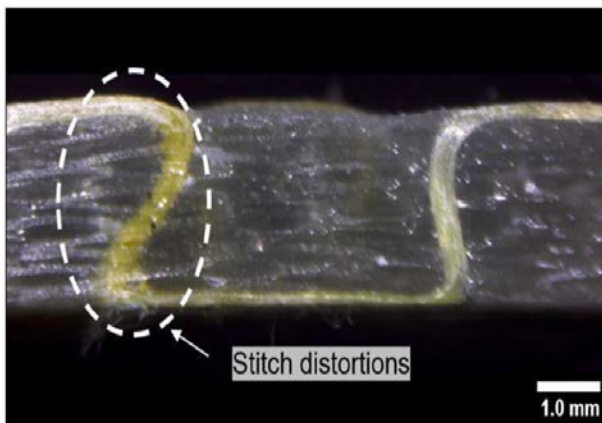
б

Рис. 1.11 Розшарування міжламінарних зав'язків:
а) 2D-композит, б) 3D-композит [118]

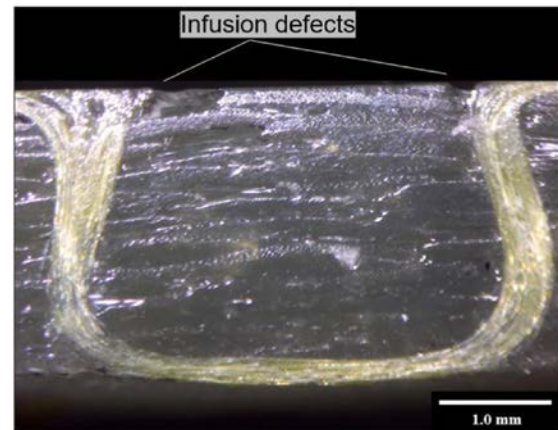


а

б



в



г

Рис. 1.12 Типи дефектів армування модифікованим пошкодження волокон в структурі тканих матеріалів: а) руйнування волокон при проколі голкою; б) - зміщення волокон навколо армуючих ниток та локаційні зон з надмірним вмістом полімерних смол, в) - перекося стібків, г) - деформації в місцях проколу навколо стібків [119]

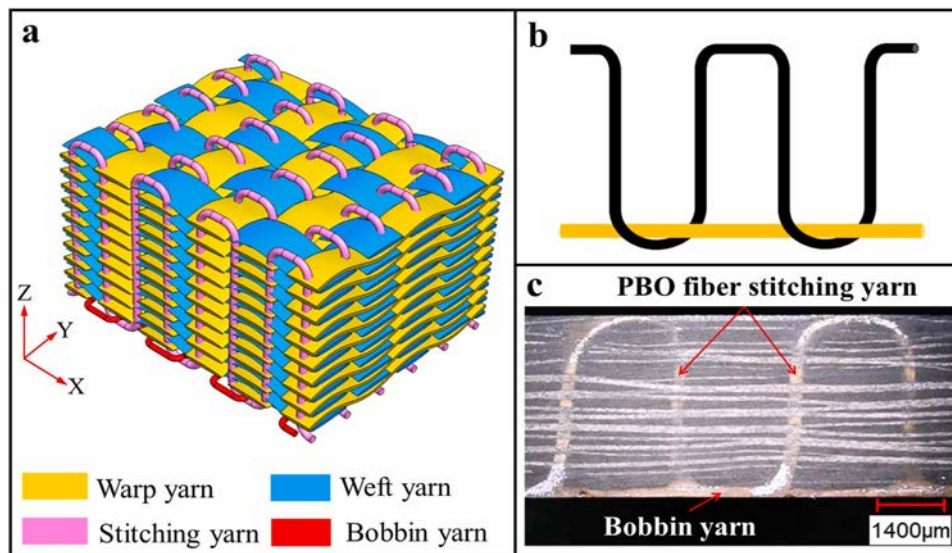
час розшарування. Початкова ділянка навантаження до моменту утворення тріщини є майже однаковою для 2D і 3D композитів. Проте подальше розширення тріщини призводить зростання напружень в 3D-композитах. Про що свідчить ефективність наскрізного армування у стримування деламінації та підвищення опору на збільшення тріщини [112].

Одночасно з цим в роботі [112, 117, 63, 114, 147] вказано, що армування шляхом зшивання призводить до зниження майже 20% міцності при деформаціях на згин. Як вказано це викликане дефектами, що виникають в процесі зшивання та пов'язані з пошкодженнями матеріалів у процесі утворення стібка, включаючи розрив волокна, зміщення волокон та елементів стібка [61] та наявність ділянок насичених лише смолою (рис. 1.12).

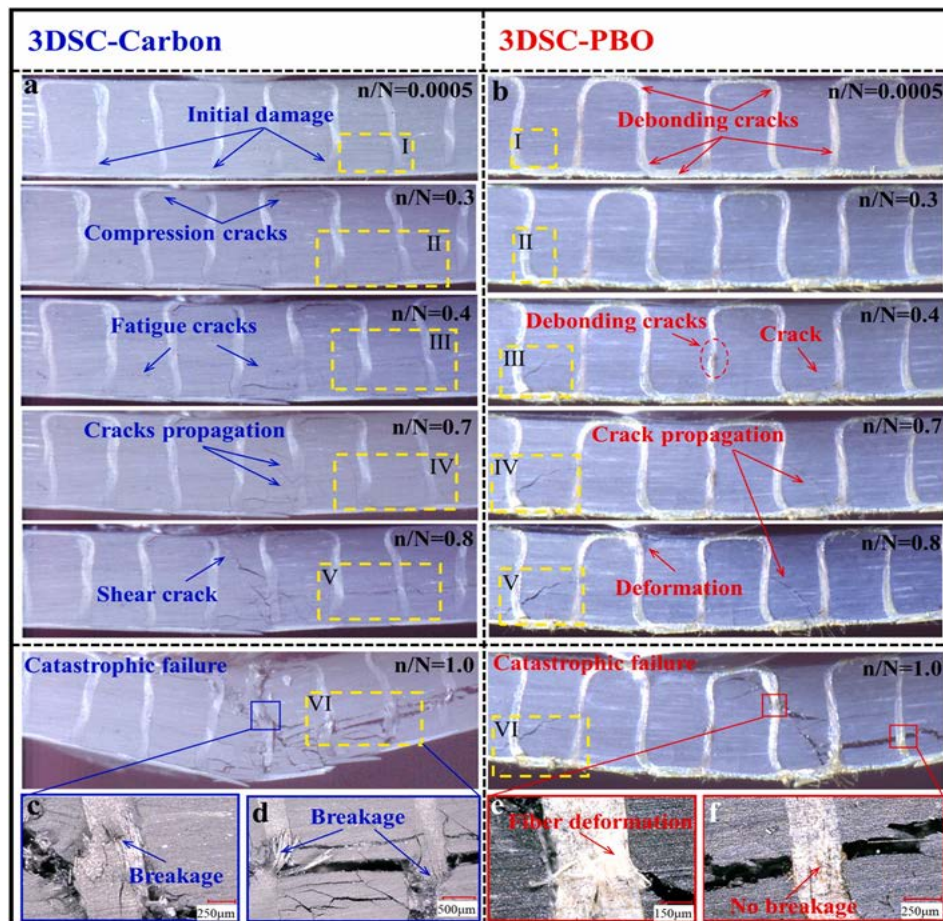
Однак дослідження в більшості стосується стібка типу 209 [59-61], характер впливу дефектів для інших стібків авторами не відзначалися.

Дослідження типу ниток при виконання човникового модифікованого стібка (наближеного до типу 301) (рис. 1.13) [148] показало, що застосування ниток на основі волокна РВО-НМ показують на 10,96% вищу втомну міцність при згині ніж нитки з матеріалу Т300-ЗК. Окрім цього автори статті вказують, що тип ниток має всі необхідні властивості швейних ниток і може з легкістю застосований при високих швидкостях на швейних машинах.

Поряд з цим автори роботи [148] проводять аналіз поведінки композитного виробу, армованого модифікованим ланцюговим стібком. Згідно з рис. 1.13, б встановлено, що характер втомного пошкодження зразків 3DSC-Carbon та 3DSC-PBO суттєво різняться. У випадку 3DSC-Carbon тріщини виникали вздовж ниток зшивання, паралельних до напрямку навантаження, що свідчить про волоконні розриви та міжстібкове руйнування. Для 3DSC-PBO початкове руйнування спостерігалось по нитках стібка у вигляді розклеювання і було локалізоване ними, без поширення на інші ділянки, що зумовлено кращими властивостями адгезії волокна РВО. Наведені результати забезпечують кількісну та якісну оцінку впливу типу ниток на характеристики зшивання багат шарових армуючих елементів, що дозволяє обґрунтовано



a



6

Рис. 1.13 Спосіб армування модифікованим човниковим стібком та характер руйнувань композитних виробів при згині [148]: а) структура стібка та спосіб армування, б) послідовність руйнування композитних зразків 3DSC-Carbon і 3DSC-PBO отриманих зшиванням, відповідно, нитками Т300-3К та РВО

обираючи нитки для досягнення необхідної міцності, стійкості до розшарування та надійності конструкції.

У роботах [149, 150] зазначено, що нерівномірність товщини матеріалів, що зшиваються значно впливає на якість стібка та рівномірність його натягу.

Дослідження в роботі [151] присвячене впливу компенсації реактивної пружності та товщини тканини на витрати швейної нитки для стібка типу 301. Встановлено, що зміна товщини тканини під дією тиску лапки впливає на витрати нитки. Однак результати роботи дозволяють об'єктивно прогнозувати її витрати в умовах виробництва завдяки високій точності моделювання (96.09% - 97.93%), але не дають можливість контролювати вплив товщини матеріалу чи зусилля притискання на якість стібка.

Паралельно з цим якість стібка та стабільність його структури залежать від відповідності значень функцій подачі нитки. Для деяких типів стібків проаналізовано функції дійсної та необхідної подачі ідеальної нитки [152].

Роботи [153-156] присвячені аналізу функції подачі нитки човникового стібка - 301 типу, робота [157] - однопниткового ланцюгового потайного стібка - 103 типу [158-161] ланцюгових стібків класу 400.

Визначення значень необхідної $P'(\varphi)$ та дійсної функції подачі $P(\varphi)$ ідеальної нитки [152] аналітичним шляхом розглянуто в роботах [153-156], що може бути використано для об'єктивної оцінки процесу утворення стібка (виявленні надмірної або недостатньої подачі нитки). В роботах [139, 162] також приведені методики та результати експериментальних досліджень функцій необхідної $P'(\varphi)$ та дійсної $P(\varphi)$ подачі ідеальної нитки ґрунтовані на прямих та непрямих вимірах.

У роботах [158-161] розглянуто методику визначення функції подачі нитки з урахуванням її властивостей та натягу в процесі утворення стібка типу 401. Авторами цих робіт вказано, що спочатку необхідно аналітично визначити її значення для ідеальної нитки на основі математичної моделі, після чого реальні властивості нитки врахувати як результат деформацій ділянок загального контуру подачі [161].

В роботі [157] вказано, що одониткові ланцюгові стібки менш вимогливі до різниці значень функції дійсної та необхідної подачі нитки порівняно зі стібками типів 300, 400 і 500. Однак вплив регульованих та технологічних параметрів (t , m) на ці функції не досліджено, що є критичним для виготовлення композитних преформ, де стабільна подача нитки визначає якість виробів [149, 150].

Залежність якості ланцюгових стібків від натягу нитки, стабільності переміщення шарів матеріалу та відповідності функцій $P(\varphi)$ і $P'(\varphi)$ досліджена в роботах [161, 162]. Будова механізмів подачі нитки для утворення стібка типу 101, які оснащені ниткоподавачами, інтегрованими у рухомі ланки механізму голки розглянута в роботі [162]. Згідно з класифікацією [163] такі механізми належать до механізмів із простим кінематичним ланцюгом повзунного, або кулачкового типу з пружним коромислом-компенсатором.

Аналіз літературних джерел показав, що, незважаючи на простоту утворення стібка типу 101 та механізмів подачі нитки машин для його утворення, дослідження процесу подачі нитки не проводилось. Відсутність відомостей про функції необхідної та дійсної подачі нитки ускладнює розробку та налагодження відповідних механізмів, особливо при зміні значень технологічних параметрів стібка.

У деяких машинах в механізмах подачі нитки відсутні регульовані нитконапрямники, тому необхідна подача $P'(\varphi)$ забезпечується регулятором натягу, перетягуванням нитки з попередніх стібків або її деформацією. Таким чином аналіз літературних джерел показав, що процес подачі нитки при утворенні стібка типу 101 досліджений недостатньо, тому важливим завданням є визначення характеристик функцій $P(\varphi)$ та $P'(\varphi)$ для забезпечення оптимальної подачі нитки.

З огляду на проведений аналіз, доцільним є розроблення швейного обладнання з автоматизованим регулюванням подачі нитки, яке дозволить адаптувати процес зшивання до змін технологічних параметрів. Це сприятиме

забезпеченню стабільної якості з'єднань у текстильних армуючих елементів для виготовлення композитних виробів.

1.7 Аналітичний огляд технологічних процесів утворення ланцюгових стібків типу 101

Серед відомих процесів утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101 не всі забезпечують вимоги до стабільності його формування залежно від зміни технологічних параметрів, а також властивостей ниток і текстильних матеріалів, що зшиваються. Ці обмеження зумовлені геометрією робочих органів, їх взаємним розташуванням, а також характером взаємодії з нитками та зшиваними матеріалами. Унаслідок цього можуть виникати дефекти, які складно усунути навіть за допомогою вдосконалення механізмів машин або зміни конструктивного виконання робочих органів.

Найбільшого поширення набули технологічні процеси утворення стібка типу 101 за допомогою голки з вушком у поєднанні з обертовим, коливним або просторово рухомим розширювачем [140]. Відомі й інші способи, зокрема із застосуванням голки з гачком і накидувача нитки, при яких проникнення в зшивні матеріали відбувається через попередній прокол шилом. Проте ці варіанти застосовуються обмежено через ризик пошкодження матеріалів з низькою зв'язністю волокон.

У класичній компоновці механізмів у швейних машинах ланцюгового стібка типу 101 виділяють такі основні робочі органи:

- голка з вушком (або гачком);
- шило;
- розширювач (обертовий, коливний, гачковий);
- накидувач;
- зубчаста рейка;
- притискна лапка;
- механізм подачі нитки (МПН).

З метою обґрунтованого вибору структури та компоновання механізмів машини виникає необхідність аналізу робочого процесу утворення стібка для виявлення здатності до стабільного захоплення петлі-напуску, заколу попередньої петлі нитки, а також можливості зшивання текстильних матеріалів з обмеженою структурною цілісністю (ровінгу, тову, нетканих вуглецевих полотен, стрічкових структур тощо). При цьому для вибору базової платформи та подальшої розробки механізмів з автоматизованим регулюванням подачі нитки слід враховувати здатність машини реалізовувати процес формування стібка за умов змінної товщини зшиваних матеріалів.

Враховуючи підвищену ймовірність руйнування волокон у процесі утворення стібка за допомогою голки з гачком і необхідність попереднього проколу шилом, подальший аналіз процесів утворення стібка типу 101 доцільно зосередити на варіантах із використанням голки з вушком, які є більш універсальними для роботи з делікатними армувальними матеріалами.

Характер впливу робочих органів на реалізація процесу утворення стібка типу 101 у науковій літературі розглядається фрагментарно. Однак у низці джерел зазначається, що розміри та траєкторії робочих органів впливають на неоднорідність функції необхідної подачі нитки [162, 164-171]. Зокрема, у випадках, коли петлі зісковзують з розширювача або виникає потреба у скороченні довжини нитки за короткий період, контур витрат нитки змінюється різко та нерівномірно. Подібні ефекти описані для процесів утворення стібків класу 400 [157, 159, 162, 171] і є критичними з точки зору розробки механізмів з адаптивним регулюванням подачі нитки. У зв'язку з цим, під час аналізу конструкцій та синтезу керованих механізмів необхідно враховувати як характерну геометрію органів, так і їхній вплив на зміну витрат нитки в ключові періоди утворення стібка.

В усіх процесах утворення стібка слід виділити характерні моменти (рис. 1.14, 1.15), у яких можливе скорочення вільної нитки, ініціація затягування стібка або звільнення попередніх петель, що супроводжується різкою зміною "контур витрат" нитки [161, 162, 172].

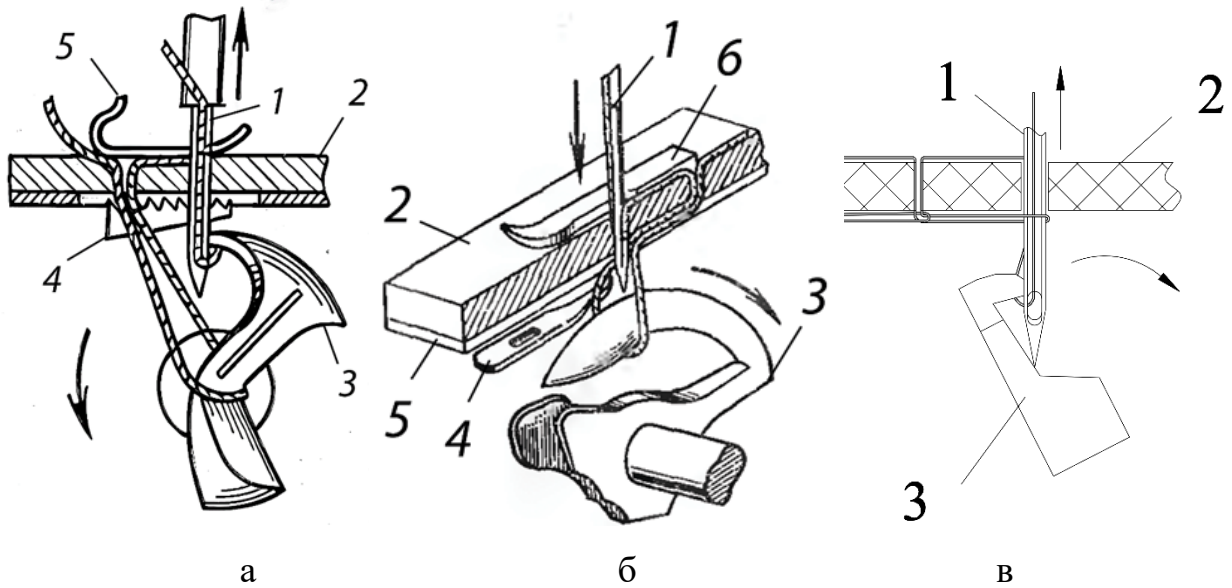


Рисунок 1.14 - Моменти захоплення «петлі-напуску» розширювачем залежно від характеру його руху: а - обертовий; б - коливний; в - просторовий

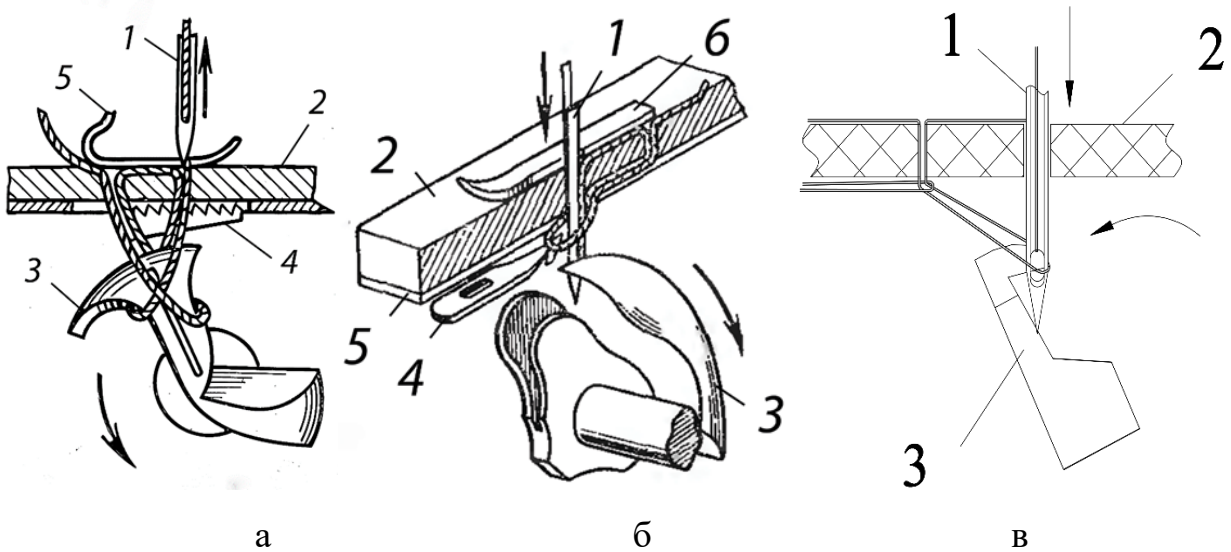


Рисунок 1.15 - Моменти сходження попередньої петлі нитки з розширювача після «заколу» голкою, залежно від характеру його руху: а - обертовий; б - коливний; в - просторовий

З огляду на величину довжини "контур витрат" нитки, яка задіяна у формуванні стібка типу 101, видно, що застосування обертового розширювача 3 (рис. 1.14, а) супроводжується значною довжиною цього контуру. Це зумовлено взаємодією нитки зі складною поверхнею розширювача 3, на якій петля постійно утримується протягом практично всього циклу. Звільнення попередньої петлі нитки (рис. 1.15, а), можливе лише після захоплення "петлі-напуску" (рис. 1.14, а). У результаті петля нитки майже весь час взаємодіє лише з поверхнею обертового розширювача, а її скорочення можливе лише в одному визначеному періоді формування стібка. Такий механізм розширювача на відміну від своєї простої конструкції [140, 162] вимагає високої відповідності дійсної подачі нитки до необхідної. Навіть незначне перевищення призводить до утворення вільних петель та повторного їх захоплення, або пропусків стібків [140], що, своєю чергою, спричиняє ризик намотування нитки на розширювач. По при відомі переваги механізмів розширювача [140], застосування обертового розширювача потребує точної геометрії, особливо при роботі з нитками підвищеної жорсткості [10, 173].

Натомість при використанні коливного розширювача (рис. 1.14, б) у процесі формування стібка беруть участь додаткові елементи, зокрема гачок 4 (рис. 1.15, б), який утримує попередню петлю нитки в момент виконання "заколу" голкою 1. У таких умовах скорочення "петлі-напуску" після її захоплення розширювачем обмежене наявністю гачка 4, що утримує попередню петлю до завершення фази формування стібка. Відповідно, петля одночасно взаємодіє з поверхнями розширювача 3, стержнем голки 1 та гачком 4, і її просторове положення визначає надійність процесу утворення стібка. Невідповідність між дійсною та необхідною подачею нитки призводить до коливань натягу в контурі, що, як зазначено в [157, 174], може спричинити пропуски стібків. Крім того, використання гачка 4 обмежується через ризик пошкодження ниток, особливо при зшиванні армувальних матеріалів із низькою стійкістю до зминання або зсуву.

Процес утворення стібка типу 101 із просторовим розширювачем у наукових джерелах висвітлюється недостатньо. Водночас він має певну схожість із процесом утворення стібка типу 401 [140, 162], у якому використовується петельник із просторовою траєкторією руху. Основною відмінністю є те, що при формуванні стібка типу 101 скорочення попередньої петлі нитки після її сходження з носика розширювача відбувається до розмірів, обмежених стержнем голки, а не поверхнею зшиваного матеріалу, як у типі 401 [162, 158, 159]. «Закол» голкою виконується в попередню петлю голкової нитки, яка формується гачкоподібним розширювачем із мінімальними геометричними розмірами.

Натомість у процесі формування стібка типу 401 петельник виконує рух, співрозмірний із ходом голки [139, 174, 175], щоб забезпечити утворення «ниткового трикутника» [159, 158, 162, 171]. У механізмах утворення стібка типу 101 хід розширювача обмежений переміщенням від крайнього лівого положення до лінії голки для захоплення «петлі напуску» та мінімального виходу за стержень голки. Це пояснюється тим, що в механізмі застосований кулачковий кінематичний ланцюг із вистоем, який реалізовано у швейних машинах серій GK-9 (GK9-2, GK9-10, GK9-18A, GK9-202, GK9-500, GK9-801, GK9-886, GK9-890C, GK-9000A), GK26-1A, GK35 (GK35-8), GK-3700, KP3000, RG-900D (RG-668, RG-555) [176, 177].

Порівняно з іншими варіантами, спосіб утворення стібка із застосуванням просторового розширювача має низку переваг. Компактні розміри гачкоподібного розширювача зумовлюють мінімальний вплив на функцію необхідної подачі нитки. Завдяки наявності вистоя в кулачковому механізмі забезпечується можливість проектування бажаної траєкторії руху робочого органа в межах заданого кута повороту головного вала. Важливою особливістю є поетапне затягування стібка - спочатку голкою, а потім сумісно розширювачем, ниткоподавачем та за рахунок переміщення зшиваних матеріалів. Такий розподіл функцій дозволяє знизити пікові навантаження на нитку, зменшити деформації в зоні стібка та покращити якість його формування при роботі з армувальними структурами, чутливими до пошкоджень.

1.8 Аналіз механізмів швейних машин для утворення стібка типу 101

Для реалізації технологічних процесів утворення стібка типу 101 у ланцюгових швейних машинах застосовуються класичні механізми голки з чотириланковою (рис. 1.6, а, б) або шестиланковою структурою (рис. 1.16 г, д) [172, 177, 178]. Вплив параметрів ланок на положення голки та її взаємодію з іншими органами докладно розглянуто в роботах [175, 178]. Механізми подачі нитки (рис. 1.15), що застосовуються в швейних машинах ланцюгового стібка, зазвичай мають просту кінематичну структуру [162, 179], аналогічну механізму голки. Відомі дослідження переважно зосереджені на процесах утворення стібків типу 401 і 402 [158, 159, 1620, 162], які не відображають повною мірою особливості подачі нитки в однопнитковому стібку типу 101. Це створює певні обмеження для проєктування нових механізмів, адаптованих до специфіки формування цього типу стібка. Окремі підходи до проєктування та аналізу механізмів подачі нитки наведено в [123, 168, 172], однак комплексних рішень для умов роботи з армувальними матеріалами недостатньо, особливо за змінних технологічних умов.

Окрему увагу слід звернути на конструкції механізмів подачі нитки (рис. 1.17 а, г, д), в яких застосовуються U-подібні та І-подібні [160, 162] нитконапрямники, що сприяють стабілізації процесу утворення петлі-напуску завдяки впливу на дожину контуру нитки. Крім того, регульовані нитконапрямники (рис. 1.17, а, б, г, д) дозволяють забезпечити необхідну величину подачі нитки. У деяких моделях, зокрема машині 62-55 кл. фірми «Singer» (рис. 1.17, е), реалізовано конструкцію нитконапрямника, поєднаного з пристроєм притискної лапки, що виконує функцію накопичення запасу нитки в момент її підняття (рис. 1.16, [163]). Така компоновка дозволяє уникнути висковзування нитки з вушок голок після відокремлення ниток, в процесі завершення операції.

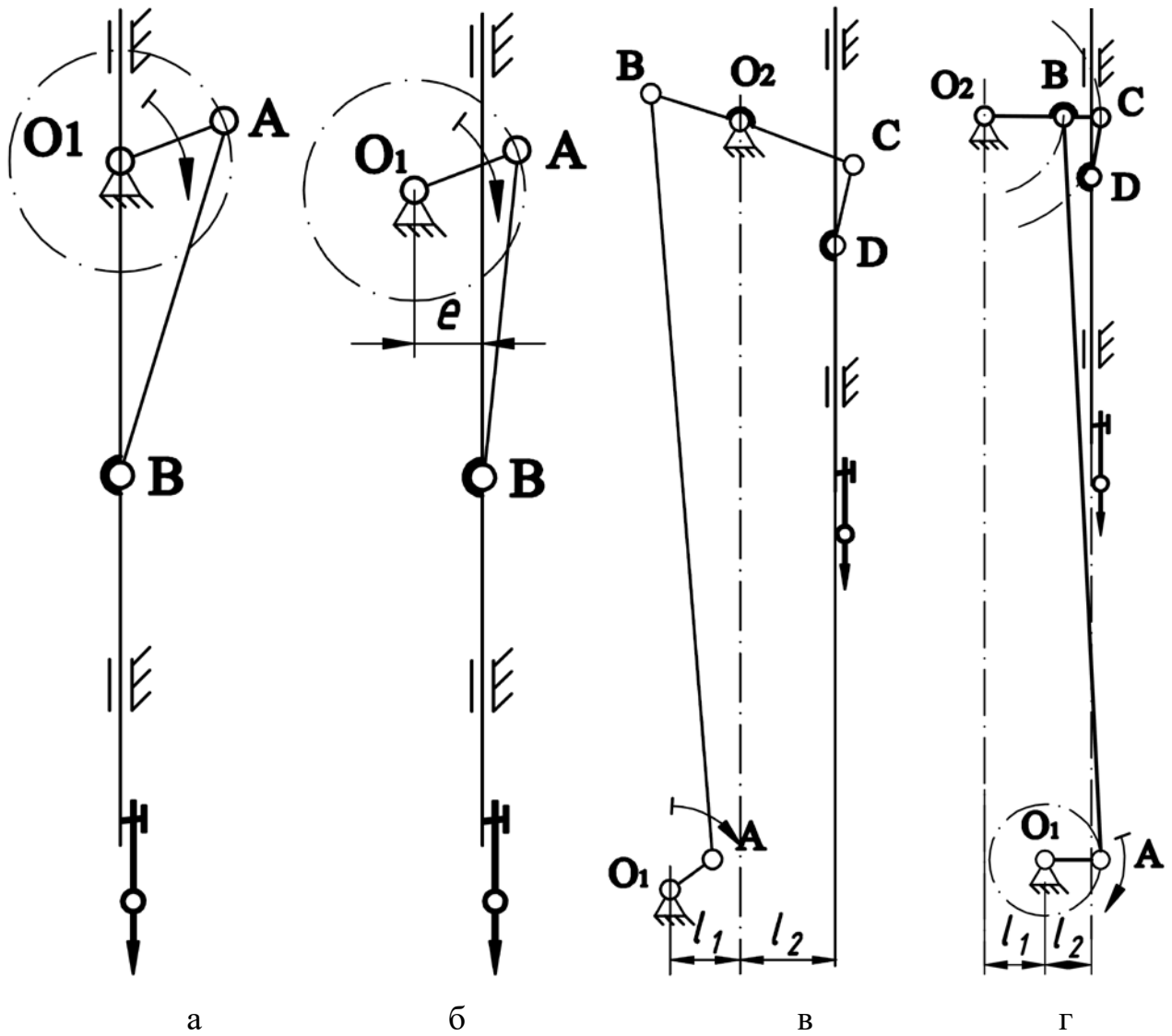


Рис. 1.16 Кінематичні схеми механізмів голки нитки швейних машин для виконання стібків типу 101

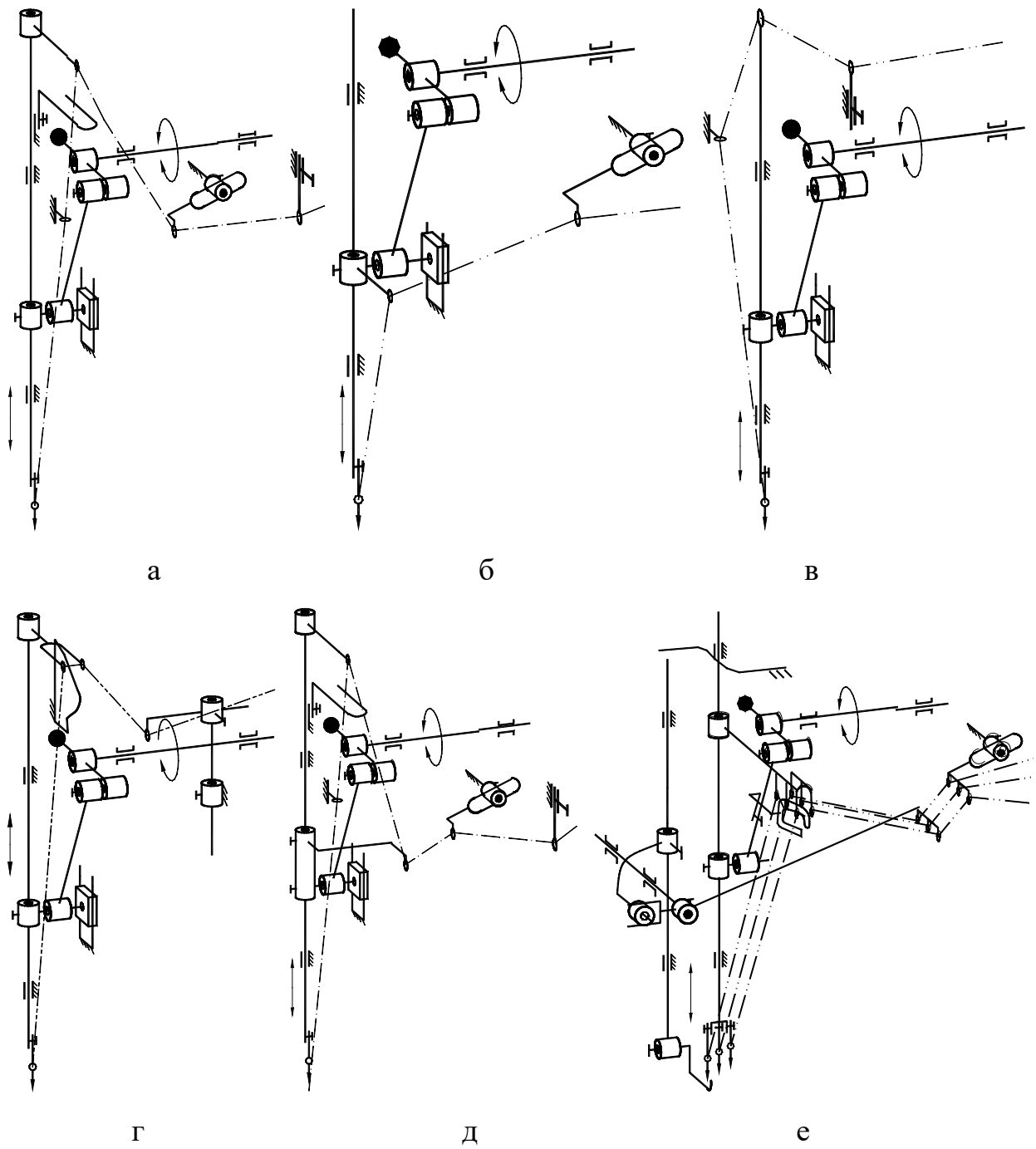


Рис. 1.17 Кінематичні схеми механізмів подачі нитки швейних машин для виконання стібків типу 101 [162, 163]

У всіх відомих конструкціях механізмів подачі нитки передбачено лише фіксоване налаштування, яке відповідає конкретним технологічним параметрам стібка. Такий підхід не дозволяє автоматично змінювати подачу нитки залежно від варіацій товщини матеріалів, довжини стібка чи натягу нитки в процесі зшивання. У результаті порушується стабільність натягу нитки, що призводить до погіршення стягуваності шва, посадки шарів матеріалу та загальної якості формування стібка, особливо у випадках з багатошаровими або армувальними текстильними матеріалами.

Механізми розширювачів, що використовуються для утворення стібків типу 101, класифікуються залежно від характеру їх руху. У випадку рівномірно обертових розширювачів, приводом слугує головний вал швейної машини або вал із передавальним відношенням 1:1 до головного [140, 164]. Для механізмів із коливним розширювачем зазвичай застосовуються кривошипно-коромислові структури [140]. У механізмах із просторовою траєкторією розширювача забезпечується кулачковими механізмами, кулачка з кінематичним замиканням або кулачка з силовим замиканням під дією пружних елементів [139].

Для більшості механізмів функції положення визначаються на основі класичної механіки. У випадку кулачкових механізмів це ускладнено через складність визначення просторової геометрії кулачкової поверхні [139]. Відомості про подібні параметри механізмів в літературних джерелах відсутня.

Тому для кулачкових механізмів визначення функції положення потребує або використання апроксимації геометрії кулачка, або застосування експериментальних методів, що ускладнює побудову точних моделей руху.

Механізми переміщення матеріалу, як правило, виконані рейкового типу - з однією зубчастою рейкою та притисочною лапкою [139, 140] (рис. 1.18). У більшості конструкцій подібні механізми реалізовані у вигляді важільних кінематичних ланцюгів [139, 180] (рис. 1.18, а), хоча в окремих випадках вони можуть включати кулачкові елементи (рис. 1.18, б)) для формування складної траєкторії руху рейки з висоєм у напрямку вертикальних переміщень, або з метою спрощення конструкції самого механізму.

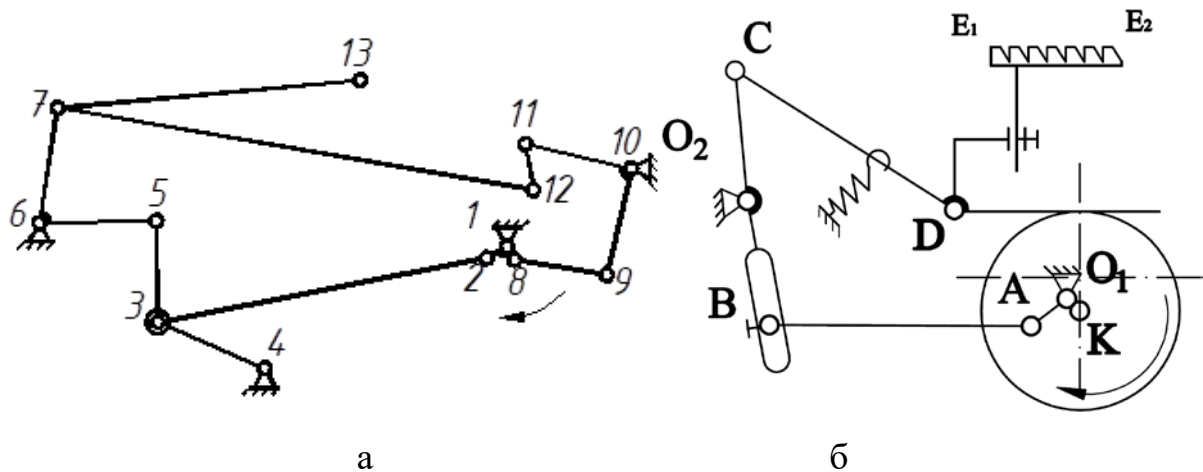


Рис. 1.18 Кінематичні схеми механізмів переміщення швейних машин: а) важільні, б) важільно-кулачкові

В процесі утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101 синхронна робота функціональних механізмів швейної машини визначається відображається у вигляді циклограм та синхрограм [139, 167]. Ці графоаналітичні залежності описують послідовність і взаємозв'язки переміщень основних робочих органів: голки, розширювача, ниткоподавача та механізму переміщення матеріалу, що у сукупності забезпечують формування стібка певного типу.

Відомі циклограми, наведені в технічній літературі [139, 162, 164, 167, 170, 171, 174, 175,], як правило, фрагментарні, подані окремо для кількох механізмів і не дозволяють повною мірою відстежити їх взаємодію поздовж процесу утворення стібка. Зокрема, акцент зазвичай зроблений на взаємне розташування голки й розширювача в момент захоплення «петлі-напуску» та «заколу» [139, 170, 175], тоді як функції подачі нитки та вплив технологічних параметрів на її значення не розглядаються.

Синхрограми, що використовуються для аналізу швейних машин човникового або ланцюгового типу, орієнтовані здебільшого на багатониткові стібки (типу 301, 401, 504 тощо) і не враховують специфіку одониткової структури стібка типу 101 [139, 162, 167]. Унаслідок цього відсутні узагальнені

синхрограми, які охоплюють усі фази руху ниткоподавача, розширювача та голки із зазначенням точок співпадіння, переходів і впливу на функцію подачі нитки $P(\varphi)$ та необхідну функцію $P'(\varphi)$.

Наявні розрізнені циклограми ускладнюють проектування механізмів із можливістю автоматичного, або адаптивного регулювання подачі нитки, оскільки не дозволяють виконати вичерпний аналіз моментів взаємодії робочих органів. Крім того, у літературі відсутні циклограми, що описують зміну зусиль у нитці або фазу затягування петлі, яка в однопниткових стібках типу 101 виконується послідовно - спочатку рухом голки, а далі розширювачем і ниткоподавачем [139, 140, 162].

Аналіз конструкцій механізмів утворення стібка типу 101 свідчить, що у ланцюгових швейних машинах цього типу використовуються переважно класичні кінематичні структури механізмів голки, подачі нитки, розширювачів і переміщення матеріалів. Незважаючи на їхню конструктивну простоту, механізми подачі нитки не забезпечують адаптацію до змін технологічних параметрів у процесі зшивання. Відсутність автоматизованого регулювання подачі нитки призводить до нестабільного натягу, зниження якості формування стібка, особливо під час зшивання багатошарових або армованих текстильних матеріалів зі змінною товщиною.

Найбільші складнощі моделювання пов'язані з механізмами, що забезпечують просторовий рух розширювача, для яких визначення функцій положення потребує застосування методів апроксимації геометрії кулачків або експериментальних досліджень. Це зумовлює необхідність пошуку нових інженерних рішень щодо спрощення таких конструкцій та підвищення їх точності.

Крім того, відсутність узагальнених циклограм і синхрограм для машин зі стібком типу 101, що враховують вплив технологічних параметрів, ускладнює як теоретичне обґрунтування, так і практичне проектування механізмів подачі нитки. У зв'язку з цим пріоритетним завданням подальших досліджень є побудова узагальненої синхрограми з урахуванням фаз подачі, формування та

затягування стібка, що дозволить підвищити стабільність процесу зшивання та забезпечити високу якість з'єднання в умовах змінних технологічних параметрів.

1.9 Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що сучасні армуючі елементи для композитних матеріалів класифікуються за вимірністю, орієнтацією волокон і технологією формування. Особливу увагу приділено 3D текстильним структурам, здатним забезпечити підвищену міцність і надійність композитів за рахунок наскрізного армування. Визначено, що перспективним методом формування таких армуючих елементів є зшивання багатошарових текстильних пакетів однопнитковим ланцюговим стібком типу 101, або локальне армування зокрема із застосуванням ниток підвищеної міцності.

Аналіз конструкцій швейних машин і механізмів подачі нитки показав обмеженість типових рішень, щодо використання їх в технологічних процесах де спостерігається зміни технологічних параметрів зшивання, зокрема товщини матеріалів і довжини стібка. Підтверджено, що ключовим фактором, який впливає на якість армування, є узгоджена робота голки, ниткоподавача та розширювача, а також відповідність функції дійсної подачі нитки до необхідної. У всіх проаналізованих конструкціях відсутнє автоматизоване регулювання подачі нитки, що унеможлиблює адаптацію обладнання до змінних умов зшивання без попереднього ручного налаштування.

Виявлено недостатній рівень систематизації знань, щодо періодів процесу утворення стібка типу 101 та взаємодії функціональних механізмів упродовж одного оберту головного вала. Практично відсутні узагальнені циклограми та синхрограми, які б демонстрували взаємозв'язок між фазами подачі, формування й затягування стібка залежно від технологічних параметрів. Це значно ускладнює як побудову уніфікованих аналітичних моделей, так і розробку ефективних адаптивних механізмів подачі нитки.

Ці недоліки підтверджують актуальність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення швейних механізмів з урахуванням вимог до стабільної якості армування 2D- і 3D-текстильних структур при змінних параметрах стібка.

В межах даної основної задачі в нинішній роботі планується вирішити наступні питання:

1. Уточнити класифікацію текстильних армуючих елементів за принципом ієрархічності, сформуванати глобальний клас 3D-структур, охарактеризувати їх механіко-технологічні особливості та структуру обладнання для виготовлення за механічними технологіями.

2. Проаналізувати процес утворення одониткових ланцюгових стібків типу 101 з урахуванням взаємодії голки, ниткоподавача та розширювача, а також побудувати узагальнену синхрограму функціонування основних механізмів швейної машини з урахуванням фаз подачі, утворення та затягування стібка.

3. Провести експериментальне визначення функцій дійсної та необхідної подачі нитки для одониткового ланцюгового стібка залежно від товщини матеріалів, довжини стібка та режиму натягу.

4. Побудувати аналітичну модель функції необхідної подачі нитки з урахуванням градієнтної оцінки, а також регресійні моделі функцій подачі нитки і дослідити їх залежність від технологічних параметрів зшивання.

5. Розробити та здійснити структурно-параметричний синтез конструкції механізму подачі нитки з можливістю автоматизованого регулювання її величини, адаптованої до змін технологічних умов.

6. Перевірити працездатність запропонованої конструкції на модернізованій машині та оцінити ефективність подачі нитки за основними критеріями якості структури стібка.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕКСТИЛЬНИХ АРМУЮЧИХ СТРУКТУР І ЗАСОБІВ ЇХ ФОРМУВАННЯ

2.1 Розроблення класифікацій текстильних армуючих елементів композитних матеріалів

Аналітичний огляд сучасних підходів до створення армуючих структур, поданий у першому розділі, засвідчив відсутність єдиної систематизованої класифікації текстильних преформ, яка б комплексно охоплювала структурні, технологічні та функціональні ознаки. Наявні класифікації, як правило, фрагментарно описують лише тип матеріалу або метод виготовлення, не враховуючи особливостей формоутворення, способів армування у товщі матеріалу чи можливості поєднання технологій.

У зв'язку з цим запропоновано узагальнену дворівневу класифікацію текстильних армуючих преформ (рис. 2.1, 2.2), яка дозволяє систематизувати існуючі типи конструкцій за сукупністю визначальних ознак і критеріями.

За типом матеріалу: скляні, вуглецеві, арамідні, базальтові, льняні, конопляні, бавовняні волокна, а також гібридні (з комбінованих волокон) (рис. 2.1);

За розмірністю структури:

1D - одновимірні: волокна, пряжа, нитки, ровінг;

2D - двовимірні: тканини, трикотаж, неткані полотна;

2.5D - двовимірні з частковим прошиванням або проколюванням: стібкові, прошивні матеріали;

3D - тривимірні об'ємні структури: тканини, плетені, трикотажні, неткані матеріали з армуванням у трьох напрямках;

4D - тривимірні структури з інтеграцією адитивних технологій на основі 3D-преформ;

- за орієнтацією волокон: односпрямовані, двоспрямовані, багатоспрямовані, ізотропні;
- за типом технології виготовлення: ткацтво, плетіння, в'язання, формування, зшивання, гібридні методи (рис. 2.2).

Відповідно до цього, армуючі елементи преформ поділяють на: армовані по всій товщині, неткані, ткані, в'язані, плетені та гібридні.

Армування по всій товщині дозволяє створювати об'ємні армуючі структури за допомогою таких технологій:

- Тафтинг - виготовлення текстильних матеріалів шляхом прошивання шарів нитками, які формують петлі або ворс на поверхні. Петлі фіксуються лише завдяки силам тертя між ниткою та тканиною, без утворення вузлів чи жорсткого з'єднання.

- Z-pinning - технологія армування, що передбачає введення тонких армуючих стрижнів або штифтів крізь товщу армуючого елемента преформи в напрямку осі Z (перпендикулярно до площини текстильних шарів). Такий підхід суттєво підвищує міцність конструкції в напрямку товщини та запобігає розшаруванню.

- Швейні - застосування швейних технологій із використанням човникового стібка типу 301, який утворюється переплетенням двох ниток: верхньої (голкової) та нижньої(човникової) - у середині товщини матеріалу. Цей стібок має високу міцність і стійкість до розпускання і широко застосовується у швейній промисловості.

У випадках значної товщини матеріалів використовують модифікований човниковий стібок, заснований на принципі типу 301, у якому натяг ниток регулюється таким чином, щоб вузлове переплетення утворювалося на зовнішній поверхні матеріалу. Це дозволяє зменшити його деформацію та потребує меншого зусилля затягування стібка.

В свою чергу ланцюгові стібки типів 101 і 401 мають переваги порівняно з човниковими, зокрема можливість армування великих площ без потреби у повторному заправленні ниток.

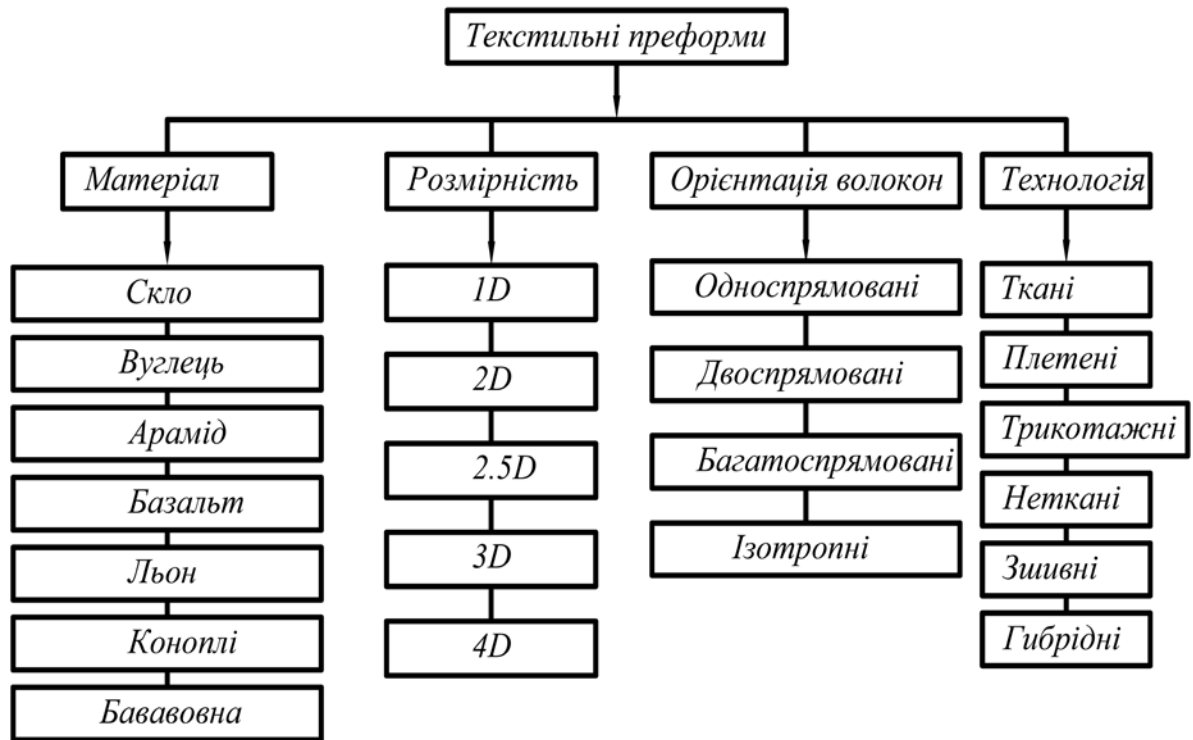


Рис. 2.1 Комплексна класифікація текстильних армуючих преформ

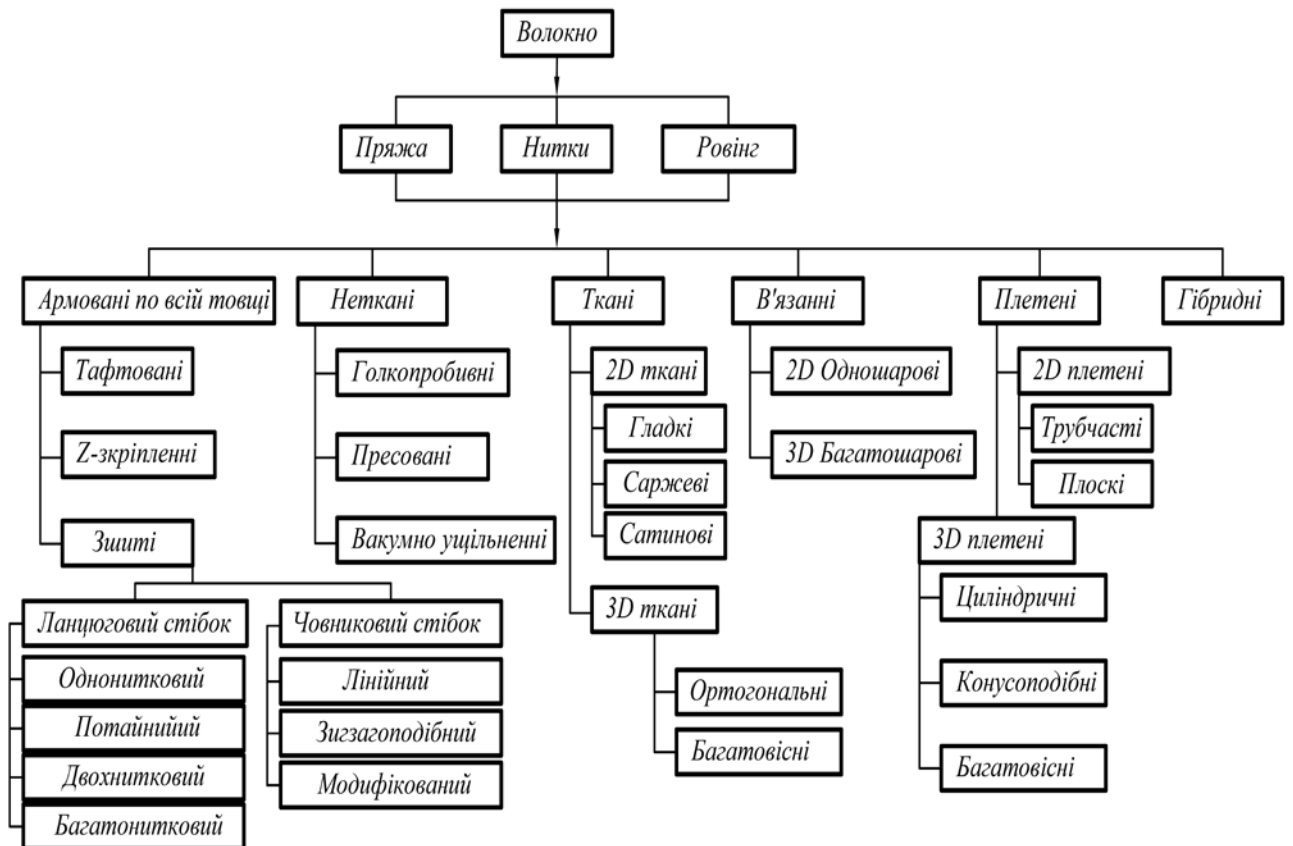


Рис. 2.2 Класифікація текстильних армуючих елементів преформ за способом отримання

Подібні властивості має потайний стібок 103 типу - призначений для створення непомітних з'єднаних деталей текстильних виробів однією ниткою. Запропонована узагальнена класифікація показує, які технології використовуються для формування різних армуючих структур та дозволяє систематизувати підходи до їх виготовлення.

2.2 Проєктування системи формування армуючих текстильних структур на основі об'єктно-орієнтованого аналізу

На основі аналітичного огляду сучасних технологій формування армуючих елементів композитних виробів, розроблених класифікацій (рис. 2.1, 2.2), а також аналізу конструктивних особливостей обладнання, проведено порівняльну оцінку основних технологій з урахуванням їх переваг та недоліків (табл. 2.1). Окрім цього, визначено підхід до структурування механіко-технологічних систем на основі об'єктно-орієнтованого представлення (рис. 2.3) [120, 121, 141].

Ключовим елементом об'єктно-орієнтованого підходу є поняття «об'єкта» - окремої функціональної частини системи, яку виокремлюють у процесі поділу складного технологічного процесу. Кожен об'єкт має визначені вхідні дані, виконує певні дії та передає результати іншим об'єктам. Обробка даних реалізується через формули, алгоритми або методи.

У процесі аналізу структури системи виділено чотири базові класи об'єктів: *сировина, робочий інструмент, механізм та мехатроніка* (рис. 2.3). До класу «сировина» належать нитки, пряжа, волокна, філаментні матеріали. Клас «робочий інструмент» охоплює голки, човники, петельники, притискні елементи, голкові пластини та ін.. Клас «механізм» включає ниткоподавачі, клини, рейки, екструдери, приводні системи. До «мехатроніки» відносяться контролери, датчики, блоки живлення, розподільники, виконавчі модулі.

Таблиця 2.1

Способи і обладнання виготовлення механіко-технологічних каркасних структур 3D-об'єктів з текстильних матеріалів [141]

	Спосіб	Переваги	Недоліки
1	Текстильний спосіб: ткацькі верстати; в'язальні машини; плетільні машини.	Можливість застосування мехатронних модулів для інтегрованого з ткацькими верстатами швейного обладнання,	Складність проектування і експлуатації механіко-технологічних систем з комп'ютерним керуванням. Традиційні ткацькі процеси мають обмеження для створення складних 3D-форм з текстилю. Створення 3D-форм плетінням обмежене їх довжиною та складністю реалізацією плетільного способу.
2	Швейний спосіб: спеціальні швейні машини; вишивальні машини-автомати	Високоєфективне застосування модернізованого існуючого технологічного обладнання	При об'єднанні текстильного і швейного виробництв виникає потреба в збільшенні виробничих площ
3	Спосіб формування: обладнання для формування 3D-преформ з волокон, ниток і нетканих матеріалів	Простота і економічність виготовлення 3D-преформ	Відсутня каркасна структура і тому низька міцність 3D-преформ
4	Спосіб намотки круглих 3D-преформ	Висока продуктивність	Відсутня каркасна структура і обмежений асортимент застосування 3D-преформ
5	Спосіб викладки деталей крою з текстилю для 3D-преформ різної товщини: ручна викладка; роботизована викладка.	Можливість виготовлення складних 3D-преформ для композитних деталей загального і спеціального машинобудування	Велика вартість апаратних і програмних засобів роботи технологічних систем з сенсорами технічного зору
6	Адитивні технології в поєднанні з ткацьким, в'язальним, плетільним способом.	Можливість створення об'єктів складних 3D-преформ з одночасним формуванням та її фіксацією.	Обмеженість застосування типу матеріалів та їх вартість.

Об'єкт = Швейна нитка (голова, петельникова, нитка)	Об'єкт = голка Предмет = човниковий пристрій (петельник) Об'єкт =	Об'єкт = посилення	Об'єкт = блок живлення
Об'єкт = 2D-текстиль	ниткопритягувач Об'єкт = зубчаста рейка Об'єкт = притискна лапка Об'єкт = голкова пластина		
Об'єкт = пряжа	Об'єкт = голка Об'єкт = клин Об'єкт = платина Об'єкт = ушковаина Об'єкт = прес	Об'єкт = цільовий механізм (швейної машини, в'язальної машини, ткацького верстата, 3D плетільна машини, 3D-принтера)	Об'єкт = виконавчий механізм
			Об'єкт = датчик
	Об'єкт = катушка (основи)		Об'єкт = розподільник
Об'єкт = нитка (основа, утоку)	Предмет = човник (ткацтво) Об'єкт = бедро Об'єкт = ремізи	Об'єкт = приводний механізм	Об'єкт = контролер
Об'єкт = Нитка (технології адитивного виробництва полімерного матеріалу)	Об'єкт = екструдер		
Базовий клас Об'єкт = сировина	Базовий клас Об'єкт = робочий інструмент	Базовий клас Об'єкт = механізм	Базовий клас Об'єкт = мехатроніка
Механіко-технологічна система для виробництва шиття, в'язання, ткацтва, плетіння та адитивного виробництва			
	Основні принципи об'єктно-орієнтованого аналізу та синтезу		
Розкладання			Делегування повідомлень
Успадкування			Поліморфізм

Рис 2.3 Схема узагальненої топології об'єктно-орієнтованого проектування механіко-технологічних систем 3D-тканин

У таблиці 2.1 подано основні способи та типи обладнання, що використовуються для виготовлення каркасних 3D-структур з текстильних матеріалів. У ній вказано переваги та недоліки кожної технології. Загальну схему побудови систем для створення 3D-тканин у межах швейної, ткацької, в'язальної та адитивних технологій подано на рис. 2.3.

У структурі об'єктної моделі (рис. 2.3) представлені елементи технологічного процесу: нитки, петлетворювальні механізми, притискні пристрої, подаючі системи, вузли керування та живлення. Особливу увагу приділено цільовим механізмам - багатофункціональним об'єктам (швейна машина, ткацький верстат, 3D-принтер), які поєднують механічні й керувальні функції.

Запропонована модель дає змогу описувати як окремі функціональні вузли, так і взаємодію між ними в межах цілісного технологічного процесу. Такий підхід є універсальним для широкого спектра текстильних технологій. Він забезпечує деталізацію операцій, узгодження дій між елементами системи, адаптацію до конструкцій армуючих компонентів, а також високу точність і керованість. Реалізація функцій за принципами спадкування, інкапсуляції та делегування створює основу для ефективного автоматизованого керування виробничими процесами [120, 121].

У результаті аналізу сформовано об'єктно-орієнтовану модель структури механіко-технологічної системи для формування армуючих елементів, що забезпечує системне представлення основних функціональних складових та їх взаємодії. Такий підхід дозволяє ефективно моделювати та узгоджувати роботу елементів обладнання, адаптувати систему до різних типів технологій, а також створює основу для автоматизації процесу виготовлення текстильних 3D-преформ.

2.3 Аналіз технологічного процесу утворення стібка типу 101 на базі об'єктно-орієнтований аналізу

Розглянемо об'єктно-орієнтований аналіз (*object-oriented analysis*, англ.) (ООА) при проектуванні *Object* = 3D-тканина на прикладі використання механічної технології швейного виробництва при взаємодії діади «обов'язки - делегування (успадкування)». Формування 3D-тканини зводиться до проектування циклограми швейної машини з урахуванням робочих взаємодій робочих органів.

Для формування одониткового ланцюгового стібка типу 101 (рис. 2.4) застосовуються такі робочі органи: голка (1), розширювач (2), ниткоподавач (3), зубчата рейка (4), притискна лапка (5), голкова пластина (6), регулятор натягу нитки (7).

Рух одного органу описується функціями складових його положення:

$$f(\varphi) = f_x(\varphi) + f_y(\varphi) + f_z(\varphi),$$

де: $f_x(\varphi)$ - складова руху голки вздовж осі X (горизонтальна);

$f_y(\varphi)$ - складова руху голки вздовж осі Y (вертикальна);

$f_z(\varphi)$ - складова руху голки вздовж осі Z (поперечна).

Позначення функцій переміщень $f(\varphi)$ робочих органів:

$S(\varphi)$ - функція положення голки;

$T_{u_i}(\varphi)$ - функція положення i -го ниткоподавача;

$T(\varphi)$ - горизонтальна складова функції положення зубчастої рейки вздовж строчки;

$H(\varphi)$ - вертикальна складова функції положення зубчастої рейки;

$L(\varphi)$ - горизонтальна складова функції положення розширювача вздовж строчки;

$Z(\varphi)$ - поперечна складова функції положення розширювача поперек строчки.

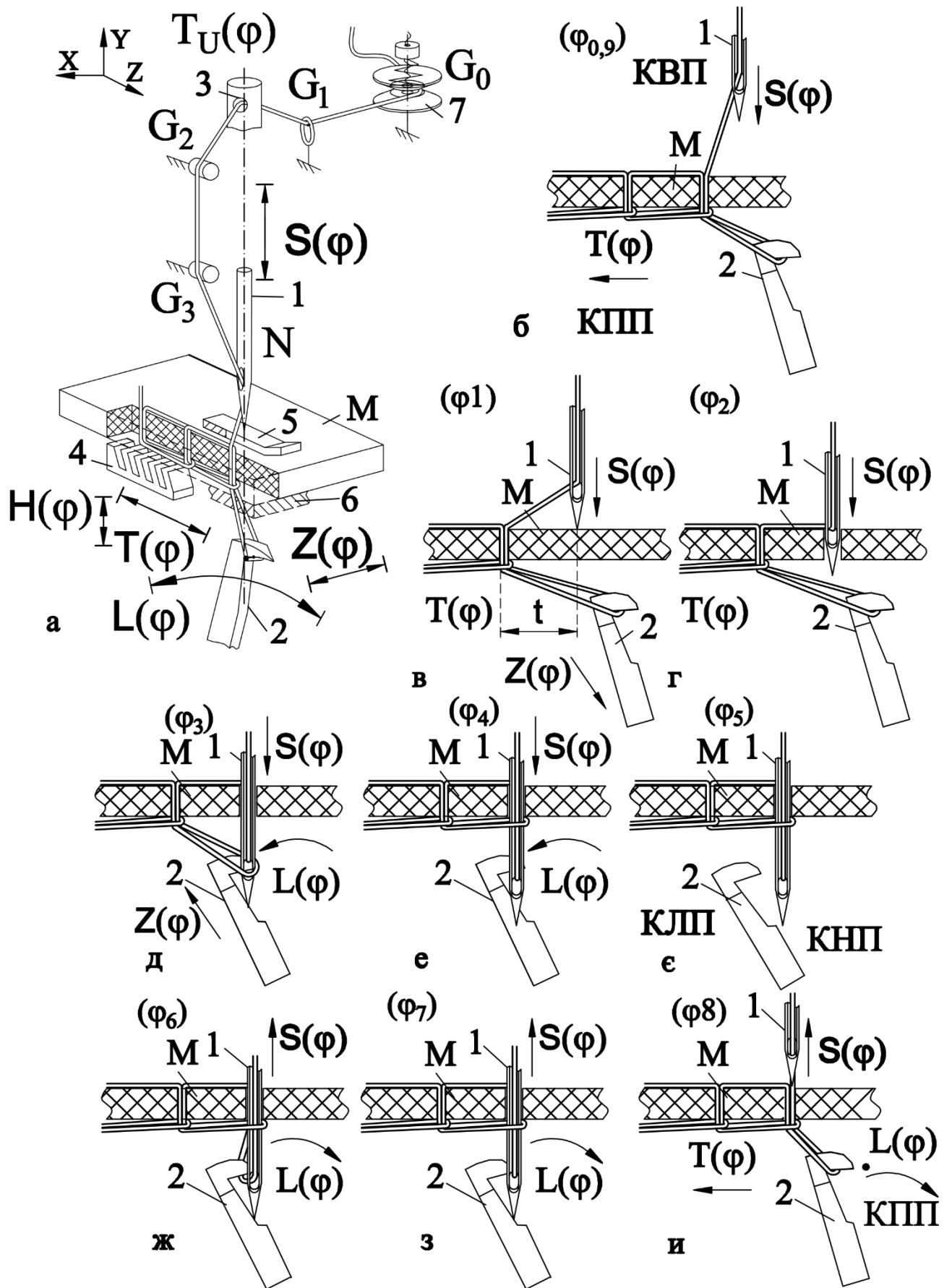


Рис. 2.4 Характерні моменти процесу утворення стібка типу 101

Основні петлетворні елементи - голка, розширювач і ниткоподавач - виконують функції у прямій залежності від кута повороту головного вала - φ , а інші органи забезпечують стабільність процесу переміщення та якості структури формування ниткового з'єднання.

«Обов'язки» об'єктів механічно-технологічної системи:

Голка ($S(\varphi)$):

- проколювання матеріалу;
- проведення нитки в зону формування петлі;
- «закол» попередньої петлі нитки;
- утворення «петлі-напуску».

«Делегування» дій розширювачу, ниткоподавачу та зубчатій рейці згідно з періодами циклограми.

Розширювач ($L(\varphi)$, $Z(\varphi)$):

- захоплення «петлі напуску», утвореної голкою;
- розширення петлі нитки та утворення «ниткового трикутника»;
- забезпечення переплетення нитки в зоні формування стібка.

«Делегування» ниткоподавачу і рейці подальших дій.

Ниткоподавач(чі) ($T_{Ui}(\varphi)$):

- подача необхідної довжини нитки голці та розширювачу в періодах розширення петель ниток та проведення її скріз матеріал;
- скорочення петель нитки, регулювання зусиль натягу нитки,
- стабілізація процесу утворення «петлі напуску», формування попередньої петлі нитки в момент «заколу»,
- затування стібка;
- змотування нитки з бобіни.

Делегування дій зубчатій рейці для переміщення матеріалу.

Зубчата рейка ($T(\varphi)$, $H(\varphi)$):

- переміщення матеріалу після завершення формування стібка;
- узгодження руху з положенням голки та ниткоподавача;

«Делегування» обов'язків притискній лапці.

Притискна лапка:

- фіксація матеріалу під час проколювання;
- утримання матеріалу при переміщенні;

«Делегування» дій регулятора натягу нитки поза процесом утворення стібка.

- **Голкова пластина:**

- сприяння формуванню петлі за рахунок геометрії отвору;
- розмежування зон руху зубчастої рейки (робоча/холоста фаза);

«Делегування» стабілізуючих функцій лапці та рейці, зшивних матеріалів.

- **Регулятор натягу нитки:**

- контроль зусилля натягу в «загальному контурі подачі нитки» в процесі утворення стібка,
- забезпечення стабільного натягу нитки відповідно до зусилля затягування стібка;

«Делегування» нитці моменту подачі відповідної довжини для формування наступних $i+1$ стібків.

З аналізу процесу утворення стібка типу 101 у класичній схемі, на основі об'єктно-орієнтованого аналізу (ООА), встановлено, що відсутнє делегування функцій подачі нитки від механізмів притискної лапки та зубчастої рейки. Така відсутність взаємодії об'єктів у вигляді «делегованих» дій порушує логіку технологічного циклу утворення стібка при змінних технологічних параметрах - товщині матеріалу t та довжині стібка m . Це обмежує адаптивність механіко-технологічної системи до умов зшивання багатошарових текстильних матеріалів і знижує якість сформованого стібка. Для усунення зазначеного недоліку доцільно впровадити об'єктно-орієнтовану модель з узгодженим делегуванням функцій керування механізмами подачі нитки залежно від поточних значень t і m , що дозволить забезпечити стабільність і однорідність процесу формування стібка під час армування. Окрім цього запропонований підхід дозволяє масштабувати та автоматизувати процес утворення стібка в середовищах CAD/CAE/CAM для швейного виробництва, що є важливим кроком до створення інтелектуальних систем для виготовлення текстильних 3D армуючих структур.

Таким чином виконаний опис і аналіз на основі об'єктно-орієнтованого підходу розкриває потенціал подальших досліджень, зокрема у напрямку розроблення адаптивної системи керування процесом зшивання - автоматизованих механізмів подачі нитки.

2.4 Аналіз механічних характеристик 3D текстильних структур каркасного типу з використанням об'єктно-орієнтованих моделей

У цьому підрозділі розроблено підходи для аналізу та моделювання фізико-механічних властивостей армуючих 3D текстильних структур на основі об'єктно-орієнтованого підходу (ООП). Представлено математичні залежності, що описують динамічні характеристики текстильних преформ, а також узагальнено принцип успадкування властивостей на рівнях object=3D мікро-модель - object=2D міні-модель - object=3D макро-модель.

2.4.1 Аналіз ієрархії моделей текстильних структур

Для опису структури механіко-технологічних систем формування 3D армуючих елементів композитів використано ООП, який дозволяє відобразити ієрархію об'єктів, їх властивості та взаємозв'язки в межах глобального класу. Схема, що відображає принцип успадкування об'єктів для технології виготовлення 3D-тканин ткацьким методом, представлена на рис. 2.5. За аналогічною логікою побудовано схеми формування 3D трикотажного полотна у в'язальному виробництві (рис. 2.6), структури плетільного виробництва (рис. 2.7) та структури швейного виробництва (рис. 2.8). Такий підхід дозволяє системно аналізувати спільні та відмінні риси механізмів, процесів і структур у різних напрямках текстильного виробництва, що є основою для подальшого узагальнення та порівняльного аналізу.

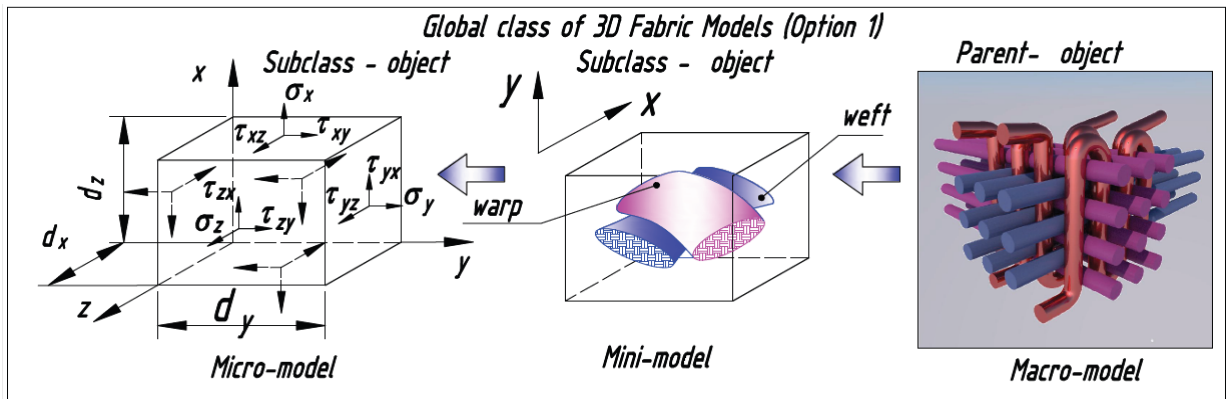


Рис. 2.5. Ієрархічна ООА-структура ткацької 3D текстильної моделі (ткацька технологія)

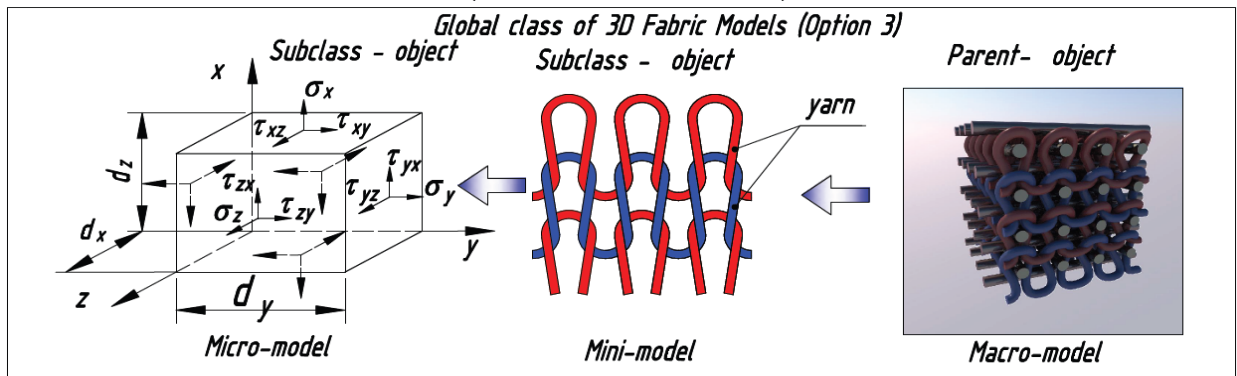


Рис. 2.6. Ієрархічна ООА-структура в'язальної 3D текстильної моделі (в'язальна технологія)

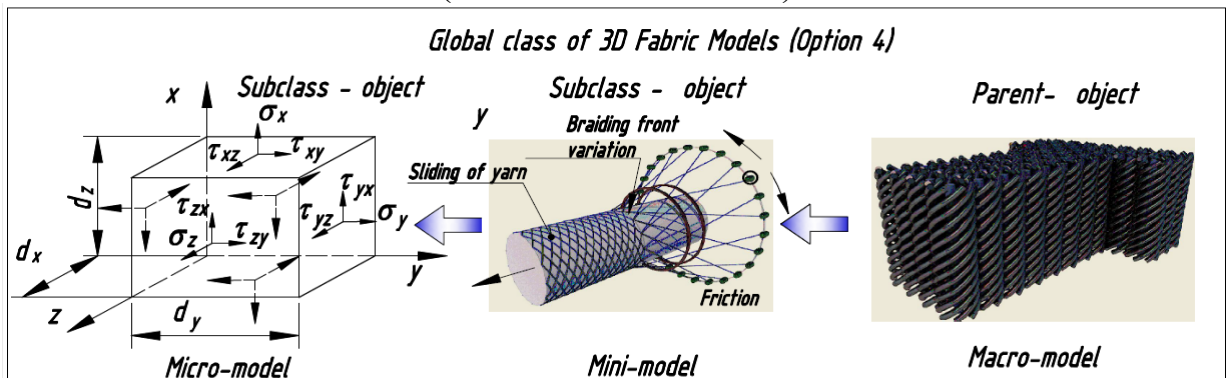


Рис. 2.7. Ієрархічна ООА-структура плетильної 3D текстильної моделі (плетильна технологія)

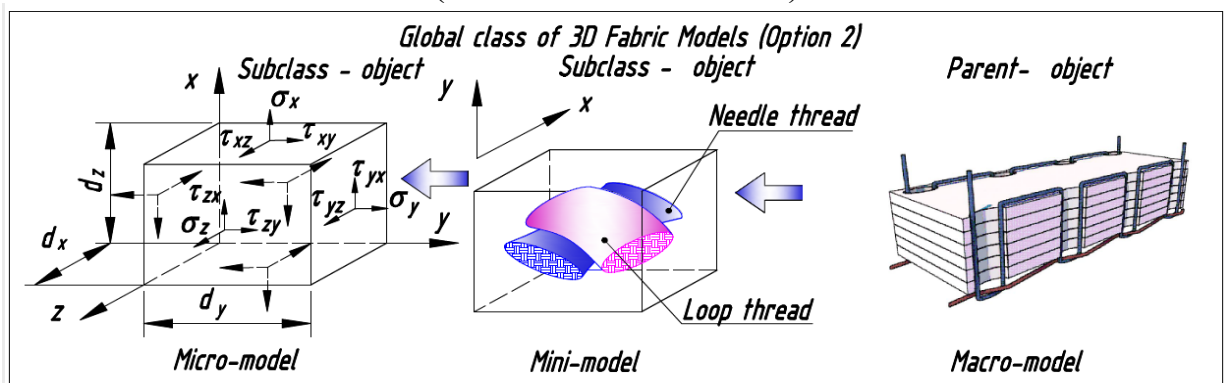


Рис. 2.8 Ієрархічна ООА-структура швейної 3D текстильної моделі (швейна технологія)

Усі запропоновані моделі, наведені на рис. 2.5-2.8, об'єднують наявність $\text{object} = 3D$ мікро-моделі відповідних об'єктів. Згідно з принципом поліморфізму об'єктно-орієнтованого аналізу (ООА), така мікро-модель має властивості споріднених об'єктів, тобто об'єктів із спільним об'єктом-батьком, до яких можуть застосовуватись різні методи аналізу, зокрема побудова матриць жорсткості [141].

2.4.2 Ієрархічне моделювання швейних 3D структур на основі ООП

Запропонована трирівнева ієрархія моделей каркасних 3D текстильних структур (рис. 2.9) сформована з урахуванням специфіки швейних технологій, зокрема особливостей утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101. На рисунку подано поетапний перехід від мікрорівня (напружено-деформований стан у волокнах) до мінірівня (структура стібка з ниток) і макрорівня (загальна зшита структура виробу). В основі моделі лежить об'єктно-орієнтований підхід, що дозволяє представити структуру армуючих елементів як систему взаємопов'язаних об'єктів трьох рівнів:

object = 3D мікро-модель (рис. 2.9, а) - описує локальні фізико-механічні властивості нитки (модуль пружності, щільність, натяг, жорсткість), а також напружено-деформований стан у зоні вигину й контакту з матеріалом, де виникають нормальні ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) та дотичні ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) напруження. На лівому фрагменті рисунка подано умовну схему цього стану, а фотофрагмент А-В ілюструє форму нитки в місці вигину при формуванні петлі - зоні локальної концентрації деформацій, яка критично впливає на стабільність стібка.

object = 2D міні-модель (рис. 2.9, б) - описує структуру одного стібка типу 101, сформованого між двома сусідніми проколами голки в процесі зшивання шарів текстильних матеріалів. Модель враховує товщину зшиваного матеріалу (m), довжину стібка (t), орієнтацію поверхонь матеріалу, а також просторове положення і напрям гілок петлі нитки в об'ємі шва. Такий підхід дозволяє моделювати взаємодію нитки з шарами матеріалу, оцінити глибину занурення,

розподіл натягу та геометричну стабільність петлі, що формує структурну одиницю з'єднання в армуючій 3D системі.

object = 3D макро-модель (рис. 2.9, в) - описує зшивання шарів текстильного матеріалу за допомогою строчки, що складається з послідовності стібків типу 101, або системи декількох паралельних рядів строчок, які формують об'ємну армуючу структуру. Модель враховує просторову конфігурацію шовних ліній, їхню щільність, орієнтацію та взаємодію з шарами основи. Така структура забезпечує необхідну жорсткість, міцність і стабільність з'єднання, виконуючи функцію локального або глобального армування в текстильно-композитних виробках.

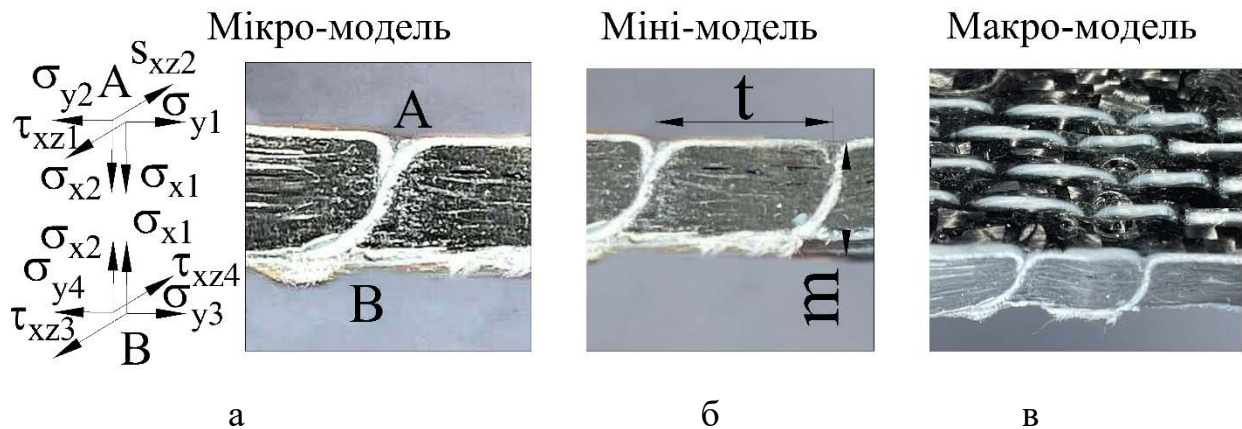


Рис. 2.9 Реалізація трирівневої ООА-моделі швейної 3D структури: а - мікро; б - міні; в - макрорівень стібка типу 101

Таким чином, запропонована трирівнева ієрархічна модель швейної 3D текстильної структури, сформована на основі принципів об'єктно-орієнтованого аналізу (ООА), забезпечує логічно узгоджене представлення локального (мікро-), елементного (міні-) та конструктивного (макро-) рівнів зшивання текстильних шарів стібком типу 101.

Відповідно до принципу успадкування, фізико-механічні властивості 3D мікро-моделі нитки делегуються 2D міні-моделі, яка описує міжпрокольную ділянку стібка з урахуванням товщини матеріалу та довжини стібка. У свою чергу, 3D макро-модель успадковує структурні характеристики стібка як базової

одиниці шовного з'єднання та інтерпретує їх у контексті формування просторової армуючої структури.

Усі моделі, подані на рис. 2.5-2.8, мають спільну базову 3D мікро-модель, яка, завдяки принципу поліморфізму, дозволяє застосовувати уніфіковані методи числового аналізу - зокрема, побудову матриць жорсткості [141] для розрахунку напружено-деформованого стану зшитих зон. При цьому, залежно від характеру задачі, мікромодель може розглядатися в осесиметричній або плоскопаралельній постановці, що спрощує обчислювальну модель без втрати точності.

2.4.3 Розрахунок фізико-механічних характеристик (мікрорівень)

Object = 3D мікро-модель у контексті напружено-деформованого стану ниток основи й утку 2D-тканини та 2D-трикотажу при об'єктно-орієнтованому аналізі розглядається як вісесиметрична або плоскопаралельна задача, у якій суттєве значення мають лише дві геометричні координати [79-81].

Мікро-моделі 3D-тканини і 3D трикотажних полотен це опис тривимірного напружено-деформованого стану мікро-об'єму матеріалу і потребує наступного математичного формулювання задачі статичної пружності (або напружено-деформованого стану), який можна представити у векторній формі, що включає три рівняння: рівняння руху і рівноваги, геометричне рівняння для тензору малих деформацій та фізичне рівняння у вигляді узагальненого закону Гука.

На засадах мікромеханіки для пружного анізотропного матеріалу узагальнений закон Гука є лінійним відношенням напруги до деформації, що визначається як:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}, \quad (2.1)$$

де $\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{23} \ \sigma_{31} \ \sigma_{12}\}^T$ - вектор компонент напружень;

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{23} \ \varepsilon_{31} \ \varepsilon_{12}\}^T$ - вектор компонент деформацій;

$[C]$ – матриця констант пружної жорсткості, у якої 21 незалежна константа з 36.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

Для компонент деформацій вираз (2.1) має наступний вигляд:

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\}, \quad (2.3)$$

де $[S]$ - обернена матриця до $[C]$ і визначається як:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

де S_{ij} - пружні податливості.

Для малих деформацій в декартовій координаті системи, деформації можна визначити як:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

де u_i ($i = 1, 2, 3$) - переміщення в напрямках трьох декартових координати;
 x_i ($i = 1, 2, 3$) - три координати в декартовій системі.

Для 3D мікро-моделі ортотропного матеріалу, в якому є три ортогональні симетричні площини, в якому існує лише дев'ять незалежних констант пружної жорсткості вираз (2.1) приймає вигляд (2.6):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

Так само є лише дев'ять незалежних констант еластичної податливості і матриця податливості (2.7) для 3D мікро-моделі композитний матеріал визначається:

$$[S] = [C]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

де $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{31}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ – інженерні константи.

Каркасні 3D текстильні структури стібка (рис. 2.9) задані, як object=2D міні-моделі це одношарові преформи для виготовлення деталей і виробів з композитних матеріалів. Фізико-механічні властивості каркасних 3D текстильних структур надають можливість прогнозувати їх подальшу поведінку у 3D композитних матеріалах армованих 3D текстильними структурами.

Для таких матеріалів динамічний модуль пружності E_d (МПа) визначається за методами [92]:

$$E_d = \frac{4\pi^2 \cdot m \cdot l}{s \cdot T_p^2}, \quad (2.8)$$

де m - маса державки та зразка з 2D-текстилю, кг;

l - робоча довжина проби, м;

S - площа поперечного перерізу зразка з 2D-текстилю, м^2 ;

T_P - значення періоду резонансних коливань, с.

Величина логарифмічного декременту затухання визначається за формулою:

$$\delta = \frac{\pi(T_1 - T_2) \cdot T_P}{T_1 \cdot T_2 \cdot \sqrt{N^2 - 1}} \quad (2.9)$$

де T_P - період резонансних коливань, с;

T_1 - період коливань при заданій амплітуді, нижчій резонансної, с;

T_2 - період коливань при заданій амплітуді, вищій за резонансну, с;

N - коефіцієнт збільшення збуджуючої сили.

На рис. 2.10 наведені типові діаграми в полярних координатах статичного E_s та динамічного E_d модуля пружності (відповідно, рис. 2.10, а і рис. 2.10, б) та типові діаграми логарифмічного декременту затухання δ (рис. 2.10, в) при навантаженнях під різними кутами до ниток основи 2D-зразків з текстилю різного рапорту і різного волокнистого складу.

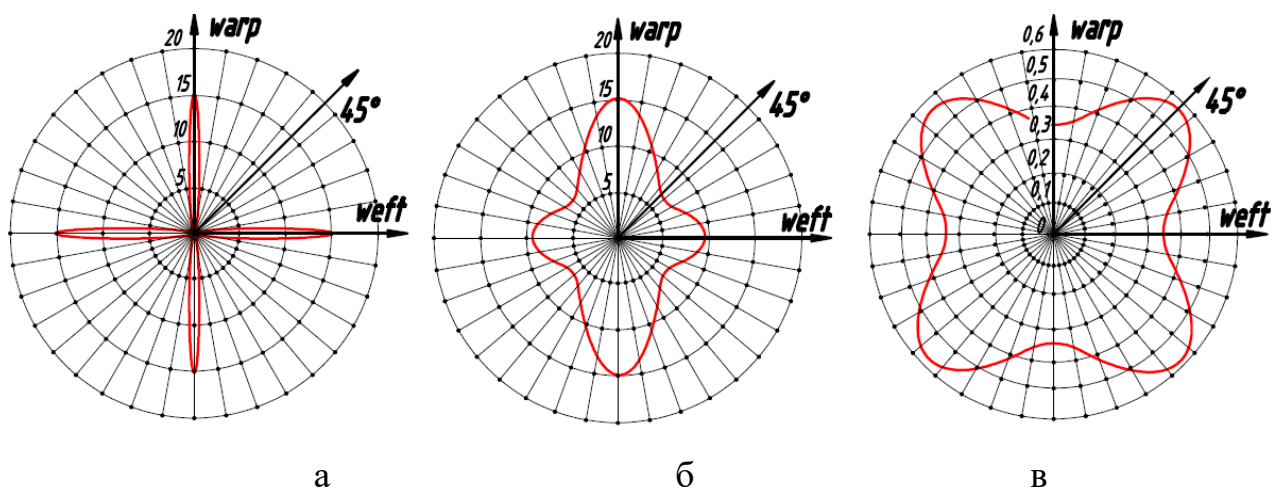


Рис. 2.10 Типові діаграми в полярних координатах в'язко-пружних характеристик тканини: а -статичний модуль пружності E_s ; б - динамічний модуль пружності E_d ; в -та логарифмічний декремент затухання δ [31]

З використанням виразів (2.7) і (2.8) при переході до аналізу від об'єкта object=2D міні-моделі до object=3D макро-моделі каркасних 3D текстильних структур отримуємо наступні вирази для динамічного модуля пружності E_d та логарифмічного декременту затухання δ для двох шарів (2.9) і (2.10) та для трьох шарів (2.11) і (2.12) текстильних матеріалів преформ композитів:

$$E_d^{II} = \left(\frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \right) \cdot k_{MT}; \quad (2.9)$$

$$\delta^{II} = \left(\frac{\delta_1 \cdot \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \right) \cdot k_{MT}, \quad (2.10)$$

$$E_d^{III} = [\prod_{i=1}^3 E_i \cdot \sum_{i=1}^3 (E_i \cdot E_{i+1} + E_i \cdot E_{i+2} + E_{i+1} \cdot E_{i+2})^{-1}] \cdot k_{MT}, \quad (2.11)$$

$$\delta^{III} = [\prod_{i=1}^3 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^3 (\delta_i \cdot \delta_{i+1} + \delta_i \cdot \delta_{i+2} + \delta_{i+1} \cdot \delta_{i+2})^{-1}] \cdot k_{MT}, \quad (2.12)$$

де k_{MT} - механіко-технологічний коефіцієнт каркасних 3D текстильних структур [141]: $k_{MT} = 0,9 \dots 1,0$ для каркасних текстильних 3D-структур в'язальних способів і плетельних способів виробництва; $k_{MT} = 1,0 \dots 1,1$ для текстильних 3D-структур швейного виробництва; $k_{MT} = 1,1 \dots 1,2$ для текстильних 3D-структур ткацького виробництва.

Для текстильних 3D-структур швейного виробництва механіко-технологічний коефіцієнт розраховується з урахування кута α нахилу ниток гілок стібка типу 101 (рис. 2.11), які скріплюють шари 3D текстильної структури.

$$\alpha = \arctg \frac{m}{t - \Delta} \quad (2.12)$$

де m - товщина 3D текстильної структури;

Δ - величина зміщення вершини петлі в площині, (визначається експериментально, або геометрично з фото);

t - довжина стібка.

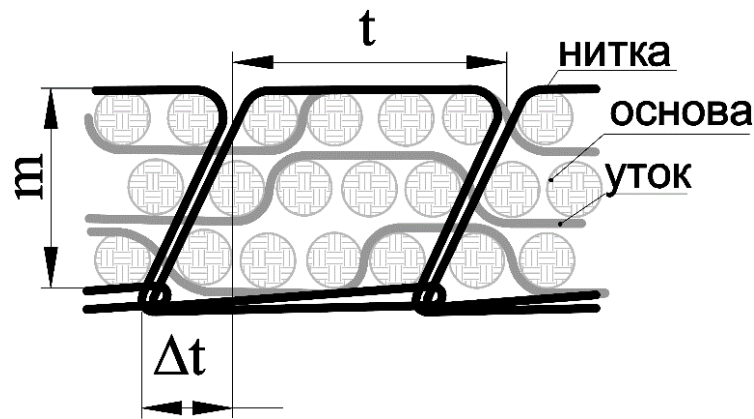


Рис. 2.11 Схема до розрахунку механіко-технологічного коефіцієнту каркасних 3D текстильних структур при армуванні стібком типу 101

Узагальнені причинно-спадкові зв'язки між object = 3D мікро-моделлю, object = 2D міні-моделлю та object = 3D макро-моделлю в термінах об'єктно-орієнтованого проєктування, що дозволяють відстежити передачу фізико-механічних характеристик від волокна до шва і виробу загалом.

Таким чином для стібка типу 101 модель забезпечує формалізоване представлення локальної геометрії петлі, її взаємодії з текстильним середовищем та впливу на загальні жорсткісні властивості структури.

Вирішені завдання кількісного оцінювання якості армування ланцюговим стібком типу 101 можливе:

- через розрахунок динамічного модуля пружності та декременту затухання на основі параметрів матеріалу і конструкції стібка;
- через побудову матриці жорсткості ортотропної структури, що включає вплив шовних з'єднань;
- через реалізацію умов силової рівноваги у вузлі утворення петлі, що дозволяє прогнозувати стабільність затягування нитки залежно від натягу, кута обгинання та опору матеріалу.

Запропоновані аналітичні моделі (рис. 2.10, рівняння 2.1-2.7) інтегруються в середовище CAD/FEM і забезпечують об'єктивне цифрове моделювання армуючих швів при автоматизованому проєктуванні каркасних 3D текстильних структур у композитах.

2.4.4 Аналіз силової рівноваги в стібку

З метою визначення зусилля затягування стібка типу 101 в процесі його формування необхідно враховувати умову рівноваги сил у ділянці формування вузлового переплетення. Такий підхід дозволяє проаналізувати якість армування матеріалу швейною строчкою та спрогнозувати необхідне зусилля затягування стібка залежно від параметрів матеріалу та технологічних параметрів стібка.

Основні чинники, що враховуються в моделі:

T_1 - сила натягу голкової нитки на вхідній ділянці;

T_2 - сила натягу петельної нитки після утворення петлі;

R - локальне зусилля опору матеріалу, що виникає у зоні проникнення нитки в текстильну структуру.

Воно залежить від типу тканини, щільності переплетення, товщини матеріалу та коефіцієнта тертя між ниткою і волокнами. Може описуватись функцією:

$$R=f(m, \rho, \mu, E), \quad (2.13)$$

де m - товщина матеріалу;

ρ - поверхнева щільність текстильних матеріалів;

μ_1 - коефіцієнт тертя нитки і матеріалу;

E - модуль пружності.

Умова рівноваги сил під час затягування петлі:

$$T_1=T_2 \cdot \cos(\alpha)+R \quad (2.14)$$

Ця залежність дозволяє:

- визначити оптимальне зусилля натягу нитки при різних товщинах матеріалу та довжинах стібка;
- запобігти розриву нитки або надмірному затягуванню петлі;
- підтримувати стабільну якість армування текстильної структури;

– спрогнозувати необхідне зусилля зтягування стібка типу 101 у залежності від технологічних параметрів стібка.

Отримана модель силової рівноваги стібка типу 101 дозволяє прогнозувати оптимальне зусилля зтягування нитки з урахуванням її геометрії, натягу та опору текстильного матеріалу. Це дає змогу забезпечити стабільну якість армування, уникнути надмірного деформування і забезпечити надійність шва в конструкції композитного виробу.

2.5 Уточнений опис процесу утворення стібка типу

Огляд відкритих джерел засвідчив відсутність систематизованого опису процесу утворення однопіткового ланцюгового стібка типу 101. Основна увага в наявних матеріалах приділяється параметрам налаштування швейних машин - довжині стібка, зусиллю натягу нитки, взаємодії розширювача та голки, положенню зубчастої рейки тощо. Водночас, інформація щодо послідовності операцій у межах одного циклу утворення стібка практично відсутня. Це ускладнює створення достовірної моделі для аналізу й проєктування механізмів подачі нитки, особливо в умовах змінних технологічних параметрів.

Процес утворення стібка типу 101 розподіляється на такі послідовні періоди, які визначаються характерними моментами (ϕ_0 - ϕ_8) (рис. 2.4, б-и):

Період ϕ_0 - ϕ_1 (рис. 2.4, б, в). Голка 1 починає рух з крайнього верхнього положення (КВП) до моменту входження вістря в матеріал (М), розширювач 2 виконує вистій у крайньому правому положенні (КПП). У цей час матеріал (М) переміщується на задану довжину стібка t , а ниткоподавач 3 (рис. 2.4, а) подає необхідну довжину нитки голці 1 та для розширення попередньої петлі внаслідок переміщення матеріалу (М).

Період ϕ_1 - ϕ_2 (рис. 2.4, в, г). Голка 1 починає прокол матеріалу і вводить своє вушко в матеріал (М). Розширювач 2 виконує рух у напрямку до вісі голки 1, розширює попередню петлю нитки та орієнтує її під вістря голки 1. Матеріал (М) не переміщується, зубчата рейка 4 (рис. 2.4, а) виконує холостий хід,

ниткоподавач 3 подає нитку, необхідну на переміщення голки 1 та розширення петлі розширювачем 2.

Період φ_2 - φ_3 (рис. 2.4, г, д). Голка 1 заходить у площину попередньої петлі, утвореної розширювачем 2 (виконується «закол»). Розширювач 2 виконує рух від вісі голки 1 і починає рух у напрямку крайнього лівого положення (КЛП). Матеріал (М) не переміщується, зубчаста рейка 4 виконує холостий хід. Ниткоподавач 3 (рис. 2.4, а) подає нитку в кількості, достатній для подвоєного ходу голки 1 в матеріалі, а також виконує скорочення попередньої петлі нитки, спрямовуючи її гілки до стержня голки 1.

Період φ_3 - φ_4 (рис. 2.4, д, е). Розширювач 2 звільняє попередню петлю та продовжує рух до крайнього лівого положення (КЛП). Теоретично в цей період має відбуватися миттєве скорочення скинутої петлі ниткоподавачем 3 (рис. 2.4, а). Однак це скорочення відбувається при подальшому переміщенні голкою 1 нової петлі нитки. Цей процес супроводжується з роботою ниткоподавача 4. Матеріал (М) не переміщується, зубчаста рейка 4 виконує холостий хід. Оскільки інші робочі органи на це не впливають. Цей період важливий при визначенні необхідної функції подачі нитки [162].

Період φ_4 - φ_5 (рис. 2.4, е, є). Розширювач 2 звільняє попередню петлю та продовжує рух до крайнього лівого положення (КЛП). Теоретично в цей період має відбуватися миттєве скорочення скинутої петлі ниткоподавачем 3 (рис. 2.4, а). Однак це скорочення відбувається при подальшому переміщенні голкою 1 нової петлі нитки. Цей процес супроводжується роботою ниткоподавача 3, оскільки інші робочі органи не впливають на нього. Цей період важливий при визначенні необхідної функції подачі нитки [162].

Період φ_5 - φ_6 (рис. 2.4, є, ж). Голка починає підйом з КНП і формує «петлю-напуск». Розширювач 2 переміщується з КЛП в напрямку до вісі голки 1, захоплює цю петлю шляхом веденням свого носика. Ниткоподавач 3 (рис. 2.4, а) у цей період забезпечує стабілізацію процесу утворення «петлі-напуску», в цей період нитка не подається, що сприяє стабільному її формуванню.

Період ϕ_7 - ϕ_8 (рис. 2.4, ж, з). Цей період носить суто теоричний характер і потрібний для визначення необхідної функції подачі нитки. Характеризується миттєвим скороченням петлі нитки, до розмірів які обмежені геометрією голки 1 та носиком розширювача 2. Ниткоподавач 3 скорочує контур нитки, що призводить до скорочення петлі нитки. Розширювач 2 продовжує рух в напрямку до КПП і розширює петлю нитки. Матеріал (М) не переміщується, зубчаста рейка 4 (рис. 2.4, а) виконує холостий хід

Період ϕ_8 - ϕ_9 (рис. 2.4, з, и). Голка 1 продовжує свій рух за напрямком до КВП, до моменту виходу вістря з матеріалу. Розширювач 2 продовжує розширення петлі нитки і переміщується в КПП, де виконує там вистій. Ниткоподавач 3 (рис. 2.4, а) подає нитку в кількості, достатній для розширення петлі розширювачем та переміщення голки в матеріалі.

Період ϕ_8 - ϕ_0 (рис. 2.4, и, б). Голка 1 продовжує свій рух за напрямком до КВП, матеріал (М) починає переміщуватись зубчастою рейкою 4 (рис. 2.4, а). Розширювач 2 виконує вистій. Ниткоподавач 3 скорочує довжину контуру нитки для остаточного формування попереднього стібка, цей процес супроводжується сумісною дією розширювача 2, зубчастої рейки 4 та ниткоподавача 3. Ниткоподавач 3 при в при КВП змотує з бобіни нитку на наступний стібок. Надалі процес повторюється.

Таке структурування процесу утворення стібка типу 101 дозволяє побудувати функціональну синхрограму, яка відображає координовану роботу робочих органів швейної машини та дає змогу виявити кількісні залежності між положенням органів, довжиною стібка, товщиною матеріалу та необхідною подачею нитки.

Структурований опис процесу утворення стібка типу 101 дає змогу побудувати синхрограму, яка відображає координацію механізмів і встановлює зв'язки між параметрами шиття та подачею нитки.

2.6 Розроблення проєктної синхрограми швейної машини ланцюгового стібка з урахуванням варіативних технологічних параметрів стібка

З метою виявлення закономірностей формування стібка типу 101 при зміні довжини стібка та товщини зшиваного матеріалу, а також для аналізу функції подачі нитки та перевірки коректності взаємодії робочих органів, розроблено проєктну синхрограму швейної машини (рис. 2.12). Вона побудована за класичною схемою [139], яка враховує фазову взаємодію робочих органів швейної машини в процесі утворення стібка.

Згідно з [139] мінімально-необхідний хід голок при утворенні ланцюгових стібків визначається з умови (рис. 2.13):

$$S_x = \frac{S_m}{f_1(\varphi_m)}, \quad (2.15)$$

де S_m - величина переміщення в матеріалі голки.

Ця величина залежить від технологічного параметра - товщини матеріалу m , а також конструктивних параметрів машини

Розрахунок цієї величини виконується згідно з методикою [15].

$$S_m = m + S_A + a + e + \delta_1 + c + h, \quad (2.16)$$

φ_m - кут повороту головного валу, який відраховується від моменту крайнього виходу голки з матеріалу;

$f_1(\varphi)$ - одинична функція положення голководи;

S_A - необхідна величина переміщення голки для утворення «петлі-напуску» ($S_A \approx 3 \text{ мм}$);

$$f_1(\varphi) = S(\varphi) / S_x,$$

$S(\varphi)$ - положення голководи в момент φ .

Збільшення значень технологічних параметрів m і t може призвести до того, що голка перебуватиме в матеріалі під час його переміщення.

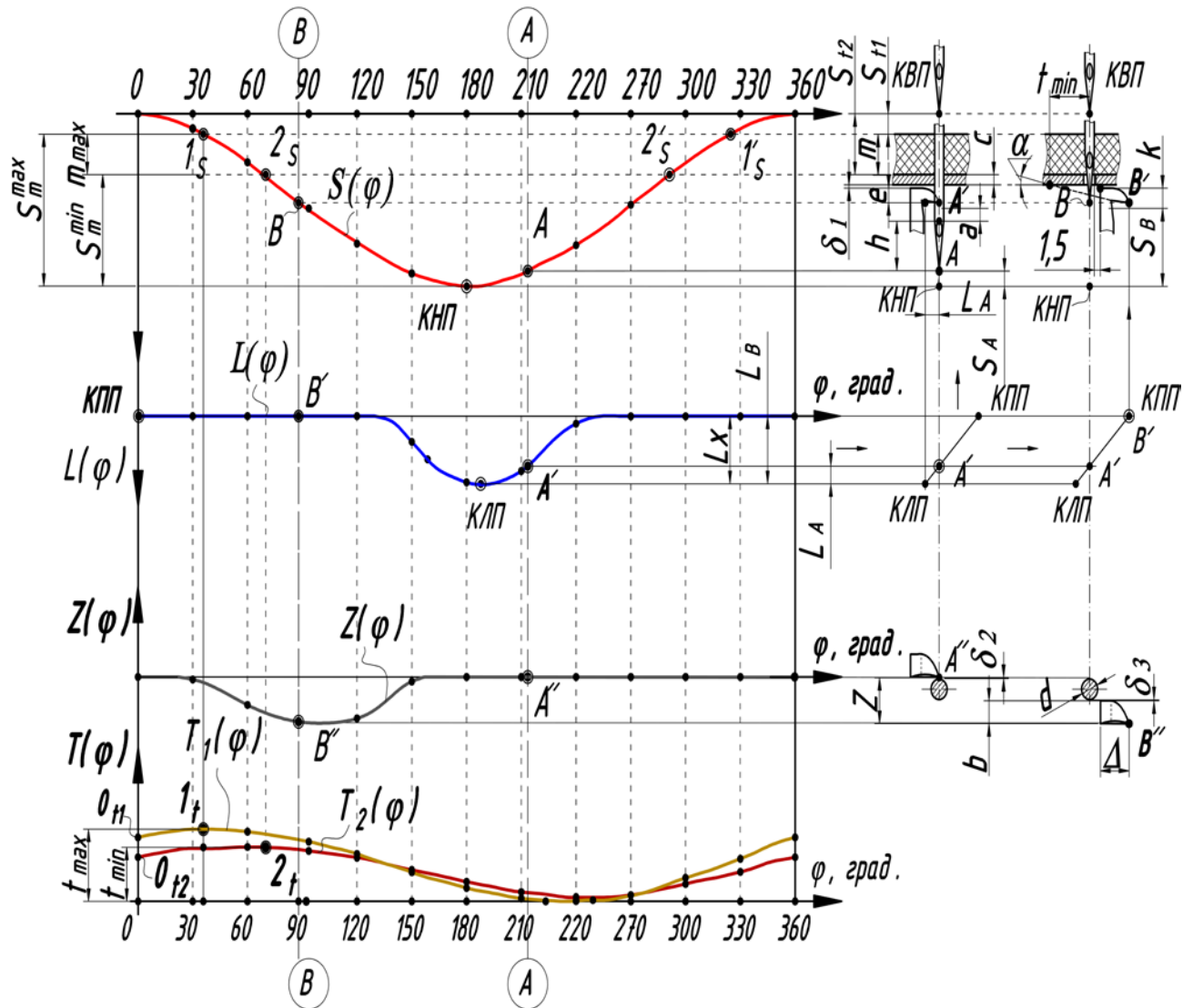


Рис. 2.12 Типова синхрограма робочих органів швейної машини ланцюгового стібка типу 101 з коливним розширювачем

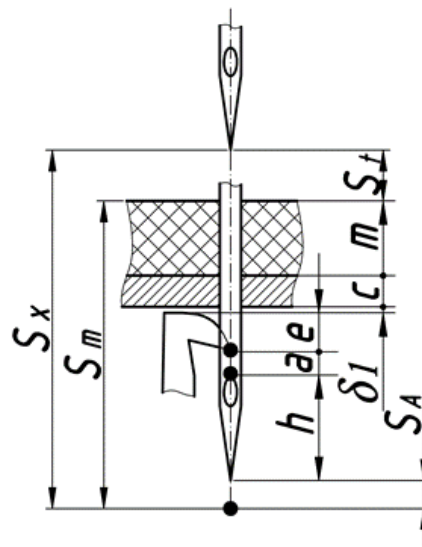


Рис. 2.13 Розрахункова схема необхідного ходу голки

Це порушує синхронізацію роботи механізмів і може спричинити поломку голки. Допустимі значення параметрів m і t повинні забезпечувати нормальну роботу транспортуючого органа та узгоджуватись із законом руху голководу [139].

$$S(\varphi) = S(\varphi_m + \varphi_t) \geq S_m, \quad (2.17)$$

де S_m - величина переміщення голки в матеріалі голки.

φ_t - заданий кут повороту головного вала, що характеризує період руху голки над матеріалом (час транспортування матеріалу);

Умова (2.17) визначає гранично допустимі значення технологічних параметрів m і t , за яких забезпечується узгоджена робота механізмів під час утворення стібка. Її невиконання свідчить про те, що ці параметри перевищують допустимі межі для стабільної роботи машини.

Параметр, що визначає положення голки S_B момент «заколу» визначається з умови розташування вістря в площині попередньої петлі нитки (рис. 2.12), яка знаходиться під кутом α , яка залежить від параметра t та положення розширювача. Однак, гарантований «закол» голкою попередньої петлі буде в момент положення її вістря на рівні носика розширювача, і визначається виразом:

$$S_B = S_A + a + e + h, \quad (2.18)$$

В настановах з експлуатації швейних машин «закол» гарантується першим положенням розширювача L_B відносно осі голки, при його крайньому положенні (рис. 2.12) таким чином щоб відстань від його задньої частини до вісі голки складала 1,5 мм.

Окрім цього параметри взаємодії розширювача повинні забезпечувати надійне захоплення «петлі-напуску» та «закол» голкою попередньої петлі

голкової нитки у характерних точках А та В. Таким чином, величина необхідного ходу розширювача вздовж строчки має відповідати умові:

$$L_x \geq \frac{\Delta L}{f_2(\varphi_A) - f_2(\varphi_B)}, \quad (2.19)$$

де: L_x - необхідний хід розширювача вздовж строчки;

$f_2(\varphi)$ - одинична функція положення розширювача

$$f_2(\varphi) = 2L(\varphi) / L_x,$$

$\varphi_{A,B}$ - кути повороту головного вала, що характеризують моменти взаємодії А та В.

$$\Delta L = L(\varphi_B) - L(\varphi_A) + 1,5 \text{ мм} = \Delta + 1,5 \text{ мм}, \quad (2.20)$$

де: $L(\varphi_B), L(\varphi_A)$ - величина переміщення розширювача відповідно в моменти взаємодії А та В.

Δ - довжина носика розширювача ($\Delta = 7 \text{ мм}$).

В свою чергу хід розширювача поперек Z_x строчки залежить тільки від конструктивних параметрів голки та розширювача і повинен забезпечувати умову:

$$Z_x \geq \frac{Z}{f_3(\varphi_A) - f_3(\varphi_B)}, \quad (2.21)$$

де $f_3(\varphi)$ - одинична функція положення розширювача поперек строчки:

$$f_3(\phi) = 2Z(\phi) / Z_x, \quad (2.22)$$

Z_{AB} - положення розширювача вздовж строчки, в між моментами взаємодії А та В:

$$Z_{AB} = d + b + \delta_2 + \delta_3, \quad (2.23)$$

де d - діаметр голки;

b - товщина розширювача;

$\delta_{2,3}$ - зазор між розширювачем голкою, відповідно моменти взаємодії В та А.

Аналіз моментів взаємодії у точках А і В та переміщення голки в матеріалі $S_{m1,2}$ при утворенні стібка типу 101 за різних параметрів m і t дозволяє оцінити функціональні характеристики швейної машини для виконання ланцюгового стібка.

Отримані параметри є вихідними для визначення необхідних кінематичних характеристик механізмів, а також визначення їх функціональності за умов зміни технологічних параметрів m та t .

2.7 Аналітичне визначення функцій необхідної та дійсної подачі ідеальної нитки відповідно до характерних періодів процесу утворення стібка

2.7.1 Метод розрахунку, прийняті допущення та вихідні дані

У розрахунках нитка приймається як ідеалізований гнучкий елемент, що не піддається розтягуванню та зминанню. При цьому взаємодія з конструктивними елементами швейної машини описується силами тертя, які відповідають закону Амонтона, без урахування кулонівських сил [152]. Геометричні характеристики нитки, зокрема її товщина, не розглядаються [162].

2.7.2 Аналітичне визначення функції дійсної та необхідної подачі нитки

Функції дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки визначаються як зміни довжини окремих ділянок загального ниткового контуру G_0 -А (рис. 2.14) відносно їх початкового розміру. З цією метою нитковий контур, що починається від регулятора натягу нитки (точка G_0) і закінчується у зоні попереднього стібка

(точка A), умовно поділяється в точці N (відповідає положенню верхньої кромки вушка голки при її крайньому верхньому положенні) на «контур подачі» (G_0-N), який відповідає за роботу механізму подачі нитки, та «контур витрат» ($N-A$), що характеризує зміну контуру, який утворюється в результаті формування стібка типу 101.

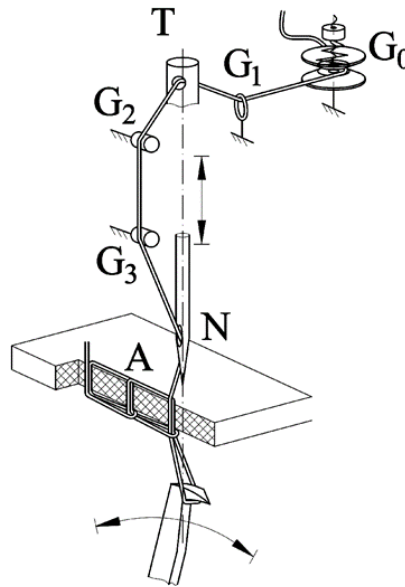


Рис. 2.14 Типова схема контуру подачі швейних машин ланцюгового стібка для виконання стібків типу 101: G_0-A - загальний контур нитки, G_0-N - «контуру подачі нитки», $N-A$ - «контур витрат»

При цьому точка N відносно двох контурів нерухома, тому контури незалежні один від одного, що дозволяє отримати аналітичні залежності функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної подачі $P'(\varphi)$ ідеальної нитки без впливу однієї на іншу. Функцію дійсної $P(\varphi)$ та необхідної подачі $P'(\varphi)$ ідеальної нитки в загальному вигляді можна представити, як зміну довжини відповідного контуру («контуру подачі» та «контуру витрат»). Таким чином функція дійсної подачі голкової нитки $P(\varphi)$ буде кусковою безпервною і визначена за методикою [161, 162]:

$$P(\varphi) = \xi_0 - \xi(\varphi), \quad (2.24)$$

$$P'(\varphi) = \zeta_0 - \zeta(\varphi), \quad (2.25)$$

де:

$$\xi(\varphi) = \zeta(\varphi) = \sum_{i=1}^{i=n,m} p_{i-i+1}(\varphi), \quad \xi_0 = \zeta_0 = \sum_{i=1}^{i=n,m} p_{i-i+1}, \quad (2.26)$$

ξ_0, ζ_0 - відповідно довжина «контуру подачі» та «контуру витрат» в початковий відлік часу ($\varphi=0$);

$\xi(\varphi), \zeta(\varphi)$ - відповідно довжина «контуру подачі» та «контуру витрат» при деякому поточному значенні φ в інтервалі процесу утворення $i-i+1$.

$p_{i-i+1}, p_{i-i+1}(\varphi)$ - довжина i -ї ділянки «контуру подачі», або «контуру витрат» відповідно при значенні аргументу $\varphi=0^\circ$ та поточному значенні повороту головного валу машини φ ;

n - число елементарних ділянок «контуру подачі»;

m - число елементарних ділянок «контуру витрат».

Функція дійсної подачі ідеальної нитки $P(\varphi)$ визначається кількістю нитконапрямників і ниткоподавачів, їхнім геометричним розташуванням та законами руху ниткоподавачів [162]. За умови сталої кількості елементарних ділянок «контуру подачі» вздовж усього циклу формування стібка, функція $P(\varphi)$ є безперервною. У випадках, коли в окремих періодах процесу змінюється кількість елементів, що взаємодіють з ниткою, функція набуває кусково-безперервного характеру. Нитка при цьому вважається такою, що переміщується разом з ниткоподавачами, а координати точок контакту з нитконапрямниками приймаються як фіксовані у просторі [162, 161].

Функція необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$ має кусково-безперервний характер і змінюється відповідно до геометрії та кількості ділянок «контуру витрат» у різні періоди утворення стібка [162]:

$$\zeta(\varphi) = F(f_1(\varphi), \dots, f_n(\varphi), a_1, \dots, a_n), \quad (2.27)$$

де $f_{1..n}(\varphi)$ - змінні параметри;

$a_{1..n}$ - постійні параметри.

До змінних параметрів належать функції положення робочих органів (рис. 2.4): голки $S(\varphi)$, розширювача - вздовж $Z(\varphi)$ і поперек $L(\varphi)$ строчки, зубчастої рейки $T(\varphi)$, а також проекція кута нахилу петлі верхньої нитки $\gamma(\varphi)$ на площину

розширювача. Вплив кожного з цих параметрів на функцію необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$ змінюється на різних етапах процесу утворення стібка.

Враховуючи просту форму розширювача та те що положення петлі нитки залишається на його борідці [164], та відносно великий радіус його траєкторії поперек строчки, приймаємо нижня поверхня розштрювача має форму паралепіпіда, бокові його сторони прямолінійні, а сам розширювач виконує рух до горизонтальної прямої. Поперечне ковзання нитки відносно його поверхні відсутнє, це цілком відповідає реальним умовам процесу утворення стібка.

Оскільки довжина ділянки петлі, що охоплює борідку, у десятки разів менша за загальну довжину «контуру витрат», прийняті припущення забезпечують відносну похибку не вище порядку 10^{-4} [162].

До постійних (фіксованих) параметрів належать: товщина матеріалу - m , розміри петельника (b) та e , довжина стібка - t , взаємне розташування голки та матеріалу - S_t . Параметр S_t (рис. 2.12) (взаємне розташування голки та матеріалу при КВП голки) залежить від товщини матеріалу m , і вплив цього параметру є ключовим в нашому дослідженні, в той же час як довжина стібка встановлюється при регулюванні. Згідно [161, 162] матеріал розглядається, як тверде тіло. Відстань від верхньої поверхні петельника до голкової пластини - (k) (рис. 2.12), враховуючи раніше прийняті допущення вважаємо постійним параметром.

Для визначення довжини відрізків p_{i-i+1} в початковий момент відліку ($\varphi=0^\circ$) застосовані ті ж залежності, що й при визначенні відрізків $p_{i-i+1}(\varphi)$ при $\varphi=0^\circ$, в загальному вигляді довжини цих лінійних ділянок визначаються за відомими формулами аналітичної геометрії:

$$p_{i-i+1} = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2}, \quad (2.28)$$

де x_i , y_i та z_i - відповідні координати нитконапрямників G_i , ниткоподавача $T_{ui}(\varphi)$ та точки - N .

Наведені загальні залежності довжин елементарних ділянок p_{i-i+1} «контуру подачі», або «контуру витрат» в подальшому будуть використані для отримання

аналітичних функцій дійсної та необхідної подачі ідеальної нитки $P(\varphi)$ та $P'(\varphi)$ конкретних машин з урахуванням їх структури та геометричних характеристик.

2.7.3 Оцінка відповідності функцій дійсної та необхідної подачі нитки

Отримані значення функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки використовуються для аналізу узгодженості роботи механізмів подачі. З метою оцінки відповідності дійсної функції $P(\varphi)$ до необхідної $P'(\varphi)$, введено функцію збіжності $C_i(\varphi)$, яка визначається як різниця між значеннями цих функцій для відповідного значення аргументу φ за i -тих комбінацій значень технологічних параметрів (t та m):

$$C_i(\varphi) = P'_i(\varphi) - P(\varphi). \quad (2.29)$$

З метою оцінки впливу технологічних параметрів на необхідну подачу нитки, вплив зміни товщини матеріалу та довжини стібка визначається як різниця між значеннями функцій $P'(\varphi)$ при мінімальних та максимальних значеннях цих параметрів. Різниця між значеннями функцій $P'(\varphi)_{\min}$ та $P'(\varphi)_{\max}$ відображає сумарний приріст необхідної подачі нитки $\Delta(\varphi)$, що виникає внаслідок переходу від мінімальних параметрів ($m_{\min}$, $t_{\min}$) до максимальних ($m_{\max}$, $t_{\max}$):

$$\Delta(\varphi) = P'(\varphi)_{\max} - P'(\varphi)_{\min}, \quad (2.30)$$

$$\text{або} \quad \Delta(\varphi) = C_1(\varphi)_{\max} - C_2(\varphi)_{\min}, \quad (2.31)$$

Оцінка функції збіжності $C_i(\varphi)$ дає змогу перевірити відповідність дійсної подачі нитки фактичним умовам зшивання порівняно з необхідною подачею, визначеною для заданих параметрів товщини матеріалу та довжини стібка. Значення функції $C_i(\varphi)$ характеризує ступінь відхилення подачі нитки, що

впливає на стабільність процесу формування стібка та якість з'єднання армованих текстильних матеріалів.

Такий підхід дозволяє оцінити надмірну або недостатню подачу нитки при граничних та проміжних значеннях технологічних параметрів стібка в умовах змінної товщини матеріалів і використовується для аналізу ефективності роботи механізмів подачі нитки.

2.8 Визначення функцій положення робочих органів швейних машин

З метою розроблення синхрограм, а також подальшого аналізу та синтезу механізмів подачі нитки, у цьому розділі визначаються функції положення основних робочих органів швейної машини.

Розгляд таких функцій дозволяє встановити характер переміщення виконавчих ланок у межах одного циклу формування стібка, що є необхідною передумовою для побудови узагальнених синхрограм та подальшого структурного і параметричного синтезу систем подачі нитки.

2.8.1 Визначення функцій положення голки $S(\varphi)$

Як показав аналіз механізмів голки швейних машин найбільш поширеним шестиланоквий механізм голки (рис. 2.15), який застосований в базових машинах конструктивного ряду GK-9 (GK9-2, Gk9-10, GK9-18A, GK9-202, GK 9-500, GK9-801, Gk9-886, GK9-890C, GK-9000A), Gk26-1A, GK 35 (GK 35-8), GK-3700, KP3000, RG-900D (RZ-668, RG-555).

У зазначених типах машин використовується механізм подачі нитки повзунного типу [179], що включає один ниткоподавач Tu і систему нитконапрямників G_i (рис. 2.15). Враховуючи конструктивну схему, де ниткоподавач закріплений на голководі, функція положення ниткоподавача $Tu(\varphi)$ збігається з функцією переміщення голки $S(\varphi)$, що дозволяє

використовувати їх як еквівалентні при побудові відповідних синхрограм та побудови функцій подачі нитки.

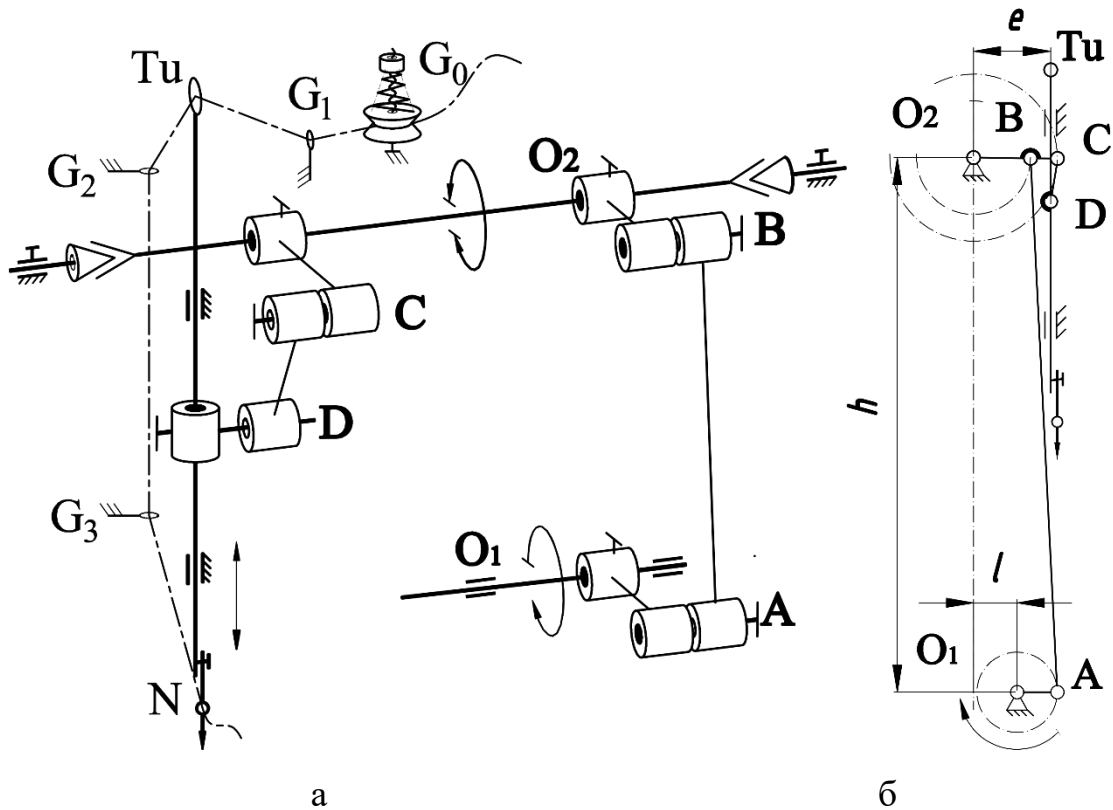


Рис. 2.15 Кінематичні схеми механізму голки машин GK-9-2: а - в ізометричній проєкції, б - розрахункова декартовій системі координат

Механізм голки швейних машин базового ряду GK-9-2 є шестиланковим кривошипно-повзунним механізмом, структура якого показана на рис. 2.15, а.

Функцію положення ниткоподавача $S(\varphi) = Tu(\varphi)$ визначимо з [162, 175]:

$$S(\varphi) = n \cos \alpha - m \sin(\psi - \beta), \quad (2.32)$$

$$\sin \psi = \frac{-A_1 A_2 + A_1 \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - A_3^2}}{A_1^2 + A_2^2}, \quad \text{де} \quad (2.33)$$

$$A_1 = 2ac \cos \varphi', \quad A_2 = 2c(a \sin \varphi' - d), \quad A_3 = b^2 - a^2 - c^2 - d^2 + 2ad \sin \varphi',$$

$$\varphi' = \varphi + \gamma, \quad \gamma = \arctan g \frac{l_1}{h}, \quad \alpha = \arcsin \frac{m \cos(\psi - \beta) - e}{n}, \quad O_1 O_2 = d = \sqrt{h^2 + l^2}$$

$\beta = 0^\circ$ - кут між коромислами $O_2 B$ та $O_2 C$

Аналогічні залежності наведені методом векторного розрахунку (Додаток А1) в середовищі Mathcad [181].

Отримані функції положення голки $S(\varphi)$ та ниткоподавача $Tu_1(\varphi)$ дозволяють змодельовати функцію дійсної подачі нитки та аналітичного розрахунку необхідних переміщень розширювача та необхідної подачі нитки.

2.8.2 Визначення функцій положення зубчастої рейки

Механізм переміщення зубастої рейки в швейних машинах є комбінованим кінематичним ланцюгом. Але, враховуючи значну довжину шатуна рейки та відносно малий хід рейки над голковою пластиною, з достатньою для практики точністю можна вважати закон руху рейки гармонійним [139], тобто:

$$T(\varphi) = 0.5T'(\sin \varphi), \quad (2.34)$$

З урахуванням початкового положення транспортування необхідно врахувати початковий кут транспортування $\varphi_{n.mp}$.

Тоді величина ходу рейки горизонтального переміщення згідно [162]:

$$T(\varphi) = 0.5T'(\sin \varphi - \sin \varphi_{n.mp}), \quad (2.35)$$

$$\text{де} \quad T' = t_{\max} / \sin 0.5\varphi_{mp}, \quad (2.36)$$

$\varphi_{n.mp}$ - початок транспортування матеріалу, град;

$t_{\max}$ - максимальна довжина стібка, мм.

Необхідно відмітити для визначення функцій необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$ необхідно враховувати, що після переміщення матеріалу на довжину стібка значення функції $T(\varphi) = t = \text{const}$ [162].

Поліноміальна модель кускової функції n -го степеню [182, 183]:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (2.37)$$

де y - апроксимоване значення кускової безперервної функції закону подачі нитки,

x - незалежна змінна (аналог кута повороту головного валу).

Коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ знаходились шляхом мінімізації суми квадратів відхилень між експериментальними значеннями y_i і обчислюються значенням полінома [182, 183]:

$$S = \sum_{i=1}^m \left(y_i - (a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \dots + a_1 x_i + a_0) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2.38)$$

Частинні похідні S за кожним коефіцієнтом a_k прирівняні до нуля, що має систему рівнянь:

$$\sum_{i=1}^m x_i^k y_i = \sum_{i=1}^m x_i^k (a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \dots + a_1 x_i + a_0), \quad (2.39)$$

Коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ визначились із системи рівнянь [182, 183]:

$$\begin{bmatrix} m & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \sum x_i^{n+2} & \dots & \sum x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^n y_i \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Коефіцієнт детермінації R^2 за виразом [182, 183]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(y_i - \bar{y})^2}. \quad (2.41)$$

Враховуючи результати досліджень [161, 162], встановлено, що функції подачі нитки мають кускову структуру та складаються з ділянок, які наближено описуються лінійними або криволінійними залежностями n -го порядку. Для забезпечення високої точності моделювання таких залежностей доцільно застосовувати поліноміальні апроксимації відповідного порядку [183], з урахуванням геометричних особливостей кожної окремої ділянки. Запропонований підхід ефективно описує кускові функції, що змінюються залежно від періоду формування стібка.

Апроксимаційні моделі, побудовані на основі експериментальних даних, дозволяють отримати аналітичні вирази функцій дійсної подачі нитки та необхідної подачі. Ці функції можуть бути використані для побудови регресійних залежностей, аналізу впливу технологічних параметрів на процес утворення стібка типу 101, а також для проектування й оптимізації адаптивних механізмів подачі нитки.

2.9 Висновки до розділу 2

У розділі виконано всебічний теоретичний аналіз текстильних армуючих структур і засобів їх формування із залученням сучасних технологій та об'єктно-орієнтованих моделей. Основні результати можна узагальнити наступним чином:

1. Запропоновано класифікацію текстильних армуючих преформ, яка враховує тип волокна, структурну розмірність, технологію виготовлення та орієнтацію волокон. Це дозволяє систематизувати конструкції армуючих елементів для різних типів композитних матеріалів.

2. Сформовано об'єктно-орієнтовану модель механіко-технологічної системи формування 3D текстильних структур, що об'єднує основні класи

об'єктів - сировина, інструмент, механізм і мехатроніка. Запропонована модель забезпечує основу для автоматизованого проєктування і керування технологічними процесами.

3. Проведено комплексний аналіз процесу утворення стібка типу 101, визначено функції положення виконавчих механізмів та встановлено характер їх взаємодії. На основі цього створено типову синхрограму з урахуванням змін товщини матеріалу та довжини стібка, що дозволяє узгодити роботу механізмів у процесі зшивання.

4. Розроблено трирівневу модель швейної 3D структури та математичну модель силової рівноваги в стібку, які охоплюють мікро-, міні- та макрорівні шовного з'єднання. Це дало змогу проаналізувати вплив натягу нитки, опору матеріалу та геометричних параметрів на якість армування.

5. Визначено функції дійсної та необхідної подачі нитки, побудовано функцію збіжності та оцінено вплив технологічних параметрів (товщини матеріалу та довжини стібка) на стабільність процесу формування шва.

6. Розроблено типову синхрограму роботи швейної машини, яка враховує фазову взаємодію робочих органів при змінних технологічних параметрах стібка. Визначено функції положення виконавчих органів (голки, рейки, розширювача), що є основою для синтезу механізмів подачі нитки.

7. Отримані результати створюють наукову й методичну базу для розробки адаптивних механізмів подачі нитки та автоматизованого проєктування швейних машин, призначених для виготовлення текстильних армуючих структур у виробках з композитних матеріалів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ШВЕЙНИХ МАШИН ЗА ЗМІННИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІБКА

3.1 Експериментальне дослідження механізмів подачі нитки

3.1.1 Опис експериментальної установки

Для вимірювання «контуру подачі» нитки використовувався пристрій (рис. 3.2., а), розроблений на кафедрі механічної інженерії. Пристрій містить корпус 1, в якому в підшипнику 2 на осі 3 закріплений шків 4 та магнітний маховичок 5. Поруч з магнітним маховичком 5 закріплений індукційний датчик 6 для вимірювання довжини кола маховичка 5 під час його обертання, а отримані показники виводились на цифровий дисплей 7 (цифровий канал В, (рис. 3.2)). Обертаний рух магнітного маховичка 5 здійснювався завдяки проходженню нитки 8 в петлі, намотаній на шків 4 кількома витками, що забезпечувало надійне зчеплення та усуває можливість її проковзування. Один вільний кінець нитки проходив через ролик 9 і далі заводився до «контуру подачі» або «контуру витрат», залежно від напрямку дослідження (відповідно рис. 3.2., б та рис. 3.2., в). Інший кінець нитки проходив через ролик 10, і на його кінці був закріплений тягарець 11.

Вимірювання кута повороту головного валу швейної машини GK-9-2 - 12 (рис. 3.2., б, в) відбувалося за допомогою іншого індукційного датчика 13, який зчитував кут повороту магнітного маховичка 14, а показники кута виводились на цифровий дисплей 7 (цифровий канал А, рис. 3.2.).

3.1.2 Порядок проведення та прийняті припущення

Для мінімізації впливу фізико-механічних властивостей нитки в процесі експерименту її параметри були наближені до характеристик ідеальної нитки [152]. Це було досягнуто завдяки тому, що під час тарування пристрою та

експерименту використовувалась одна й та сама нитка, а зусилля, прикладене до неї (вага тягарця 30 г), залишалось незмінним в обох випадках. Сам експеримент проводився за наступних умов:

1. Для експерименту застосовувалась голка фірми «Raly», модель GK9, №230, і бавовняно-паперова нитка 10S/3 лівої крутки в три складання. Матеріалом, що використовувався під час експерименту, був тарний картон TLW «Обухів» [184], товщина якого у стисненому стані під дією зусилля притискної лапки становила: $m_{\min}=0,4$ мм та $m_{\max}=8$ мм.

2. Для оцінки мінімальних і максимальних значень необхідної подачі нитки дослідження проводилося при крайніх значеннях технологічних параметрів стібка: $m_{\min}=0,4$ мм, $t_{\min}=8$ мм, $m_{\max}=8$ мм, $t_{\max}=12$ мм.

4. Реальна довжина стібка була визначена як середнє арифметичне значення довжини 10 стібків.

3. Зусилля на регуляторі встановлювали таким чином, щоб забезпечити утворення ланцюгового стібка за заданими технологічними параметрами, що гарантувало відповідну структуру стібка [59, 60, 61].

Для визначення значень функцій дійсної подачі нитки $P(\phi)$ здійснювався вимір зміни довжини «контуру подачі» (рис. 3.1, б). Для цього на поверхню шківів 4 декілька разів було намотано нитку 8, таким чином щоб усунути можливість її проковзування можливість її проковзування. Кінці нитки 8 проводились через ролики 9 та 10, які встановлені рухомо на корпусі 1. На одному з кінців нитки 8 було закріплено тягарець масою 30 г, а другий кінець нитки, заводився до «контуру подачі» та ниткоподавач 15. Положення головного валу машини 12 встановлювали з інтервалом 10° за показаннями каналу «А» цифрового дисплея 7 шляхом обертання маховичка 14. Паралельно на каналі «В» того ж дисплея реєстрували зміну довжини «контуру подачі» під впливом тягарця 11 внаслідок зміни положення ниткоподавача 15.

Показання значень функцій необхідної подачі нитки $P'(\phi)$ були отримані шляхом вимірювання зміни довжини «контуру витрат» (рис. 3.1., в). Спочатку встановлювали відповідні значення технологічних параметрів t та m і

налаштовували регулятор 16 так, щоб забезпечити рівномірну структуру стібка, вільну від дефектів (стягування, провисання, надмірного натягу петель ниток). Маховичок 14 обертали з інтервалом 10° окрім цього, відповідно технологічного процесу утворення стібка типу 101 вимірювання здійснювалося в характерних моментах процесу утворення стібка (П. 2.5). Для цього була отримана циклограма взаємодії робочих органів в машині GK-9-2, параметри якої наведено в таблиці 3.1, яка буде використана для побудови синхрограми машини.

Таблиця 3.1

Характерні моменти процесу утворення ланцюгового стібка типу 101

Поз.	Фізична суть моментів утворення однопниткового ланцюгового стібка	Значення кута повороту головного валу
φ_{0-9}	Крайнє верхнє положення голки та крайнє правє положення розширювача	$0^\circ (360^\circ)$
φ_1	Закінчення транспортування матеріалу	50°
φ_2	Вушко голки входить в матеріали	$95-68^\circ$
φ_3	Вістря голки виконує «закол» попередньої петлі нитки та сходження її з носика розширювача	172°
φ_4	Скорочення петлі нитки ниткоподавачем	172°
φ_5	Крайнє нижнє положення голки	180°
φ_6	Утворення «петлі напуску» і захоплення носиком розширювача	255°
φ_7	Скорочення «петлі напуску» до розмірів носика розширювача.	255°
φ_8	Початок переміщення матеріалу	288°

В моменти φ_{3-4} та φ_{6-7} «контур витрат» скорочували до розмірів, які обмежені геометричними параметрами робочих органів та їх положенню в відповідні моменти φ_4 , φ_7 та φ_8 . В періоді φ_5 - φ_6 показники «контур витрат» залишали постійними, що необхідно для стабільності процесу утворення «петлі напуску» і відповідає значенню функції $P(\varphi_5)$ при значенні аргументу φ_5 . Показання довжини «контур витрат» та кута повороту головного валу вимірювалися аналогічно вимірюванню при «контурі подачі».

3.1.3 Тарування експериментальної установки

Тарування пристрою 1 (рис. 3.2) здійснювали шляхом вимірювання співвідношення діаметрів шківів 2 та магнітного блочка 3. Для цього проводили серію вимірювань ($N=10$) у діапазоні 0-50 мм. Нитка 4, проходячи через шків 2, під дією тягарця 5 переміщувала магнітну стрічку 6. Переміщення нитки 4 через стрічку 6 реєстрували датчиком 7 (канал А) вимірювального пристрою 8, тоді як переміщення магнітного блочка 3 визначали окремим датчиком пристрою 1 (канал В).



Рис. 3.2. Схема тарування експериментальної установки

Показання довжини «контуру витрат» та «контура подачі» оброблялись у два етапи. На першому етапі проводилась обробка результатів прямих вимірів, з обчисленням середніх значень та середньоквадратичного відхилення для серії експериментів у визначених точках (кут повороту головного вала, показання в міліметрах цифрового дисплея), згідно з методикою [185, 186]. Результати, що містили очевидні грубі помилки, відповідно до рекомендацій [183] відкидались, а решта значень піддавались подальшій обробці за алгоритмом [187].

Перед обробкою результатів, усі дані перевірялись на наявність аномальних значень за критерієм Шовне, згідно з рекомендаціями [185]. У разі виявлення таких значень вони видалялись з розрахунку, а решта значень підлягали повторному обчисленню.

При цьому враховувались такі припущення:

1. Нехтування методичною похибкою;
2. Визнання, що інструментальна похибка має лише систематичну складову;
3. Визнання додаткової похибки як випадкову складову;
4. Точність вимірювальних приладів гарантується (найбільша абсолютна інструментальна похибка дорівнює $\Delta_{ay} = \pm 0,05$ мм);
5. Відповідно до рекомендацій [185] задається достовірна ймовірність $\alpha = 95\%$.

Варто зазначити, що інструментальна похибка вимірювального пристрою дорівнює довірчому інтервалу значень (Додаток Б), отриманих у певних точках тарування. Тому, згідно з [185, 186], отримаємо:

$$\Delta_{map.} = 1 / \sqrt{\sum_{n=1}^n w_n}, \quad (3.1)$$

де

$$w_n = 1 / \Delta x_n^2$$

w_n -статистичний вклад похибки n-го виміру;

Δx_n -похибка n-го виміру отриманих значень при таруванні.

В результаті обрахунків похибка тарування склала $\Delta_{map.} = 0,008$.

На другому етапі, після обробки експериментальних значень, їх переводили в дійсні величини відповідно до графіка тарування (рис. 3.4.) із застосуванням методики обробки непрямих вимірювань [185, 186].

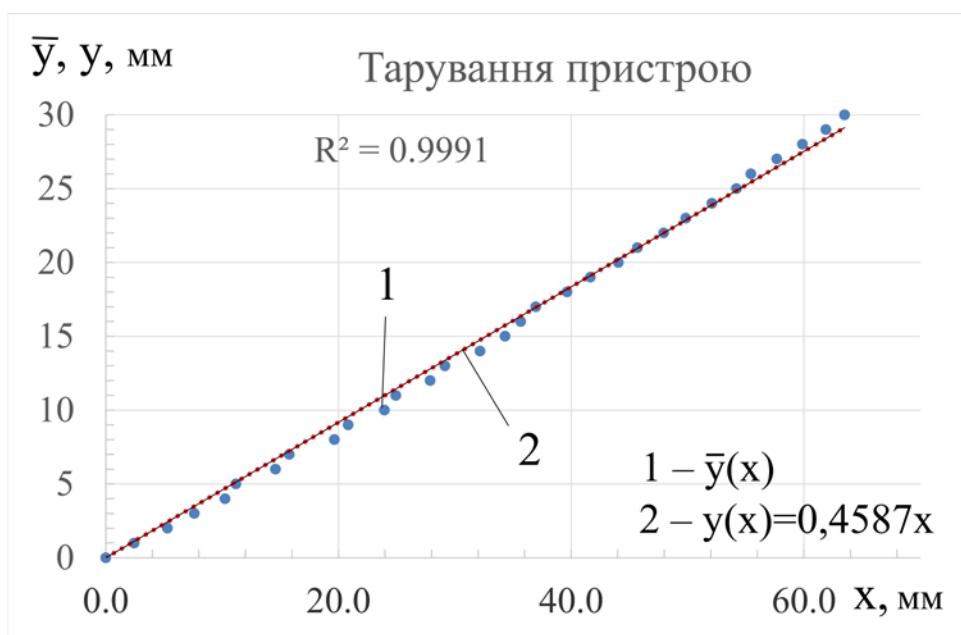


Рис. 3.3 Графіки тарування пристрою: 1 - середнє значення показання вимірів, 2 - апроксимована пряма

З цією метою було знайдено рівняння, що апроксимує тарувальний графік, застосовуючи залежності (2.37–2.41). Враховуючи, що кожна його точка (рис. 3.3) має розкид $\pm \Delta a.$ пр. уздовж осі ординат, графік апроксимували лінійною залежністю за методом найменших квадратів [183, 187] (результати обрахунку вимірювань при таруванні наведені в Додатку Б, табл. Б1, Б2). Достовірність апроксимації склала $R^2 = 0,9991$, а рівняння апроксимованої прямої має вигляд:

$$\bar{y}(x) = 0,4587 \cdot x, \quad (3.2)$$

Значення функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки в дійсних величинах:

$$P(\varphi), (P'(\varphi)) = \bar{y}(x(\varphi)) = 0,4587 \cdot x(\varphi) \quad (3.3)$$

Оскільки обробка експериментальних даних здійснювалася методом прямих вимірювань [185, 186], інструментальна похибка з урахуванням (3.2):

$$\Delta y_{in.} = \left| \frac{dy}{dx} \right| \cdot \Delta x, \quad (3.4)$$

$\Delta y_{in.}$ - інструментальна похибка приладу, мм;

$\frac{dy}{dx}$ - коефіцієнт тарування ($\frac{dy}{dx}=0,4587$);

Δx - інструментальна похибка вимірювання по шкалі (0,05 мм, Додаток Б, табл. Б2), мм.

З аналізу значень виразів (3.2) та (3.4) випливає, що інструментальна похибка зменшується до $\Delta y_{in.} = 0,023$.

Загальна похибка результатів оцінювалася з урахуванням як інструментальної похибки, так і статистичної похибки середнього значення. Остаточна похибка обчислювалася за формулою:

$$\Delta_{заг.} = \sqrt{\left(\left|\frac{dy}{dx}\right| \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{t_p \cdot S}{\sqrt{N}}\right)^2} + \Delta_{тар.}^2, \quad (3.5)$$

де: $\Delta_{заг.}$ – загальна похибка вимірів, мм;

S - середньо квадратичне відхилення відносно $\bar{y}$;

N - кількість повторних вимірів;

t_p – коефіцієнт Стюдента (при $P=0,95$, $N=10$, $t_p = 2,62$).

Отримані значення функції дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки та похибки (3.4) були округлені до другого знаку після коми, що регламентується точністю приладу (Додаток Б, таб. Б3-Б8).

3.1.4 Результати експериментальних досліджень функцій подачі нитки

Результати експериментальних досліджень законів подачі $P_1'(\varphi)$, $P_2'(\varphi)$ та $P(\varphi)$ нитки швейної машини GK-9-2 наведені у (Додаток Б), а їх графічне представлення середніх значень наведено на рис. 3.4 (відповідно крива 1, 2 та 3). Сумарний приріст функції $\Delta(\varphi)$ та функції збіжності $C_i(\varphi)$ визначалися за формулами (2.29-2.31). Діаграма функцій збіжності $C_i(\varphi)$ значень дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ до необхідної $P_{1,2}'(\varphi)$ при максимальних та мінімальних технологічних параметрах наведена на рисунку 3.4. Також на діаграмі збіжності

$C_i(\varphi)$ показано різницю цих функцій - $\Delta(\varphi)$, що показує величину і характер впливу технологічних параметрів на необхідну функцію дійсної подачі нитки $P'(\varphi)$.

Аналіз функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P_1'(\varphi)$ та $P_2'(\varphi)$ подачі нитки (крива 3 та криві 1, 2 рис. 3.5) показав, що необхідна подача нитки $P_1'(\varphi)$ суттєво відрізняється від дійсної $P(\varphi)$, при цьому в різні моменти процесу утворення стібка, ці значення є різними. Так аналіз діаграм функцій подачі нитки нитки $P(\varphi)$ та $P'(\varphi)$ показав, що в інтервалі $\varphi_0\text{--}\varphi_3$ відбувається процес подачі нитки необхідний на проведення петлі нитки крізь матеріали, формування попередньої петлі нитки. При цьому кількість поданої нитки є надмірною (максимальне значення функції збіжності складає - $C_{1,2}(\varphi_0\text{--}\varphi_3) \approx 18\div 30$ мм), що призводить до її провисання. В інтервалі $\varphi_3\text{--}\varphi_4$ у відповідності до вимог до функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$, зазначених в роботах [137, 138, 139], необхідне скорочення попередньої петлі нитки, яка сходить з носика розширювача після її «заколу» голкою (рис. 2.4, д). Однак у реальному процесі утворення стібка це неможливо здійснити. По-перше, в інтервалі процесу утворення стібка $\varphi_0\text{--}\varphi_3$ створюється надлишок поданої нитки ниткоподавачем ($C_{1,2}(\varphi_0\text{--}\varphi_3) \approx 30\div 18$ мм). По-друге, скоротити петлю голкової нитки можливо лише до розмірів, обмежених стержнем голки (рис. 2.4, е). І на останнє, враховуючи, що сумарний кут охоплення поверхонь ниткою від набігаючої гілки NA (рис. 2.4, а) до ділянки контуру нитки яка охоплює борідку розширювача становить близько $3,5\pi$, виконати це практично неможливо. Тому вибір надлишку нитки починається в періоді $\varphi_7\text{--}\varphi_8$ відповідно в моменти, які визначають перетину графіків функцій $P_{1,2}'(\varphi)$ та $P(\varphi)$ відповідно в точках А та В (рис. 3.5, 5). В цей же час в роботах [159] вказано, що скорочення петлі голкової нитки стібка типу 401 відбувається в 2 етапи, частково в аналогічному періоді $\varphi_0\text{--}\varphi_4$ при русі голки до крайнього нижнього положенні та затягування стібка в періоді $\varphi_8\text{--}\varphi_9$.

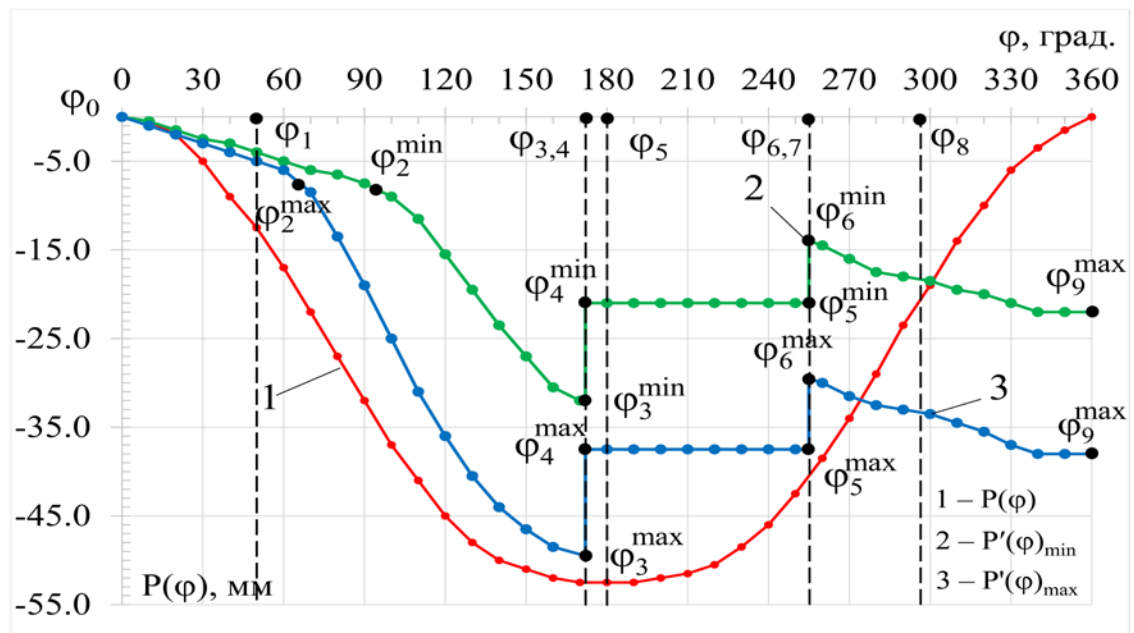


Рис. 3.4 Графіки подачі нитки для швейної машини GK-9-2

1 -графік експериментальних значень функції дійсної подачі нитки $P(\varphi)$; 2 - графік експериментальних значень функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)_{\min}$ при мінімальних значеннях $t_{\min}=8$ мм, $m_{\min}=0,4$ мм; 3 - графік експериментальних значень функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)_{\max}$ при максимальних значеннях $t_{\max}=12$ мм, $m_{\max}=8$ мм;

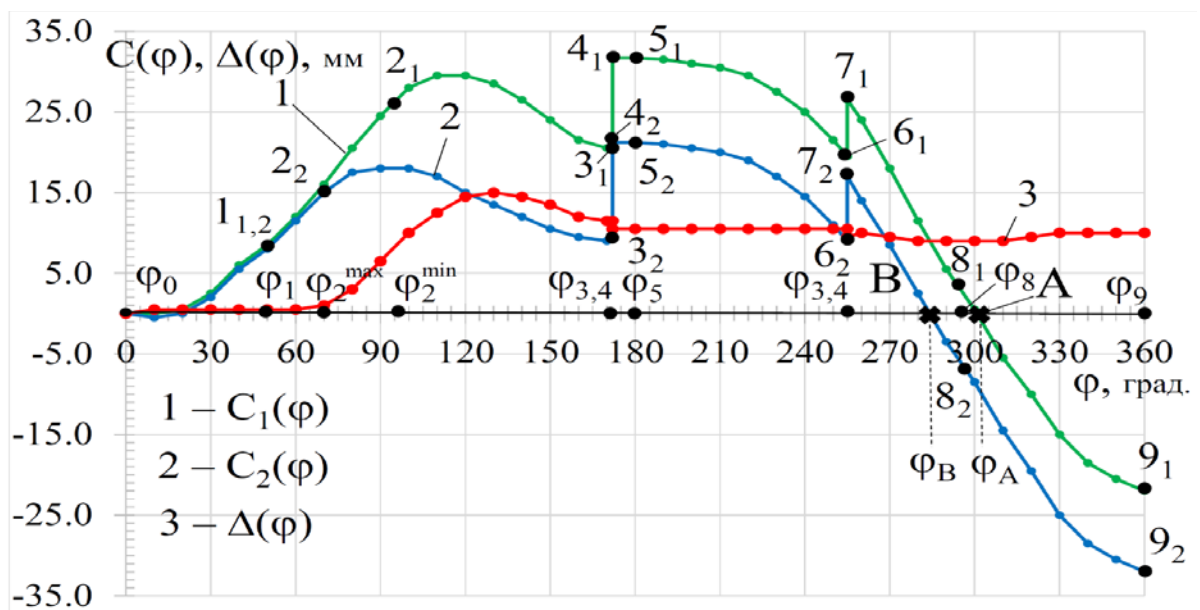


Рис. 3.5 Діаграма збіжності $C_i(\varphi)$ та приросту функцій необхідної подачі нитки $\Delta(\varphi)$ швейної машини GK-9-2 при мінімальних $i=1$ та максимальних $i=2$ технологічних параметрах

1 -графік функцій відповідності $C_1(\varphi)$ при мінімальних параметрах $t_{\min}$ та $m_{\min}$, 2 -графік функцій відповідності $C_2(\varphi)$ при максимальних параметрах $t_{\max}$ та $m_{\max}$, 3 - графік приросту $\Delta(\varphi)$ функції необхідної подачі нитки при зміні технологічних параметрів від мінімальних до максимальних

Що вказує на своєрідність процесів утворення даного типу стібка та розподілення навантаження на нитку протягом усього процесу утворення стібка.

В період $\phi_4\text{--}\phi_6$ відбувається утворення «петлі напуску» та захоплення її носиком розширювача, в періоді $\phi_6\text{--}\phi_7$ відбувається скорочення надлишку «петлі напуску» до розмірів розширювача, ці процеси теж не можуть бути забезпечені функцією дійсної подачі нитки $P(\phi)$, оскільки процес подачі нитки відбуваються з надлишком поданої нитки ($C_{1,2}(\phi_6\text{--}\phi_7) \approx 21 \div 9$ мм). В період $\phi_7\text{--}\phi_8$ відбувається розширення петлі нитки розширювачем, яке з моменту ϕ_8 стається одночасно, ще й з переміщенням матеріалів до моменту ϕ_1 , ці процеси можна здійснювати до моментів ϕ_A та ϕ_B . В залежності від значень технологічних параметрів затягування стібка та змотування з нитки з бобіни відбувається в періоди $\phi_A\text{--}\phi_9$ та $\phi_B\text{--}\phi_9$. Перше, що потрібно зазначити - період $\phi_A\text{--}\phi_B$ виникає в результаті зміни технологічних параметрів (довжина стібка t і товщина матеріалу m) і є індикатором моментів, коли починається процес затягування стібка. Протяжність цього періоду показує, як ці параметри впливають на циклограму машини, визначаючи час, доступний для затягування нитки і змотування, що в свою чергу впливає на якість стібка.

Слід відзначити, що при різних технологічних матеріалах t та m функції збіжності $C_1(\phi)$ та $C_2(\phi)$ (рис. 3.5) мають різні значення, це пов'язано з тим що в машині GK-9-2 не передбачено регулювання величини дійсної подачі нитки $P(\phi)$, а її значення задовольняє умови лише при максимальних параметріях що підтверджується меншими значеннями функції в порівнянні з мінімальними технологічними параметрами ($C_2(\phi) < C_1(\phi)$). Аналіз діаграми на рис. 6 показує, що при мінімальних параметрах значення дійсної подачі нитки $P(\phi)$ перевищує необхідну на 64,1 %, вказуючи на надмірну подачу, тоді як при максимальних значеннях параметрів функція невідповідності $C_2(\phi)$ перевищує необхідну лише на 20,7 %.

Приріст функції $\Delta(\phi)$ (крива 3, рис. 3.5) необхідної подачі нитки $P'(\phi)$ за рахунок зміни технологічних параметрів наближено лінійний, що пов'язано зі збільшенням величини петлі нитки, яка проводиться в матеріал голкою, через

збільшення його товщини. Однак характер його зміни цього може мати складніший характер, що потребує більш глибоких досліджень.

Від'ємні значення кривих 1 та 2 (рис. 3.5) ілюструють початок процесу затягування стібка в точках «А» та «В». Аналіз показує, що при максимальних значеннях величини стібка та товщини матеріалів (крива 2) затягування відбувається раніше, до початку транспортування матеріалів (φ_8), тоді як при мінімальних параметрах затягування відбувається одночасно з їх переміщенням. Це вказує на те, що умови затягування стібка залежать від технологічних параметрів, і ці особливості потребують подальших досліджень. Також можна зробити висновок, що при різних технологічних параметрах якість стібка змінюється, оскільки закон дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ залишається незмінним.

Регулювання дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ в машинах даного конструктивного ряду здебільшого здійснюється через зміну зусилля на регуляторі стібка, що може спричиняти нестабільність подачі нитки .. Це явище залежить від таких параметрів, як товщина, пружність і коефіцієнт тертя нитки з іншими елементами механізму. Відхилення можуть бути зумовлені динамічними процесами в контурі подачі нитки, її пружними деформаціями або конструктивними особливостями машини.

3.1.5 Аналітичне моделювання функцій подачі нитки на основі експериментальних даних

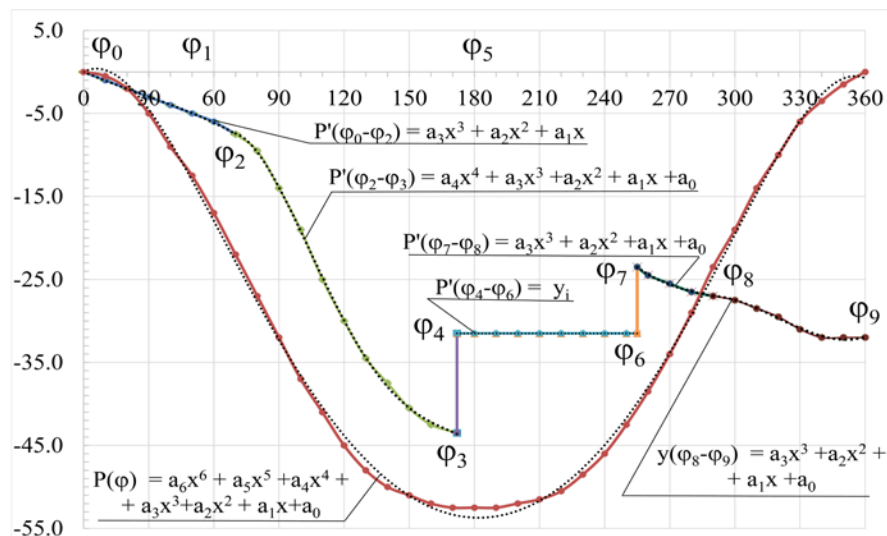
Результати апроксимації експериментальних даних за виразами (2.37-2.41), подані на рисунку 3.6, представлені у вигляді математичних моделей кусково-безперервних залежностей подачі нитки при різних технологічних параметрах ланцюгового стібка на машині GK-9-2 та наведені в таблиці 3,2.

Отримані математичні моделі функції подачі нитки (табл. 3.2, рис. 3.6) можуть бути використані для аналітичного опису законів подачі під час

Таблиця 3.2

Математичні моделі функцій подачі нитки

Поз.	Значення інтервалу	Коефіцієнти математичних моделей функцій подачі нитки			
		P'1(φ)	P'2(φ)	Δ(φ)	P(φ)
φ0-1	0°-50°	a10=0 a11=-0,0629 a12=-0,0006 a13=4·10 ⁻⁶ R ² = 0.9971	a20=0 a21=-0,111 a22=0,006 a23=-8·10 ⁻⁶ R ² = 0.9971	a30=0 a31=-0,1053 a32=0,0077 a33=-0,0003 a34=4·10 ⁻⁴ a35=-2·10 ⁻⁸ R ² = 0.9994	a0=0 a1=0,1373 a2=-0,0126 a3=0,0001 a4=-5·10 ⁻⁷ a5=1·10 ⁻⁹ a6=-1·10 ⁻¹² R ² =0.9986
φ1-2	50°-95(68)				
φ2-3	95 (68°)-172°				
φ4-5	172°-180°				
φ5-6	180°-255°	y1=-21 R ² = 1	y2=-31.5 R ² = 1	y3=-10.5 R ² = 1	
φ7-8	255°-288°	a10=-671,87 a11=7,7699 a12=-0,0301 a13=4·10 ⁻⁵ R ² = 0.9946	a20=771,64 a21=-8,097 a22=0,0275 a23=-3·10 ⁻⁵ R ² = 0.9958	a30=54276 a31=-1009,4 a32=7,7736 a33=0,0051 a34=7·10 ⁻⁵ a35=-9·10 ⁻⁸ a36=4·10 ⁻¹¹ R ² = 0.9927	
φ8-9	288°-360	a10=568180 a11=-8637,6 a12=52,46 a13=-0,1591 a14=2·10 ⁻⁴ a15=-1·10 ⁻⁷ R ² = 0.9998	a20=150587 a21=-2347,1 a22=14,597 a23=-0,0453 a24=7·10 ⁻⁵ a25=-4·10 ⁻⁸ R ² = 0.9982		

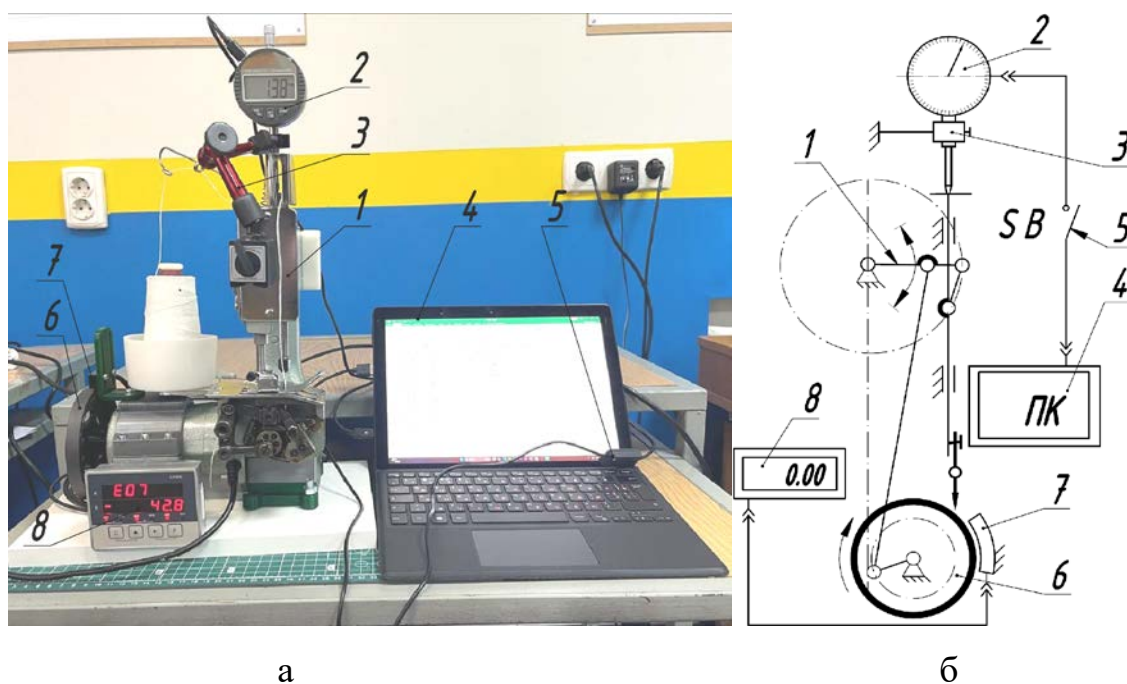
Рис. 3.6 Графічне представлення математичних моделей функцій подачі нитки $P(\phi)$ та $P'(\phi)$ в загальному вигляді

проектування механізмів подачі нитки та обслуговування цього типу обладнання.

Вказані моделі будуть застосовані для оцінки механізму подачі нитки базової конструкції та розробки регресійних моделей функції подачі нитки в залежності від технологічних параметрів стібка, а також синтезу нових механізмів.

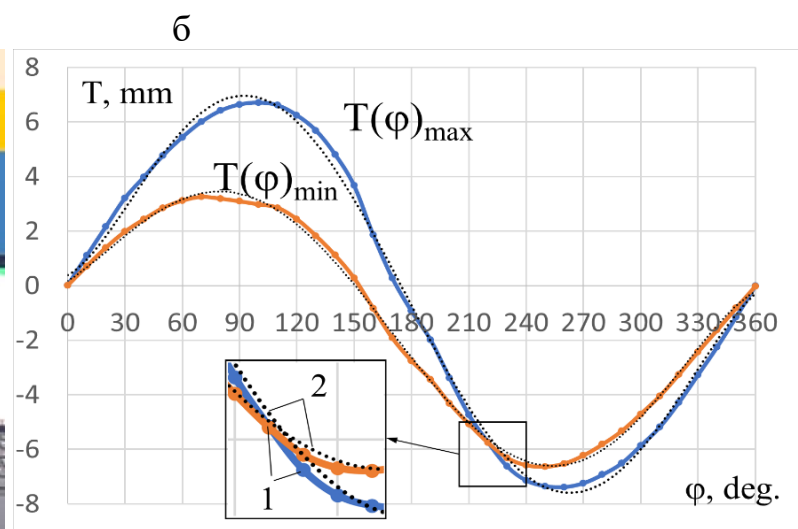
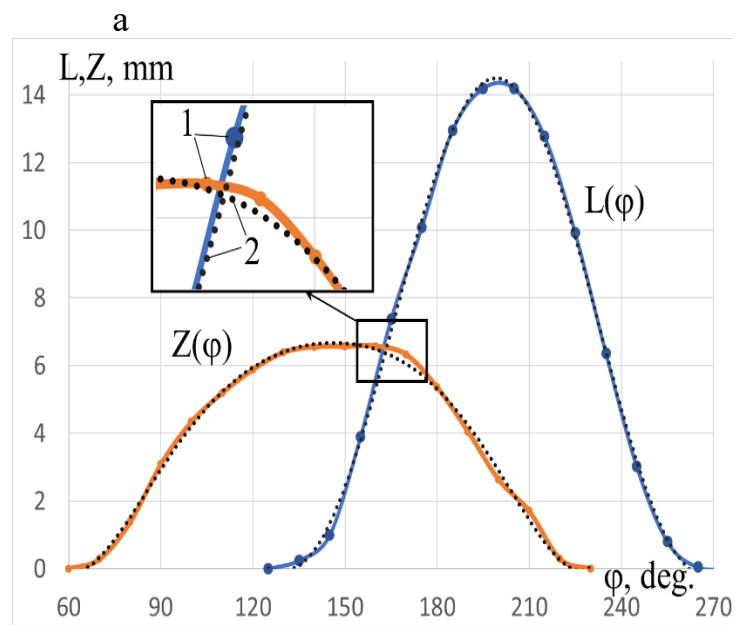
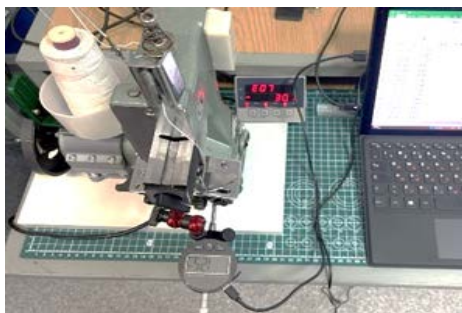
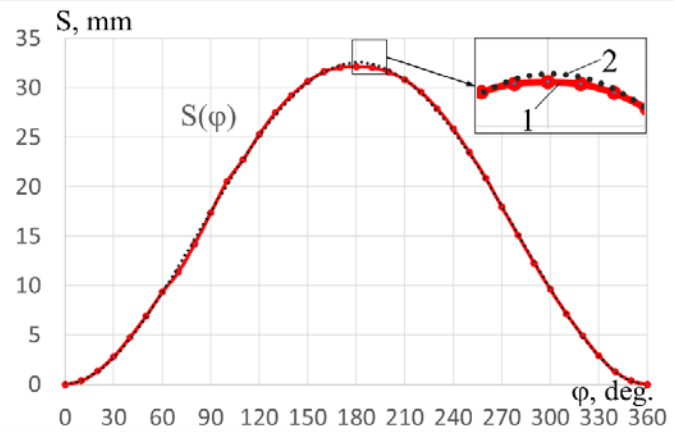
3.2 Експериментальне визначення значень функцій положення робочих органів машин ланцюгового стібка типу 101

У межах дослідження експериментально визначені значення функцій положення робочих органів швейної машини GK-9-2 при мінімальних і максимальних значеннях технологічних параметрів стібка - товщини матеріалу (m) та довжини стібка (t). Для цього використовувалась швейна машина GK-9-2 - 1 (рис. 3.7), індикатор 2 був закріплений на штативі 3, а його наконечник



1 - швейна машина GK-9-2, 2 - індикатор, 3 - штатив, 4 - персональний комп'ютер (ноутбук), 5 - кнопка, 6 - магнітний маховик, 7 - датчик, 8 - цифровий дисплей для виміру кута повороту головного валу машини

Рис. 3.7 Експериментальна установка з вимірювання функції положення ниткоподавача $T(\varphi)$: а) - фото установки, б) - кінематично-комбінована схема експериментальної установки



в

Рис. 3.8 Експериментальне дослідження функцій положення робочих органів:
а) голки $S(\varphi)$, б) розширювача вздовж $L(\varphi)$ та поперек $Z(\varphi)$ строчки, в) рейки
вздовж строчки $T(\varphi)$, 1 - експериментальні дні, 2 - апроксимовані дані

встановлений на голководі машини 1. Цифровий індикатор 2 (ціна поділки 0,01 мм) через USB був підключений до ПК 4 для запису вимірювань, які здійснювалися за допомогою кнопки 5. Кут повороту головного валу вимірювався за допомогою магнітного маховичка 6 та датчика 7, а показники кута виводилися на дисплей 8.

Визначення функцій положення робочих органів здійснювався з кроком 10° , а обробка експериментальних результатів проводилась за методиками, описаними у роботах [185, 186], на основі серії з 10 спостережень. Результати вимірювань та обрахунку наведені в Додатку В, а їх графічне представлення на рис. 3.8.

Отримані результати експерименту будуть використані для побудови синхрограми машини та верифікації отриманих аналітичних залежностей.

3.3 Аналітичне моделювання функцій подачі нитки на основі експериментальних даних

Функції положення робочих органів визначено шляхом апроксимації експериментальних даних за методикою [182], результати якої наведено в табл. 3.3. На основі отриманих значень (Додаток В) побудовано математичні моделі функцій подачі нитки у вигляді поліномів шостого ступеню згідно з виразами (2.37-2.41), що описують залежність положення відповідних ланок у функції кута повороту головного вала для різних значень технологічних параметрів.

Побудовані моделі будуть застосовані для аналізу кінематики механізмів подачі нитки, побудови узагальненої синхрограми швейної машини, верифікації аналітичних залежностей, отриманих у процесі теоретичних досліджень, а також для визначення функцій дійсної та необхідної подачі нитки й синтезу нових конструкцій механізмів з урахуванням технологічних параметрів стібка.

Таблиця 3.3

Значення поліноміальних моделей функцій положення робочих органів швейної машини GK-9-2 при різних значеннях параметрів стібка

Поліноміальна модель функції положення робочих органів	Діапазон значень ϕ	Коефіцієнт детермінації
$S(\phi) = 0.0891 \cdot \phi^6 - 0.00438 \cdot \phi^5 + 0.00347 \cdot \phi^4 - 1.33 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 - 2.06 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^2 + 1.26 \cdot 10^{-10} \cdot \phi - 1.12 \cdot 10^{-13}$	0-360	$R^2 = 0,9997$
$Z(\phi) = -5.38 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^6 + 7.96 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^5 - 4.24 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^4 + 0.0102 \cdot \phi^3 - 1.233 \cdot \phi^2 + 67.16 \cdot \phi - 1191.87$	60-230	$R^2 = 0.9978$
$L(\phi) = -8.479 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^6 + 9.639 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^5 - 4.422 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^4 + 1.044 \cdot 10^{-2} \cdot \phi^3 - 1.337 \cdot \phi^2 + 86.005 \cdot \phi - 1944.642$	125-265	$R^2 = 0.9991$
$T(\phi)_{\max} = 6.42 \cdot 10^{-14} \cdot \phi^6 - 1.70 \cdot 10^{-10} \cdot \phi^5 + 1.18 \cdot 10^{-7} \cdot \phi^4 - 2.99 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 + 2.26 \cdot 10^{-3} \cdot \phi^2 + 3.74 \cdot 10^{-2} \cdot \phi + 0.382$	0-360	$R^2 = 0.9971$
$T(\phi)_{\min} = -1.41 \cdot 10^{-14} \cdot \phi^6 - 4.78 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^5 + 4.81 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^4 - 1.27 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 + 6.97 \cdot 10^{-4} \cdot \phi^2 + 4.41 \cdot 10^{-2} \cdot \phi + 0.168$	0-360	$R^2 = 0.9981$

3.4 Аналітичне дослідження механізмів подачі ідеальної нитки швейних машин однопіткового ланцюгового стібка типу 101

Механізми подачі нитки базових машин конструктивного ряду GK-9 (GK9-2, Gk9-10, GK9-18A, GK9-202, GK 9-500, GK9-801, Gk9-886, GK9-890C, GK-9000A), Gk26-1A, GK 35 (GK 35-8), GK-3700, KP3000, RG-900D (RZ-668, RG-555) [176, 177]. В зазначених типах машин застосований механізм подачі нитки повзунного типу [179] з одним ниткоподавачем T_u та системою нитконапрямників G_i (рис. 2.14, 3.9).

Оскільки координати нитконапрямників і ниткоподавачів практично лежать в одній площині, «контур подачі» нитки машини GK-9-2 (рис. 3.9) розглядається у плоскій системі декартових координат YX , що дозволяє отримати результати з необхідною точністю подачі нитки, як зазначено в роботі [161].

Таблиця 3.4

Координати нитконапрямників та ниткоподавача

G_i	0	1	2	3	$Tu1^*$	N
	i				КВП	
x	40	29	-11	-11	$\pm 0,5D$	0
y	-37	-37	-37	-135	0	-175

* - координати вказані при КВП ниткоподавача Т, знак «+» та «-» береться відповідно при визначенні ділянки $p_{G1-T(\varphi)}$ та $p_{T-G2(\varphi)}$

Контур нитки представлено як суму вільних векторів, побудованих між відповідними нитконапрямниками G_0, G_1, G_3, N та ниткоподавача $T(\varphi)$.

Довжина ділянки контуру подачі $\xi(\varphi)$:

$$\xi(\varphi) = p_{G0-G1} + p_{G1-T}(\varphi) + p_{T-G2}(\varphi) + p_{G2-G3} + p_{G3-N} + D. \quad (3.5)$$

Для визначення довжини відрізків p_{i-i+1} в початковий момент відліку ($\varphi=0^\circ$) застосовані ті ж залежності, що й при визначенні відрізків $p_{i-i+1}(\varphi)$ при $\varphi=0^\circ$, в загальному вигляді довжини цих лінійних ділянок визначаються виразом (2.28).

Механізм подачі нитки цієї машини повздовж усього процесу утворення стібка має постійне число елементарних ділянок тому функція подачі нитки тотожна з функцією положення голки і залежить фактично від зміни ділянок $p_{G1-T(\varphi)}$ та $p_{T-G2(\varphi)}$.

Функція положення ниткоподавача $T(\varphi)$ аналогічна функції механізму голки $S(\varphi)$ (додаток Г). Механізм голки швейної машини GK-9-2 є шестиланковим кривошипно-повзунним механізмом, структура якого показана на рис. 2.15, а параметри наведено в таблиці 3.5.

З метою порівняльного аналізу значень функцій $P(\varphi)_{\text{теор}}$ і $P(\varphi)_{\text{екс}}$ та $P'(\varphi)_{\text{екс}}$, при різних технологічних параметрах стібка, відповідні графічні залежності подано на рис. 3.10.

Таблиця 3.5

Кінематичні параметри механізму подачі нитки

O_1A	AB	O_1O_2	O_2B	O_2C	CD	l	h	e
(a)	(b)	(d)	(c)	(m)	(n)			
мм								
12	160	106.5	18	24	13	13	160	23

Аналіз графіків функції положення ниткоподавача $Tu(\varphi)$ (рис. 3.10) за теоретичними та експериментальними даними (криві 1 і 2) демонструє їхню високу узгодженість, що підтверджує адекватність запропонованої аналітичної моделі. Для функції дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ (криві 5 і 6) також спостерігається практичний збіг аналітичних та експериментальних значень; похибки не перевищують порядок відхилень, характерних для функції $T(\varphi)$. Незначні розбіжності (до $\pm 2\%$) є наслідком малої довжини контуру подачі нитки порівняно з машинами багатониткового ланцюгового стібка [162, 179] та використанням малорозтяжної нитки в експерименті.

Аналіз функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки (криві 5, 6 та 3, 4) виявив певні розбіжності між їх значенням. Експериментально визначена необхідна мінімальна подача нитки $P'(\varphi)_{\min}$ суттєво відрізняється від дійсної $P(\varphi)$: максимальне значення подачі нитки перевищує необхідне на 64,4% і становить 52,6 мм замість 32 мм (при $t_{\min}=8$ мм, $m_{\min}=0,4$ мм).

Така розбіжність може бути спричинена конструктивними особливостями механізму подачі нитки та його параметрами. Крім того, механізм спроектовано для максимально можливої товщини матеріалу ($t_{\max}=14$ мм, $m_{\max}=8$ мм), за якої максимальне значення функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)_{\max}$ становить приблизно 49,5 мм, що на 6,2 % менше дійсної подачі $P(\varphi)$. Варто зазначити, що машина не передбачає регулювання функції подачі нитки.

Тому за різних технологічних умов подача нитки змінюється і компенсується переміщенням нитки з попередніх стібків. Регулювання здійснюється шляхом зміни зусилля на регуляторі стібка, що призводить до

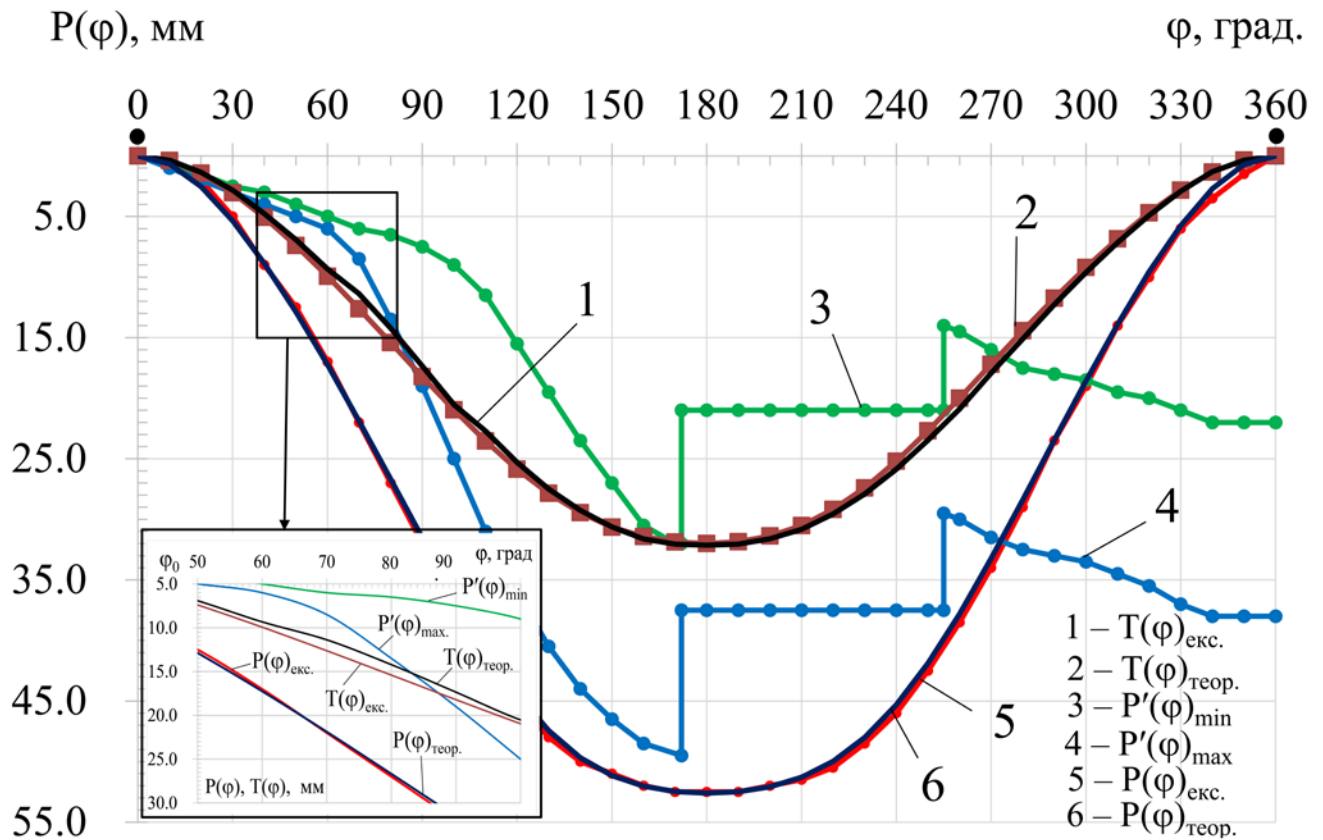


Рис. 3.10 Графіки подачі нитки для швейної машини різних значень параметра GK-9-2

1 - графік експериментальних значень функції положення ниткоподавача $T(\varphi)_{\text{екс.}}$, 2 - графік теоретичних значень функції положення ниткоподавача $T(\varphi)_{\text{теор.}}$, 3 - графік експериментальних значень функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)_{\text{min}}$ при мінімальних значеннях технологічних параметрів стібка, 4 - графік експериментальних значень функції необхідної подачі нитки $P'(\varphi)_{\text{max}}$ при максимальних значеннях технологічних параметрах стібка, 5 - графік експериментальних значень функції дійсної подачі нитки $P(\varphi)_{\text{екс.}}$, 6 - графік теоретичних значень функції дійсної подачі нитки $P(\varphi)_{\text{теор.}}$.

нестабільності системи подачі нитки та залежить від параметрів самої нитки, зокрема її товщини, пружності та коефіцієнта тертя.

Ці відхилення можуть бути спричинені динамічними явищами в механізмі подачі нитки, пружними деформаціями нитки або конструктивними особливостями швейної машини. Це підкреслює необхідність вдосконалення математичної моделі для забезпечення точнішої відповідності опису процесу утворення стібка в реальних умовах роботи машини.

Отримані результати вказують на потребу в подальшому вдосконаленні математичної моделі функції необхідної подачі нитки, зокрема шляхом урахування її фізико-механічних властивостей, таких як жорсткість, деформаційна здатність та тертя. Це дозволить отримати більш реалістичні значення величини подачі нитки.

Крім того, важливим завданням є розроблення конструкції механізму подачі нитки з можливістю регулювання закону подачі. Це дасть змогу адаптувати подачу нитки до різних умов роботи швейної машини, мінімізуючи нестабільність та поліпшуючи якість зшивання.

3.5 Експериментальне дослідження натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 базової машини

3.5.1 Опис будови експериментальної установки

Для вимірювання натягу нитки в процесі утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101 використано експериментальну установку, що складається з швейної машини GK-9-2 (1) (рис. 3.11), тензометричного пристрою ELTENS (2), частотного регулятора та тахометричного приладу для реєстрації обертів головного вала. На швейній машині забезпечувалось стабільний процес формування стібка, у той час як пристрій ELTENS здійснював безперервний контроль зусилля натягу нитки в реальному часі.

3.5.2 Тарування вимірювального пристрою

Перед початком дослідження, а також після кожного досліду, здійснювалося тарування пристрою ELTENS для перевірки точності вимірювань. Для цього один кінець нитки закріплювали відповідно до схеми заправки в швейній машині, після чого до неї підвішували тягарець із відомою масою, що створював контрольоване зусилля натягу. Вимірювач ELTENS безпосередньо фіксує значення зусилля в ньютонах (Н), такий підхід тарування дозволяє перевірити стабільність показів та їх відповідність еталонним значенням. Схематичне представлення калібрування приладу ELTENS наведено на рис. 3.12, графік значень калібрування наведено на рис. 3.13, де по осі абсцис відкладено величину зусилля в ньютонах, а по осі ординат - відповідні покази приладу. Лінійний характер залежності підтверджує точність, чутливість та повторюваність вимірювання (рис. 3.13).

3.6.3 Алгоритм проведення експерименту

Експеримент проводився за такою послідовністю: заправлення нитки відповідно до схеми заправки машини GK-9, встановлення значень параметрів стібка (мінімальні та максимальні), формування пробних стібків і оцінка їхньої якості, за необхідністю структура стібка досягалася за рахунок зусилля на регуляторі натягу нитки. Частота обертання головного вала під час експерименту підтримувалась сталою на рівні 600 об/хв (що становить 60% від максимальної) за допомогою частотного регулятора, що дозволяло забезпечити однакові умови експерименту. Такий режим дозволив зафіксувати поведінку нитки у сталих динамічних умовах, характерних для промислового швейного процесу. Для вимірювання натягу нитки використовувався пристрій ELTENS (рис. 3.11).



Рис. 3.11 Експериментальна установка: 1 - базова швейна машина GK-9, 2 - пристрій для вимірювання зусилля натягу, 3 - прилад вимірювання зусилля



Рис. 3.12 Схема тарування пристрою ELTENS для виміру натягу

$\bar{y}$, у, Н Тарування пристрою для виміру натягу ниток

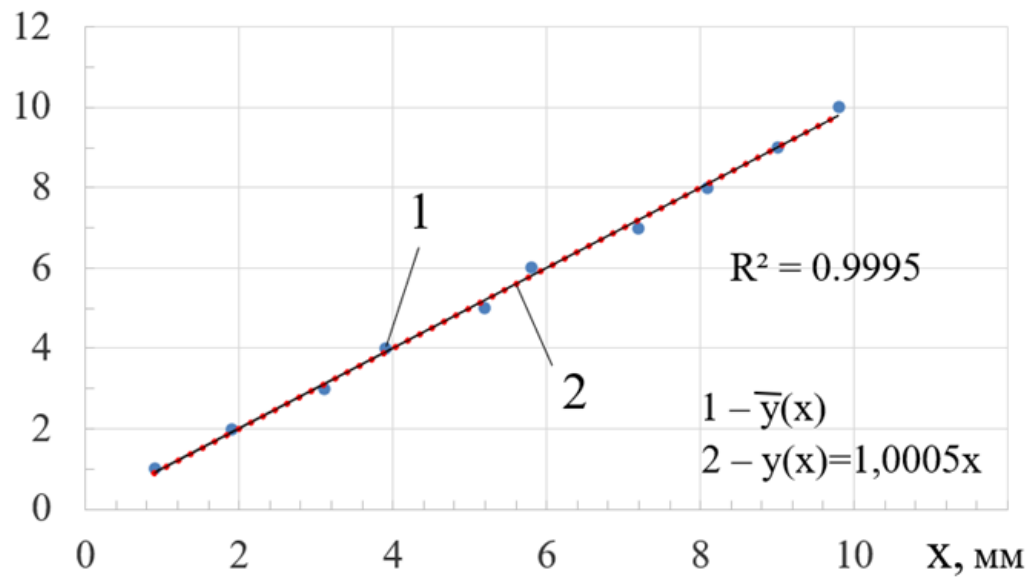


Рис. 3.13 Графік відповідності значень прибору значенням натягу нитки

3.6.4 Збір і обробка даних

Покази приладу ELTENS зчитувалися безпосередньо в цифровому вигляді та фіксувалися за допомогою стандартного інтерфейсу з подальшим опрацюванням у середовищі Microsoft Excel. Дані реєструвалися з високою частотою вибірки, що дозволяло побудувати графіки зміни зусилля натягу вздовж циклу утворення стібка достатньої точності. Дослідження виконувалося для максимальних і мінімальних значень технологічних параметрів стібка (відповідно, дослід 1 та дослід 2), по 10 спостережень для кожного режиму результати вимірів наведені в Додатку Д.

3.5.5 Повторне тарування

Тарування проводилося до і після кожного дослідження для перевірки відтворюваності показів і контролю стабільності роботи вимірювальної системи. Для кожного етапу виконувалося по 5 спостережень, усього - 10. Обробка результатів здійснювалася згідно з методикою [183]. Графік тарування наведено на рис. 3.14.

3.5.6 Основні результати

Вимірювання натягу нитки здійснювалися в зоні між точками G_0 - G_1 , яка не впливає на зміну «контуру подачі» нитки. Отримані графіки зусилля натягу нитки в процесі утворення стібка представлені на рис. 3.14, а максимальне значення цього параметру - в таблиці 3.6.

Результати дозволили кількісно охарактеризувати натяг нитки в динаміці процесу зшивання, виявити залежності між технологічними параметрами стібка та зусиллям натягу, що є основою для побудови математичних моделей подачі нитки й вдосконалення конструкцій механізмів подачі у швейних машинах.

Проведений аналіз показав, що зусилля натягу нитки суттєво змінюється залежно від товщини зшивного матеріалу. Так, при мінімальних параметрах ($t=8$ мм, $m=0,4$ мм) максимальне зусилля становить 1,28 Н, а при максимальних ($t=12$ мм, $m=8$ мм) - досягає 6,2 Н. Пікові значення зосереджені в межах $\varphi=270-360^\circ$, що відповідає моменту затягування стібка. Наявність піків у цьому діапазоні підтверджує характер змін, виявлений раніше у функціях відповідності $C1(\varphi)$ та $C2(\varphi)$, що описують відхилення фактичної подачі нитки від необхідної.

Таблиця 3.6

Значення максимально зусилля в процесі утворення стібка

Параметр	t	m	$F_{\max}$, Н
1	8	0,4	6,2
2	10	12	1,28

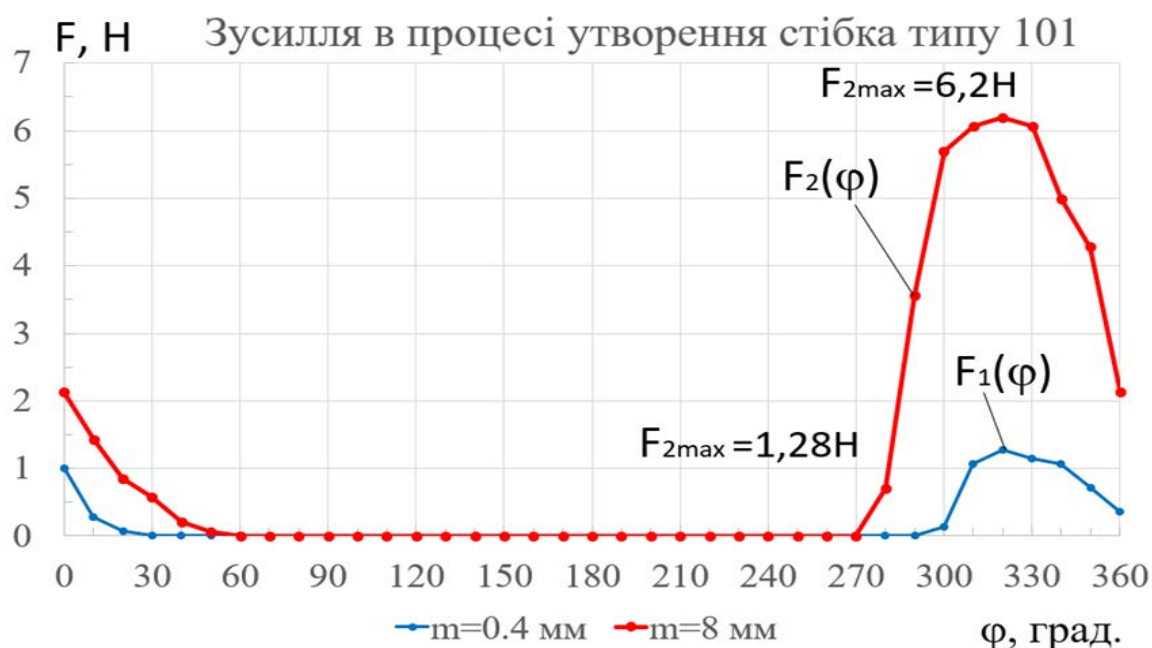


Рис. 3.14 Графіки значення зусилля натягу на ділянці G_0-G_1 при максимальних і мінімальних значеннях технологічних параметрів:

Таким чином, зусилля натягу може служити не лише фізичним маркером моменту затягування, а й аналітичним критерієм для перевірки узгодженості моделі подачі нитки зі зміною технологічних параметрів за умови забезпечення якості стібка.

3.6 Дослідження впливу технологічних параметрів стібка на необхідну функцію подачі нитки

3.6.1 Уточнення умов експерименту та побудова моделі об'єкта дослідження

Під час проведення експерименту вважається незмінними розміри, фізико-механічні властивості матеріалу та ниток, а також параметри які складають комплекс необхідних умов для створення ланцюгового стібка типу 101 на машині GK9-2.

Модель об'єкта досліджування з урахуванням прийнятих обмежень на рис. 3.15. Контрольованими факторами, F_u - зусилля натягу нитки, S_x - величина ходу голки в матеріалах, L_x - величина ходу розширювача поздовж строчки, Z_x - величина ходу розширювача поперек строчки, T_x - величина ходу ниткоподавача. Керуючі фактори прийняті x_1 - довжина стібка t , та x_2 - товщина матеріалів m , з вихідною велечиною.

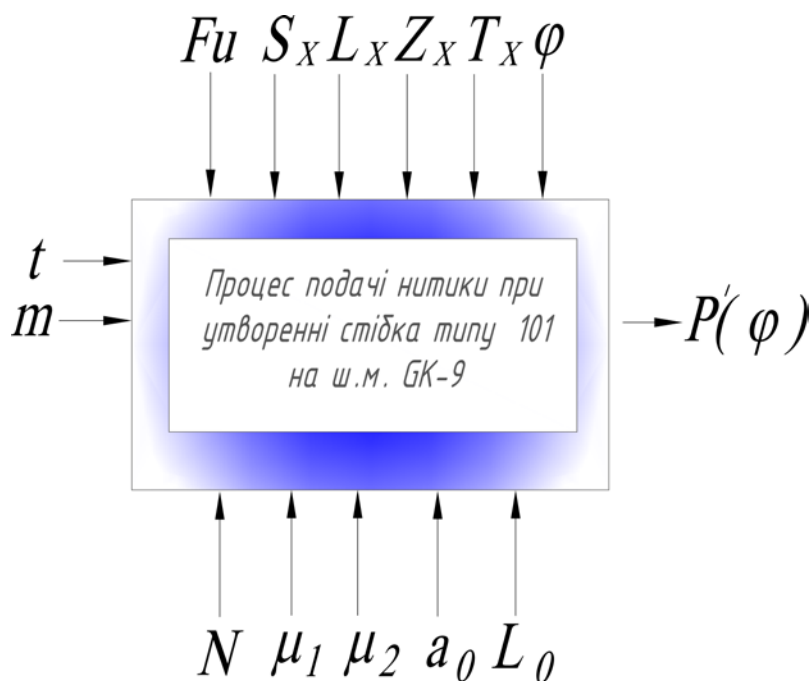


Рис. 3.15 Модель об'єкту досліджень

3.6.2 Порядок проведення експерименту

Стійкість процесу переплетення оцінювалась залежно від зусилля натягу нитки, яке регулювалося в діапазоні 1,28-6,2 Н за допомогою пристрою натягу (аналогічно П 3.5). Зазначене зусилля підбиралося таким чином, щоб забезпечити формування якісного стібка відповідно до технологічних параметрів. Під час експерименту також фіксувалася наявність або відсутність пропусків стібків як критерію стабільності переплетення.

Для досягнення мети дослідження було проведено двофакторний експеримент. Як функцію відгуку прийнято значення функції необхідної подачі нитки за умови якісно сформованих стібків. Для побудови простої адекватної математичної моделі функцію відгука шукаєм у вигляді полінома першого ступеня [186, 183].

Виходячи з умов зшивання матеріалів та встановленого впливу товщини матеріалу на зменшення довжини стібка, визначено область допустимих значень довжини стібка в межах $6,8 \leq t \leq 7,4$ мм при товщині матеріалу $0,4 \leq m \leq 8$ мм. З урахуванням цього встановлено рівні та інтервали варіації факторних ознак t (довжина стібка) та m (товщина матеріалу), що наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Керуючі фактори

Керуючі фактори	Рівні варіювання		
	-1	0	1
x1 - довжина стібка, t, мм	6,8	7,1	7,4
x2 - товщина матеріалів, m, мм	0,4	4,2	8

При ймовірності 0,95 необхідна кількість спостережень дорівнює $N=10$. Матриця планування та робоча матриця повного факторного експеримента з ефектом взаємодії приведена в таблиці 3.8. В відповідності з планом експеримента кожен дослід повторюється 10 разів в послідовності, яка встановлена за допомоги таблиці випадкових чисел.

Таблиця 3.8

Планування експерименту

Дослід	Послідовність виконання дослідів	Матриця планування				Робоча матриця	
		x0	x1	x2	x1x2	t, мм	m, мм
1	19, 11, 23, 39, 30, 33, 17, 22, 10, 16	+	-	-	+	6,8	0.4
2	22, 35, 33, 36, 12, 9, 18, 20, 21, 1	+	+	-	-	7,4	0.4
3	9, 15, 19, 21, 11, 20, 24, 3, 25, 6	+	-	+	-	6,8	8
4	15, 23, 1, 36, 10, 5, 28, 21, 34, 27	+	+	+	+	7,4	8

3.6.3 Опис експериментальної установки

У процесі проведення експериментальних досліджень використовувалася швейна машина ланцюгового стібка типу 101 GK9-2. Контроль зусилля натягу нитки здійснювався за допомогою приладу ELTENS, а для визначення величини необхідної подачі нитки застосовувалися вимірювальні засоби та алгоритми, описані в підрозділі 3.1 та 3.5.

3.6.4 Послідовність проведення експерименту

У якості досліджуваного матеріалу під час експерименту використовувався тарний картон TLW виробництва ПАТ «Обухів». Експериментальна програма була спрямована на визначення дійсних значень величини подачі нитки залежно від факторів x1 (довжина стібка) та x2 (товщина матеріалу) у визначені моменти процесу формування стібка.

Зразки строчок формувалися на картоні відповідно до вимог стандарту (ДСТУ [184]). Мінімальна товщина досліджуваного матеріалу становила $m=0,4$ мм, максимальна - $m=8$ мм. Згідно з планом експерименту, у кожному

досліді при заданих рівнях t (довжина стібка) та m (товщина матеріалу) виконували серію строчок, що склалися з 10 стібків.

Для забезпечення належної якості утворення стібків контроль за зусиллям натягу нитки здійснювався за допомогою регулятора натягу, орієнтуючись на значення зусилля F_u , визначені в підрозділі 3.5. Із підвищенням товщини матеріалу значення натягу відповідно коригувалися. Візуальна оцінка якості строчки проводилася на предмет наявності дефектів - слабких петель або перетягування нитки. Зафіксовані порушення усувалися шляхом уточнення параметрів натягу в межах встановленого діапазону (табл. 3.7).

Структура отриманих стібків аналізувалася відповідно до положень ДСТУ [60], зокрема - за положенням характерних елементів однопіткового ланцюгового стібка типу 101. У разі появи перших ознак порушення структури (деформація петлі, зсув у вузлах з'єднання тощо) подальше збільшення зусилля натягу нитки зупинялось.

Значення фактора x_1 (довжина стібка t) визначалося шляхом прямого вимірювання фактичної відстані між N послідовними проколами голки за допомогою штангенциркуля з точністю до 0,01 мм. Після вимірювання довжини строчки з N -стібків (з 10 стібків), середнє значення довжини стібка визначалась за виразом:

$$t_{\text{сеп.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} t}{N}.$$

Оброблені результати дозволяли з високою точністю визначити середню довжину одного стібка. Такий підхід забезпечував зниження похибки вимірювань, спричиненої механічними та візуальними відхиленнями під час оцінювання довжини окремих стібків.

Використання щільного картону як матеріалу зразка (рис. 3.16) забезпечувало стабільність переміщення заготовки під час шиття, що дозволяло уникнути ефектів посадки або стягування строчки, а також покращувало достовірність результатів вимірювання.

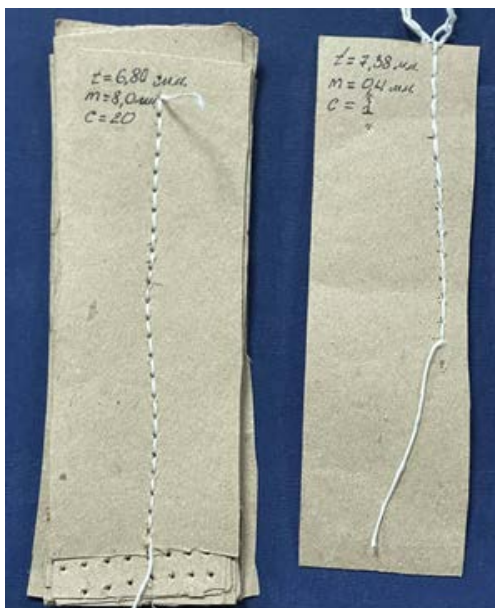


Рис. 3.16 Приклад зразків з різними параметрами

3.6.5 Побудова моделі поверхні відгуку градієнта необхідної подачі

Для аналізу впливу технологічних параметрів на величину необхідної подачі нитки у процесі формування однопниткового ланцюгового стібка типу 101 було здійснено двофакторний експеримент, у якому в якості варійованих факторів обрано довжину стібка t та товщину зшивного матеріалу m .

Для двох факторів рівняння регресії має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

де:

y -відгук (залежна змінна),

x_1, x_2 -фактори(незалежні змінні),

b_0, b_1, b_2, b_{12} -коефіцієнти регресії.

Коефіцієнти знаходять за формулою:

$$B = (x^t x)^{-1} x^t y$$

де:

x -матриця плану експерименту (без стовпця y),

y -вектор відгуків.

Формули для вручну (метод кодованих рівнів).

Коефіцієнти можна знайти як середнє значення відповідних комбінацій у:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum y_i, b_1 = \frac{1}{N} \sum y_i x_{1i}, b_2 = \frac{1}{N} \sum y_i x_{2i}, b_{12} = \frac{1}{N} \sum y_i x_{1i} x_{2i}$$

де N - кількість експериментів.

Значущість коефіцієнтів регресійної моделі перевіряли за допомогою t -критерію Стьюдента:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}}$$

де S_{b_i} - стандартна похибка коефіцієнта.

Якщо $|t_i| > t_{kp}$, коефіцієнт значущий.

3.6.5 Перехід від кодованих змінних до натуральних величин

Щоб інтерпретувати рівняння регресії в реальних (натуральних) одиницях вимірювання, потрібно виконати заміну кодованих факторів x_1, x_2 на їхні відповідні значення у фізичних одиницях.

Визначення лінійної трансформації.

Якщо фактори x_1, x_2 були закодовані за формулою:

$$x_i = \frac{x_i - x_{icer}}{\Delta_{x_i}}$$

де:

x_i -значення фактора в натуральних одиницях,

x_{icer} -середнє значення рівнів фактора (центральна точка),

$\Delta_{x_i} = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$ - нормувальна константа (варіаційний інтервал),

Зворотнє перетворення:

$$x_i = x_i \Delta_{x_i} + x_{icer}$$

3.6.6 Побудова рівняння регресії в натуральних змінних

При підстановці у рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

отримаємо:

$$Y = b_0 + b_1 \frac{x_1 - x_{1сер}}{\Delta_{x_1}} + b_2 \frac{x_2 - x_{2сер}}{\Delta_{x_2}} + b_{12} \left(\frac{x_1 - x_{1сер}}{\Delta_{x_1}} \cdot \frac{x_2 - x_{2сер}}{\Delta_{x_2}} \right)$$

Розкриваючи дужки та групуємо члени, отримаємо рівняння в натуральних змінних:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2$$

$$P'(t, m) = a_0 + a_1t + a_2m + a_{12}tm \quad (3.6)$$

де нові коефіцієнти обчислюються за формулами:

$$a_0 = b_0 - b_1 \frac{x_{1сер}}{\Delta_{x_1}} - b_2 \frac{x_{1сер}}{\Delta_{x_2}} + b_{12} \frac{x_{1сер}x_{1сер}}{\Delta_{x_1}\Delta_{x_2}}$$

$$a_1 = \frac{b_1}{\Delta_{x_1}}, a_2 = \frac{b_2}{\Delta_{x_2}}, a_{12} = \frac{b_{12}}{\Delta_{x_1}\Delta_{x_2}}$$

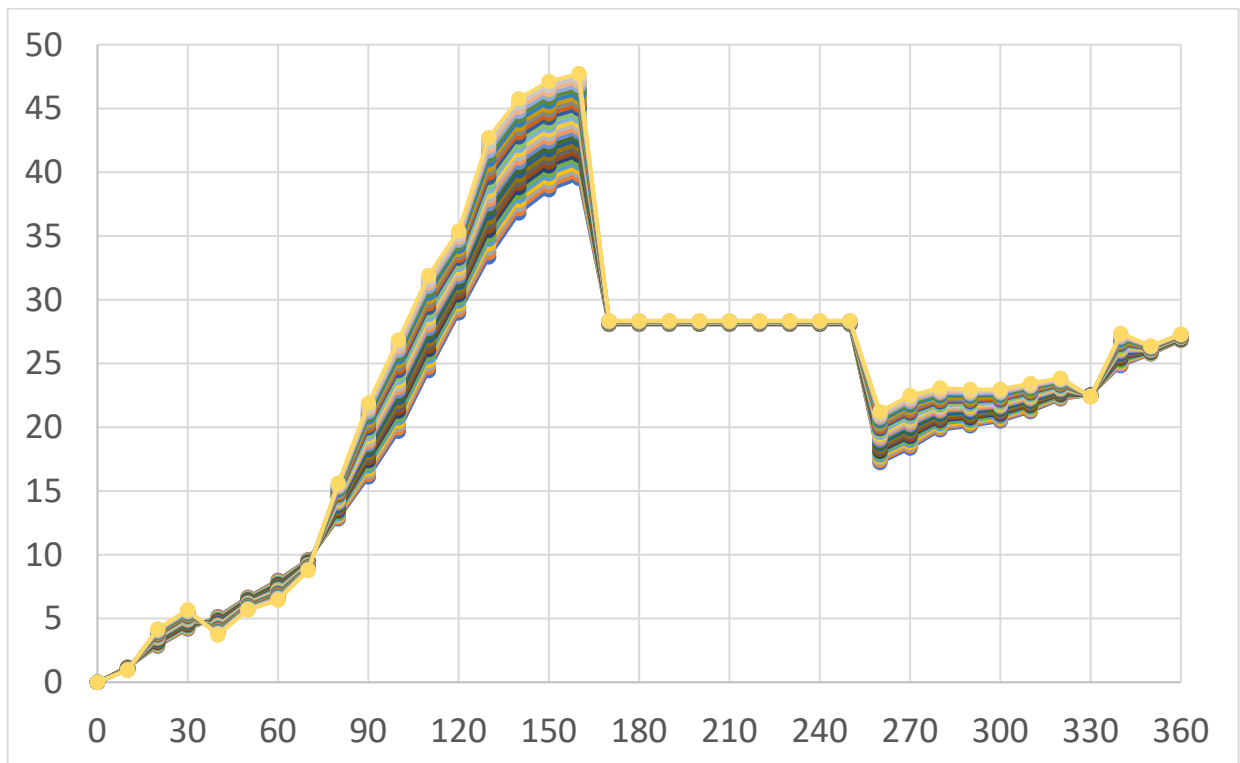


Рис. 3.17 Поверхня відгуку значень функції необхідної подачі нитки в залежності від технологічних параметрів стібка

3.6.7 Визначення впливу параметрів на рівняння регресії

У ході дослідження були проаналізовані коефіцієнти рівняння регресії другого порядку для функції подачі нитки, побудованого в натуральних змінних за результатами двофакторного експерименту. Рівняння має вигляд:

Частинна похідна за x_1 :

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = a_1 + a_{12}x_2, \quad (3.6)$$

Показує, як змінюється y при зміні x_1 , коли x_2 залишається сталим.

Частинна похідна за x_2 :

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = a_2 + a_{12}x_1, \quad (3.7)$$

Показує вплив x_2 на y при сталому x_1 .

Градiєнт максимуму функції:

$$\nabla P \left(\frac{\partial P}{\partial \varphi}, \frac{\partial P}{\partial t}, \frac{\partial P}{\partial m} \right) = (a_1 + a_{12} \cdot m, \quad a_2 + a_{12} \cdot t) \quad (3.8)$$

За виразами (3.6) та (3.7) для кожного значення кута повороту головного вала було розраховано частинні похідні функції відгуку.

Норму градієнта видначали за виразом:

$$\|\nabla_y\| = \sqrt{(a_1 + a_{12}x_2)^2 + (a_2 + a_{12}x_1)^2} \quad (3.9)$$

Для оцінювання вагомості впливу факторів застосовано аналіз абсолютних значень частинних похідних у центрі плану ($x_1=x_2=0$), а також побудовано діаграми домінування (3.18). Результати порівняння наведені в Додатку Е.

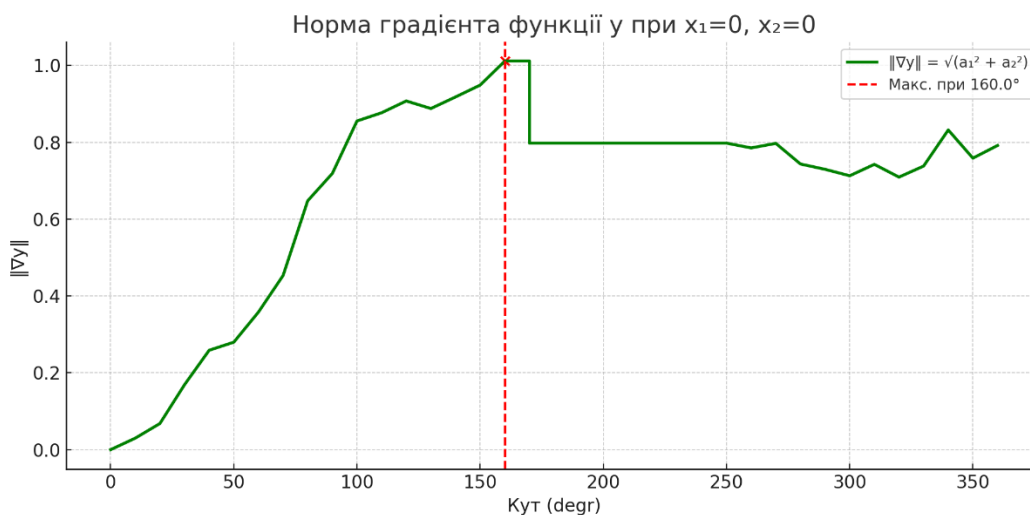


Рис. 3.18 Норма градієнта функції Y при $X_1=0, X_2=0$

На основі отриманих результатів зроблено такі висновки:

1. Фактор x_1 (технологічний параметр -t) має домінуючий вплив у діапазонах: від 10° до 60° та від 320° до 360° , у решті інтервалу (70° - 310°) переважає вплив фактора x_2 (технологічний параметр -m). Це пояснюється наявністю тільки
2. Коефіцієнт взаємодії a_{12} : має низьке середнє абсолютне значення $|\bar{a}_{12}| \approx 0,035$ лише у 31,6% точок його значення перевищує пороговий рівень 0,050- при цьому, відносна зміна норми градієнта через a_{12} становить від -3% до +20%, що вказує на помірний, але локально важливий вплив.
3. Максимум модуля градієнта досягається при куті 160° , що відповідає найбільшій чутливості функції подачі нитки до змін обох факторів.
4. При моделюванні функції відгуку, виключення коефіцієнта взаємодії a_{12} не змінює структури домінування факторів, однак призводить до втрати локальної точності, особливо в зонах, де a_{12} є істотною, зважаючи, на те що параметр довжини стібка в цілому в технологічному процесі армування є сталою величиною або вплив його зміни не значний цим коефіцієнтом можна знехтувати.
5. Таким чином, у загальному вигляді модель без взаємодії може бути використана для спрощеного аналізу, проте для високоточних обчислень та

оптимізації налаштувань подачі нитки доцільно враховувати член $a_{12}x_1x_2$, особливо у перехідних ділянках (ділянки зростання або зменшення градієнта).

3.7 Розроблення типової синхрограми швейної машини ланцюгового стібка типу 101 з просторовою траєкторією розширювача

Синхрограма робочих органів машини GK-9-2 ланцюгового стібка типу 101, що враховує мінімальні і максимальні технологічні параметри машини та, наведена на рис. 3.19. Моменти взаємодії робочих органів голки з розширювачем у процесі захоплення «петлі-напуску» та «заколу» відповідно позначені на ній точками А та В. За початкове положення голки на синхрограмі прийнято її верхнє крайнє положення (рис. 3.19). З метою оцінки точності отриманих значень функцій положення робочих органів визначено кутові положення головного вала машини при параметрах як аналітичним шляхом - за поліноміальними функціями (табл. 3.2, 3.3), так і графічно - за побудованою синхрограмою. Отримані значення порівнюються з метою верифікації застосованих методів.

Розрахункове значення параметрів взаємодії робочих органів визначено за виразами (2.15-2.23) з урахуванням товщини матеріалу $m_{1,2}$, а також конструктивних параметрів машини табл. 3.9 та голки ф. Raly, модель GK9, №230 -мм [142, 143].

Таблиця 3.9

e	a	b	h	c	$\delta_{1,2,3}$	Δ	d
MM							
4	2	4	8	4	0,1	7	2,3

Параметри $S_{m1,2}$, $S_{1,2}$, $S_{A,B}$, $L_{A,B}$, $Z_{A,B}$, та величини ходів S_x , L_x , Z_x , $T_{x1,2}$ робочих органів синхрограми визначено на основі геометричних характеристик

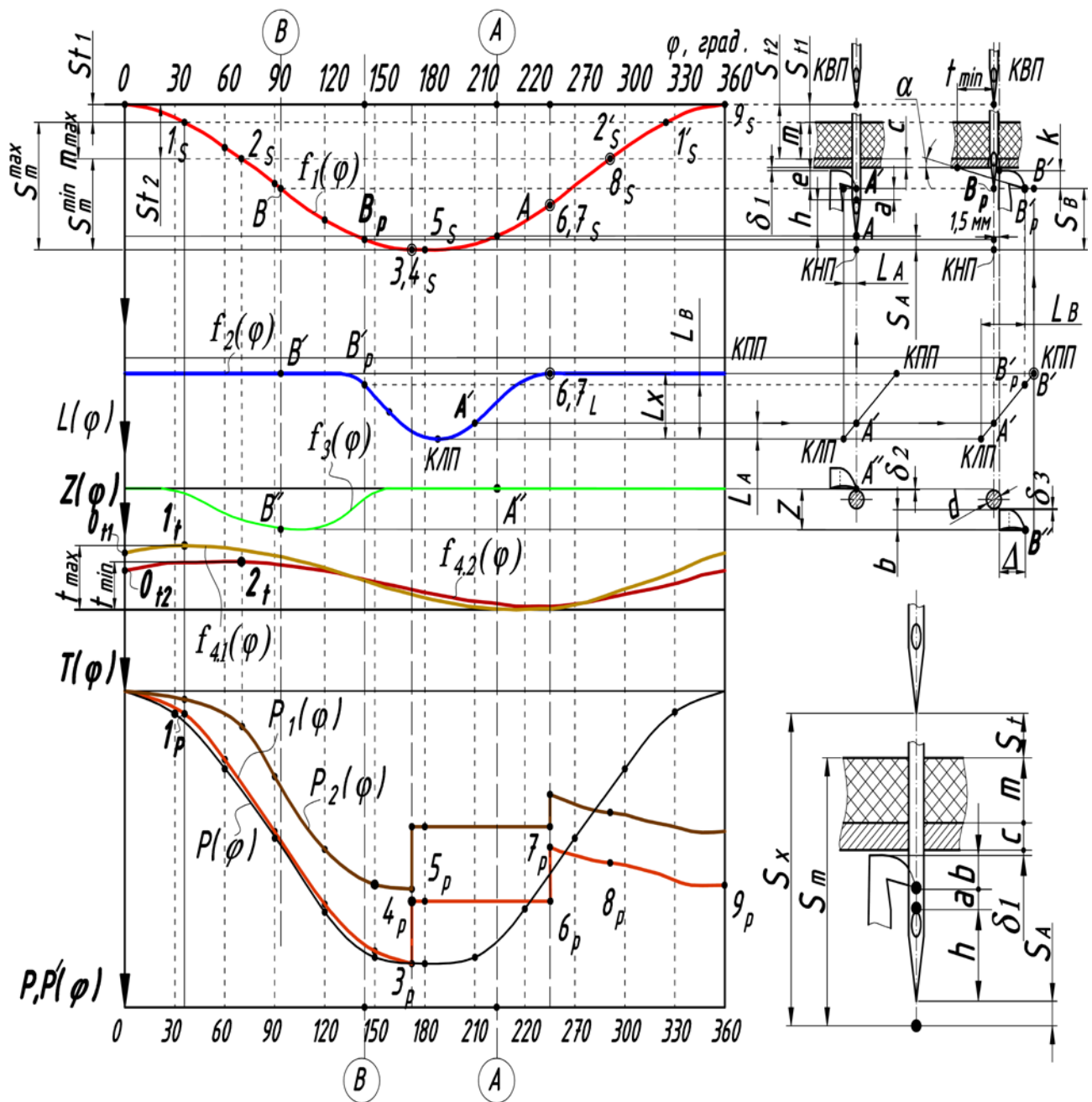


Рис. 3.19 Синхрограма робочих органів швейної машини GK-9-2 ланцюгового стібка типу 101 з коливним розширювачем

швейної машини, її налаштувань, а також за розрахунками (2.15-2.23), відповідні дані узагальнено в таблиці 3.10.

Аналітичне обчислення поліноміальних моделей (табл. 4 функцій положення головного вала виконано з використанням чисельного методу в середовищі Microsoft Excel (інструмент Solver) з допустимим відхиленням $\varepsilon=10^{-6}$. Така точність гарантує стійкість та збіжність обчислювального процесу в межах вимог до розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь в інженерних цілях.

Результати обрахунків (моменти процесу утворення стібка: $\varphi_{1,2}$, $\varphi_{A,B}$, $\varphi_{A,B}$, $\varphi_{A,B}$) отримані обома методами, занесено до таблиці 3.10 з метою їхнього зіставлення та оцінки точності апроксимаційних моделей функцій положення робочих органів.

Таблиця 3.10

Значення параметрів взаємодії робочих органів та величини їхніх ходів

Розрахункові параметри, мм	S_1	S_2	S_A	S_B	L_A	L_B	Z_{AB}	S_X	L_X	Z_X	T_1	T_2
	4,0	12,0	3,0	17,0	3,5	11,0	6,5	32,13	14,5	6,67	7,5	5
Кутові параметри, град.	φ_1	φ_2	φ_A	φ_B	φ_A	φ_B	φ_B	φ_{max}			φ_1	φ_2
Графічно	36,1°	68,5	219,3°	84,5°	220°	144,2°	150	180°	189,2°	150	3,67	2,249
	323,9	291,5									3,89	-2,83
Аналітично	37,1°	70,2°	221,6°	84,6°	221,3°	144,8°	146,6	181,1°	189,6°	146,6	3,45	2,2
	323,9	291,5									- 3,71	-2,83
Відхилення, %	2,9	2,48	1,0	0,11	0,56	0,44	2,42	0,71	0	2,42	0,22	1,8
	0	0,03									0,17	0

Аналіз моментів взаємодії у точках А і В та переміщення голки в матеріалі $S_{m1,2}$ при утворенні стібка типу 101 за різних параметрів m і t дозволив оцінити функціональні характеристики машини GK-9-2.

Отримані результати підтверджують доцільність використання поліноміальних моделей 6-го порядку для опису функцій положення робочих органів швейної машини типу GK-9-2. Високі значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 = 0,998 \div 0,9999$) свідчать про точність апроксимації, що дозволяє вважати побудовані моделі придатними для аналітичного моделювання процесу утворення стібка.

Порівняння аналітичних і графічних методів визначення ключових моментів процесу формування стібка - таких як початок і кінець транспортування матеріалу (φ_1 , φ_2), момент «заколу» (φ_A) та захоплення «петлі-напуску» (φ_B) - показало відхилення в межах $0,1^\circ$ - $2,9^\circ$, що є прийнятним у рамках інженерної точності. Найбільше відхилення ($2,9\%$) спостерігається у визначенні кута φ_1 , однак і воно не перевищує $\pm 1,1^\circ$ у абсолютному значенні, що підтверджує високу узгодженість обох підходів.

В цей же час аналіз функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ (рис. 3) подачі нитки виявив суттєві розбіжності між їхніми значеннями при змінних технологічних параметрах. Зокрема, при мінімальних значеннях товщини матеріалу та довжини стібка дійсна подача нитки перевищує необхідну на $64,4\%$ ($52,6$ мм проти 32 мм), що може призводити до ослаблення стібка. Натомість при максимальних значеннях - дійсна подача менша за необхідну на $6,2\%$, що підвищує ймовірність пропуску стібків. Така невідповідність обумовлена обмеженнями конструкції механізму подачі нитки повзунного типу (мод. 1.1.1.3) [179], у якому не передбачено регулювання закону та величини подачі нитки.

Крім того, на стабільність подачі нитки впливають її фізико-механічні властивості, зокрема жорсткість, коефіцієнт тертя й деформаційна здатність, а також динамічні явища, що виникають під час роботи.

Отримані результати підкреслюють доцільність удосконалення як конструкції механізму подачі нитки - шляхом реалізації дискретного або адаптивного регулювання, - так і аналітичної моделі функції $P'(\varphi)$, яка має враховувати реальні умови експлуатації швейної машини для забезпечення якісного формування стібка в широкому діапазоні технологічних параметрів.

Важливо зазначити, що побудовані функції положення робочих органів дозволили визначити не лише моменти їх взаємодії, а й величини їхніх ходів для різних комбінацій товщини матеріалів (m) і довжини стібка (t). Таким чином, сформовані моделі можуть бути застосовані як основа для побудови адаптивних систем подачі нитки з урахуванням змін технологічних параметрів. Це відкриває перспективи вдосконалення існуючих механізмів, а також розробки нових типів

машин, здатних забезпечувати стабільну якість стібків при зшиванні багатошарових текстильних матеріалів.

3.8 Висновки до розділу 3

У розділі представлено результати аналітичного й експериментального дослідження механізмів швейної машини типу GK-9-2 при утворенні одониткового ланцюгового стібка 101. Побудовано функції положення усіх робочих органів $S(\varphi)$, $L(\varphi)$, $Z(\varphi)$, $T_u(\varphi)$, $T(\varphi)$ та функції дійсної й необхідної подачі нитки $P(\varphi)$, $P'(\varphi)$, які подано у вигляді синхрограми. Зокрема, проаналізовано положення ниткоподавача $T_u(\varphi)$, дійсну подачу нитки $P(\varphi)$ та необхідну подачу $P'(\varphi)$, що дозволило оцінити функціональні характеристики роботи механізму подачі ниток в процесі утворення одного стібка.

1. Побудовано аналітичні залежності функцій положення ниткоподавача $T_u(\varphi)$ та функцій дійсної $P(\varphi)$ і необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки. Виявлено перевищення дійсної подачі над необхідною на 6,2-64,4 %, що спричиняє нестабільність утворення стібка. Надлишок нитки формує надмірний напуск, який може призводити до послаблення затягування петлі, скидання попередньої петлі та зниження якості шва. Максимальне перевищення зафіксовано при $m = 0,4$ мм, $t = 8$ мм - $P = 53,3$ мм проти необхідних ≈ 30 мм.

2. Для опису функцій подачі нитки при різних технологічних режимах побудовано поліноміальні моделі 3-6-го порядку з високим рівнем апроксимації ($R^2 \geq 0,99$), які придатні для CAD/CAE-аналізу та подальшого використання у синтезі механізмів.

3. Експериментальні дослідження натягу нитки показали, що збільшення товщини матеріалу у 20 разів спричиняє зростання натягу у 5 разів (до 6,2 Н).

4. У межах двофакторного регресійного аналізу встановлено, що x_1 (довжина стібка) має домінуючий вплив у межах 10° - 60° та 320° - 360° , тоді як x_2 (товщина матеріалу) - у діапазоні 70° - 310° . Оскільки x_1 зазвичай є сталою величиною в умовах зшивання, його значення потрібно враховувати на початку

налаштування механізму подачі нитки. Вплив коефіцієнта взаємодії a_{12} проявляється лише у 31,6 % точок, де його значення перевищує пороговий рівень 0,05 - цей поріг обрано як типовий критерій значущості у регресійному аналізі. Тому член взаємодії може бути виключений із спрощених моделей без суттєвої втрати точності, за винятком ділянок із локальним уточненням.

5. Максимум модуля градієнта спостерігається при $\varphi = 170^\circ$, що відповідає найбільшій чутливості подачі нитки до змін факторів. Це пов'язано з моментом скидання попередньої петлі та її миттєвим скороченням, що супроводжується зміною напрямку подачі нитки. В реальному процесі скорочення скинутої петлі розтягнуте в часі, тому значення цього параметру не впливає стабільності процесу утворення стібка.

6. Побудовано типову узагальнену синхрограму механізмів швейної машини типу GK-9-2, яка описує функції положення робочих органів та їх взаємодію. Проаналізовано апроксимовані функції $S(\varphi)$, $L(\varphi)$, $Z(\varphi)$, $T_u(\varphi)$, що дозволило визначити узгодженість фаз, оцінити величини переміщень і встановити потенційні інтервали нестабільної роботи машини при змінних технологічних параметрах.

7. Порівняння аналітичних і графічних методів визначення ключових моментів формування стібка - таких як початок і кінець транспортування матеріалу (φ_1 , φ_2), момент «заколу» (φ_A) та захоплення «петлі-напуску» (φ_B) - показало відхилення в межах $0,1^\circ$ - $2,9^\circ$, що є прийнятним у рамках інженерної точності. Графічні методи базувалися на обробці експериментальних даних за допомогою програмного аналізу, що забезпечило об'єктивне зіставлення з аналітичними розрахунками. Це підтверджує високу узгодженість побудованої синхрограми з фактичними даними.

Отримані результати підтверджують ефективність побудованих моделей для оцінювання кінематики робочих органів швейної машини загалом і створюють підґрунтя для подальшого проєктування нового механізму з автоматизованою подачею нитки, здатного забезпечити стабільну якість стібка при змінних технологічних параметрах.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ І АНАЛІЗ НОВИХ МЕХАНІЗМІВ ПОДАЧІ ГОЛКОВОЇ НИТКИ

4.1 Розробка структури нових механізмів подачі нитки

Проведені дослідження [162] показали, що механізми подачі нитки з розгалуженими кінематичними ланцюгами точніше відтворюють необхідний закон подачі завдяки більшій кількості регульованих параметрів та ниткоподавачів. Метою цього розділу є розробка раціональних структур МПН з урахуванням як функціональності, так і динаміки, зосереджуючись на проектуванні лише однієї гілки кінематичного ланцюга, оскільки інша визначається механізмом голки. Динамічні характеристики досягаються вибором структури й конструкції ланок, а функціональні - розташуванням нитконапрямників, довжиною ниткоподавача та його початковим положенням.

Метод визначення функціональних параметрів МПН для нового механізму оснований на результатах роботи [162].

Раціональна структура з точки зору динаміки та функціональності має забезпечувати:

- Симетричний закон руху - для зменшення прискорень і сил інерції;
- Врівноваженість ланок - для зменшення впливу інерційних сил;
- Незначну масу ланок - для зменшення навантаження на механізм;
- Кінематичний зв'язок з пристроєм лапки - для забезпечення адаптивної подачі нитки під зміні технологічних параметрів стібка.

На основі зазначених вимог запропоновано два варіанти структури механізмів, кінематичні схеми яких зображено на рис. 4.1. Обидва варіанти мають кінематичні зв'язки ниткоподавачів з пристроєм притискної лапки 7 (рис. 4.1, а) передбачає передачу руху від її переміщення в результаті зміни товщини матеріалу.

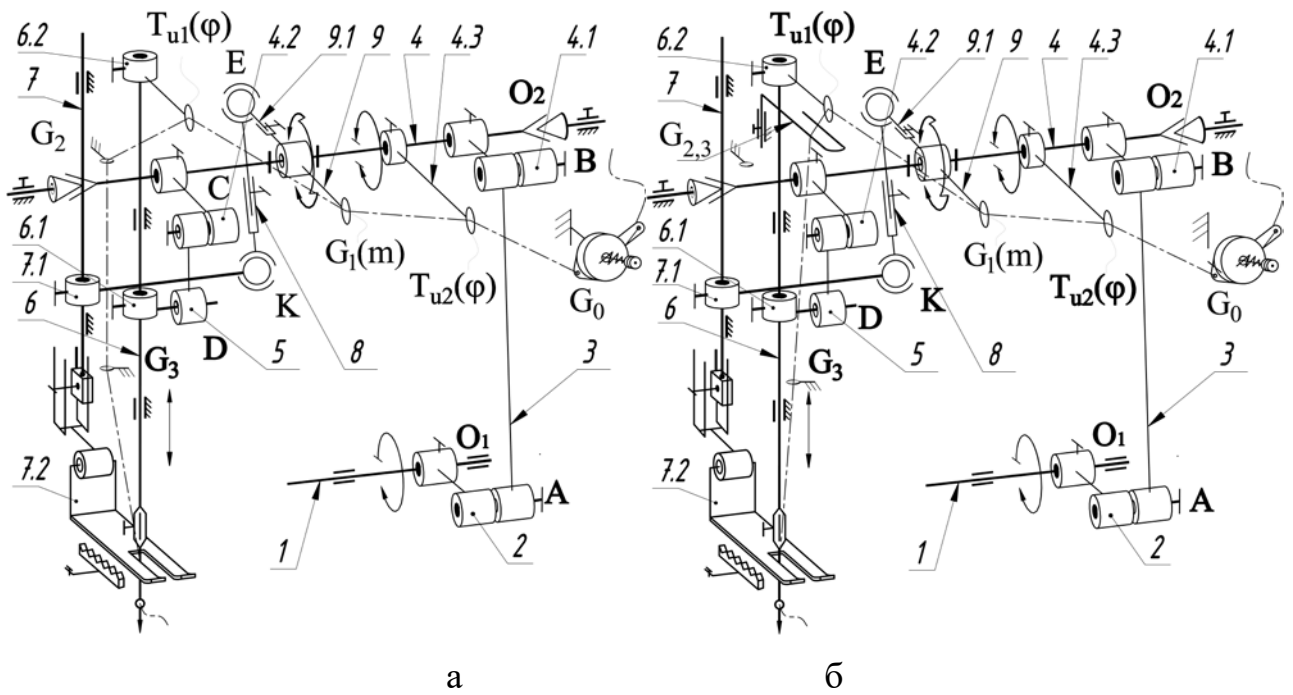


Рис. 4.1 Кінематичні схеми механізму подачі нитки з кінематичним зв'язком з пристроєм лапки: а) з однорідною системою нитконапрямників (М1); б) з не однорідною системою нитконапрямників (М2)

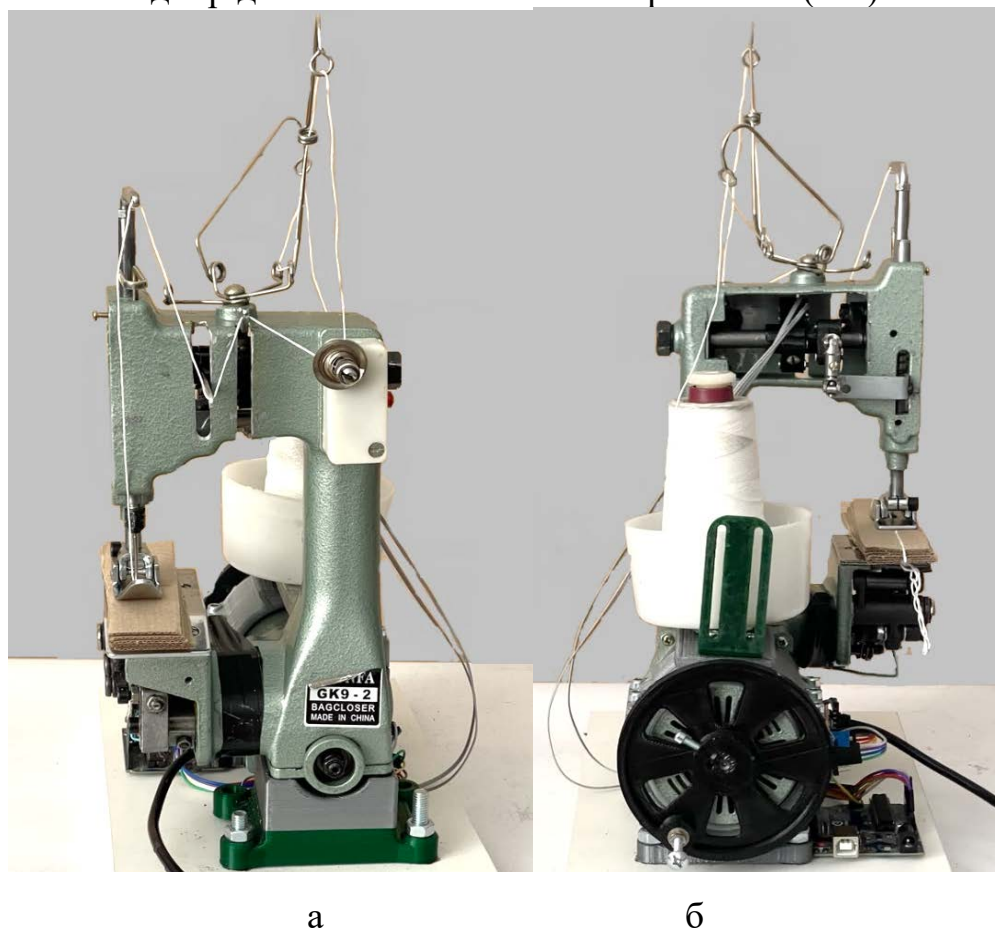


Рис. 4.2 Конструкція механізму подачі нитки з кінематичним зв'язком з пристроєм лапки з не однорідною системою нитконапрямників (М2): а) вид спереду; б) вид позаду

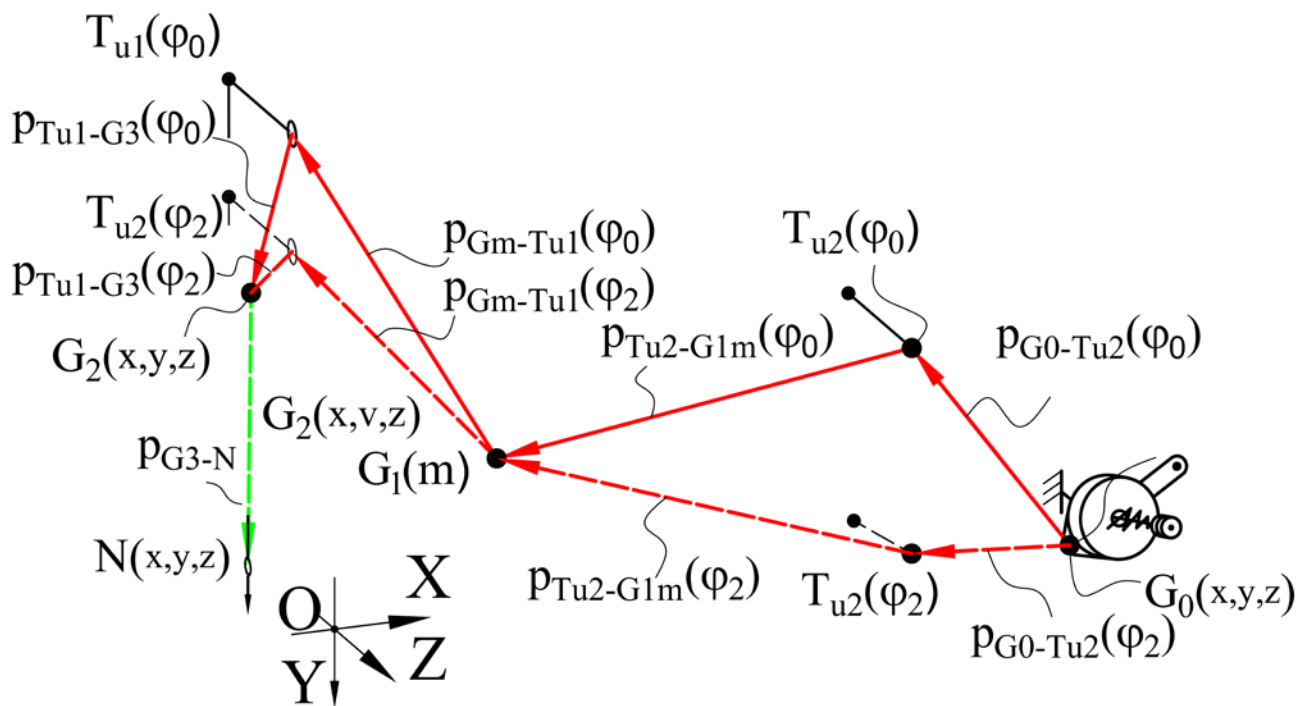
Слід зазначити, що обидва запропоновані варіанти структур механізмів мають однаковий кінематичний зв'язок ниткоподавачів $Tu_{1,2}(\varphi)$ з механізмом голки та нитконапрямника $G_1(m)$ зв'язаного кінематично з пристроєм лапки. При цьому, додатковий ниткоподавач $Tu_2(\varphi)$ закріплений з можливістю регулювання свого положення на коромислі 4. Суттєву відмінність механізмів становить це наявність додаткового нитконапрямника $G_{2,3}$, який встановлений по обидва боки ниткоподавача $Tu_1(\varphi)$. Наявність такого нитконапрямника $G_{2,3}$, як зазначено [162] забезпечує зміну закону подачі нитки в околиці КНП голки, що забезпечує додаткову стабілізацію «петлі-напуску».

Оскільки другий варіант механізму (M2) лише незначно складніший і поєднує функції обох механізмів, його обрано як об'єкт подальшого синтезу та конструювання механізму подачі голкової нитки. На базі його структури розроблений механізм подачі нитки рис. 4.2, параметри механізму отримані шляхом перебору параметрів оптимізаційного синтезу в П 4.3.

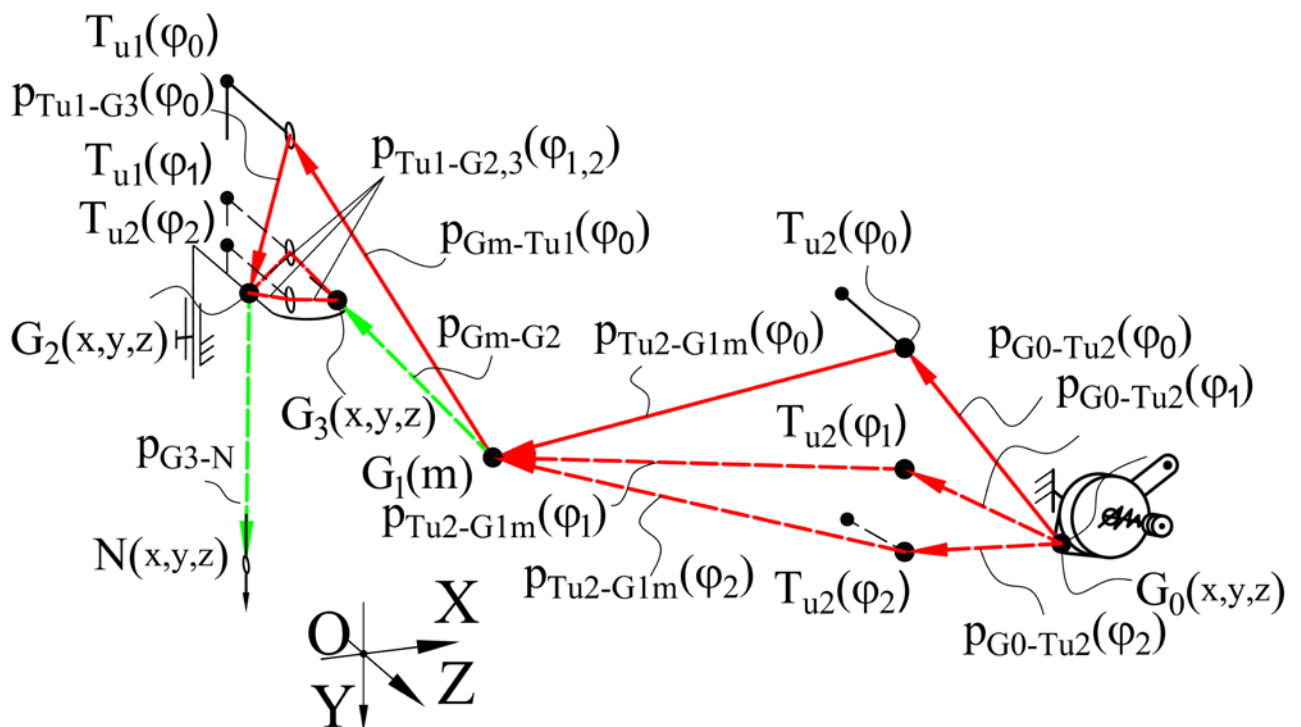
4.2 Визначення функції дійсної подачі нитки у механізмі нової конструкції та формулювання параметричних обмежень

4.2.1 Характеристика контурів подачі нитки нових механізмів

Контури подачі нитки запропонованих механізмів утворені системою нитконапрямників G_i і ниткоподавачів $Tu_i(\varphi)$ (рис. 4.3). Їх можна поділити на змінні ділянки $p_{i-i+1}(\varphi)$ і постійні ділянки p_{i-i+1} . В залежності від умови контакту ділянки контуру $p_{Tu1-G1(m)}(\varphi_1)$ з нитконапрямником G_3 формується різна їх кількість (рис. 4.3, а) при цьому $p_{Tu1-Gm}(\varphi_1)$ при деякому значенні аргументу φ_1 - φ_2 поділяється на $p_{G1-Tu1}(\varphi_1)$ та p_{Gm-G1} . У розрахунку контуру в межах утворення стібка положення нитконапрямника приймається як $G_1(m)=const$, оскільки в цей період переміщення матеріалу не відбувається, а отже, його товщина (m) залишається сталою.



a



б

Рис. 4.3 Розрахунковий контур подачі нитки: а) однорідною системою нитконаправників (M1); б) з не однорідною системою нитконаправників (M2)

Крім того, оскільки нитконапрямники і ниткоподавачі практично лежать в одній площині $XOY (\Delta z \approx 0)$, то при визначенні довжин елементарних ділянок $p_{i-i+1}(\varphi)$ та p_{i-i+1} контурів подачі $\xi_1(\varphi)$ та $\xi_2(\varphi)$ застосуємо плоску систему координат (XOY). Згідно з [161], такий підхід забезпечує спрощення розрахунків без негативного впливу на їх точність.

З аналізу контурів подачі обох типів механізмів випливає, що контур утворений точками G_0 - $Tu_2(\varphi)$ - G_m є спільним для обох конструкцій. До моменту взаємодії ділянки G_m - $Tu_1(\varphi)$ з нитконапрямником G_3 також спостерігається подібність ділянки контуру G_m - $Tu_1(\varphi)$ - G_2 . Розподіл контуру G_m - $Tu_1(\varphi)$ - G_2 , які пов'язаний зі взаємодією з нитконапрямником G_3 на нові елементи залежить від положення ниткоподавача та його координат.

Положення ниткоподавача $Tu_1(\varphi_1)$ за якого ділянка $p_{Tu_1-G_1m}(\varphi)$ контуру подачі проходить через нитконапрямник G_3 , визначається з рівняння прямої та точки на ній $T_{u1}(\varphi_1) = (x_{T_{u1}}, y_{T_{u1}}(\varphi_1))$:

$$\frac{y_{G_3} - y_{G_m}}{x_{G_3} - x_{G_m}} = \frac{y_{T_{u1}}(\varphi_1) - y_{G_m}}{x_{T_{u1}} - x_{G_m}},$$

Звідки

$$y_{T_{u1}}(\varphi_1) = y_{G_m} + \frac{x_{T_{u1}} - x_{G_m}}{x_{G_3} - x_{G_m}}(y_{G_3} - y_{G_m}), \quad (4.1)$$

Після визначення значення $y_{Tu1}(\varphi_1)$, відповідне значення аргументу φ_1 знаходиться як обернене до функції положення ниткоподавача:

$$\varphi_1 = f^{-1}(T_{u1}(\varphi_1)). \quad (4.2)$$

Логічний оператор який визначає довжину $p_{Tu1-G_2-G_1m}(\varphi)$ в залежності від умови (4.1):

$$p_{G_1m-Tu1}(\varphi) = \begin{cases} (p_{Tu1-G_2}(\varphi) + p_{G_3-G_1m}(\varphi)) & \text{if } \varphi_{1-2} \geq \varphi \geq \varphi_{2-1} \\ p_{G_1m-Tu1}(\varphi) & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4.3)$$

де φ_{1-2} , φ_{1-2} - фазові кути повороту головного валу за яких відбувається

контакти нитки з нитконапрямником G_2 ;

φ_2 - крайнє нижнє положення ниткоподавача Tu_1 .

4.2.2 Аналітичне визначення функції дійсної подачі нитки механізмів подачі нитки запропонованої конструкції

Функцію дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ згідно (2.24, 2.26) представимо, як суму подач двох контурів $P_1(\varphi)$ ($G_m-Tu_1(\varphi)-G_2$) та $P_2(\varphi)$ ($G_0-Tu_2(\varphi)-G_m$):

$$P(\varphi) = P_1(\varphi) + P_2(\varphi). \quad (4.4)$$

Величина кожної функції $P_1(\varphi)$ та $P_2(\varphi)$ визначається як приріст відповідних контурів подачі $\xi_1(\varphi)$ та $\xi_2(\varphi)$. При цьому контур $\xi_1(\varphi)$ залежить від умови (4.1), а враховуючи, що ділянка контуру $p_{G_2-N} = \text{const}$ її значення при визначенні функцію подачі $P_1(\varphi)$ не враховуємо. Кожний контур представлено як суму вільних векторів, побудованих між відповідними нитконапрямниками G_0 , G_{1m} , G_2 , G_3 та ниткоподавачами $Tu_1(\varphi)$, $Tu_2(\varphi)$:

За умови $G_3 \notin p_{G_m-Tu_1}(\varphi)$ довжина контуру $\xi_1(\varphi)$:

$$\xi_1(\varphi) = p_{Tu_1-G_3}(\varphi) + p_{G_m-Tu_1}(\varphi), \quad (4.5)$$

За умови $G_3 \in p_{G_m-Tu_1}(\varphi)$ довжини контуру $\xi_1'(\varphi)$:

$$\xi_1'(\varphi) = 2p_{Tu_1-G_2}(\varphi) + p_{G_m-G_3}, \quad (4.6)$$

$$\xi_2(\varphi) = p_{G_0-Tu_2}(\varphi) + p_{Tu_2-G_m}(\varphi), \quad (4.7)$$

При визначенні початкової довжини контуру при $\varphi_0=0^\circ$ застосовані залежності (2.26) та (2.28)[161].

4.2.3 Аналітичне визначення функцій положення ниткоподавачів

Кут повороту коромисла O_2Tu_2 - $\psi(\varphi)$ як функцію від аргумента φ визначимо на основі геометричних співвідношень, отриманих із розрахункової схеми, поданої на (рис. 4.4, а) її векторної схеми (рис. 4.4, б) та виразу (2.33):

$$\psi(\varphi) = \arcsin \frac{-A_1 A_2 + A_1 \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - A_3^2}}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (4.8)$$

Як функція положення координат вічка ниткоподавача T_{u2} в параметричній формі має вид:

$$\begin{aligned} z_{T_{u2}}(\varphi) &= l_{O_2T_{u2}} \cdot \cos(\psi(\varphi) - \psi(\varphi_0) + \alpha_0), \\ y_{T_{u2}}(\varphi) &= l_{O_2T_{u2}} \cdot \sin(\psi(\varphi) - \psi(\varphi_0) + \alpha_0), \end{aligned} \quad (4.9)$$

де $\psi(\varphi_0)$ - значення функції $\psi(\varphi)$ при значенні аргументу $\varphi=0^\circ$.

α_0 - кут який встановлює положення ниткоподавача відносно осі абсцис.

Функція положень ниткоподавача Tu_1 визначається (2.32), як функція положення голки з урахуванням параметрів механізму голки базової конструкції табл. 3.6.

Окрім наведених залежностей, які визначають функції положення ниткоподавачів $Tu_{1,2}(\varphi)$ та голки $S(\varphi)$ для дослідження впливу нитконапрямників G_m , $G_{1,2}$ на функцію дійсної подачі нитки визначено за допомогою методу векторного аналізу (Додаток А2).

Відповідно положення кривошипа O_1A (рис. 4.4, б) плоского кінематичного ланцюгу (рис. 4.4, а, з кінематичними парами: O_1 , A , B , O_2 , C , D), де ведені ланки - ниткоподавач Tu_1 та Tu_2 , визначається кутом $\varphi_{1,2}$ [160, 161]. Радіус-вектори кінематичних пар: P_{O_1} , P_A , P_B , P_{O_2} . Радіуси-векторів вічка ниткоподавачів Tu_1 та Tu_2 позначено, відповідно як P_6 та P_7 . Відповідно ланки механізму (рис. 4.4, б) з урахуванням напрямку в позначенні вектору: кривошип

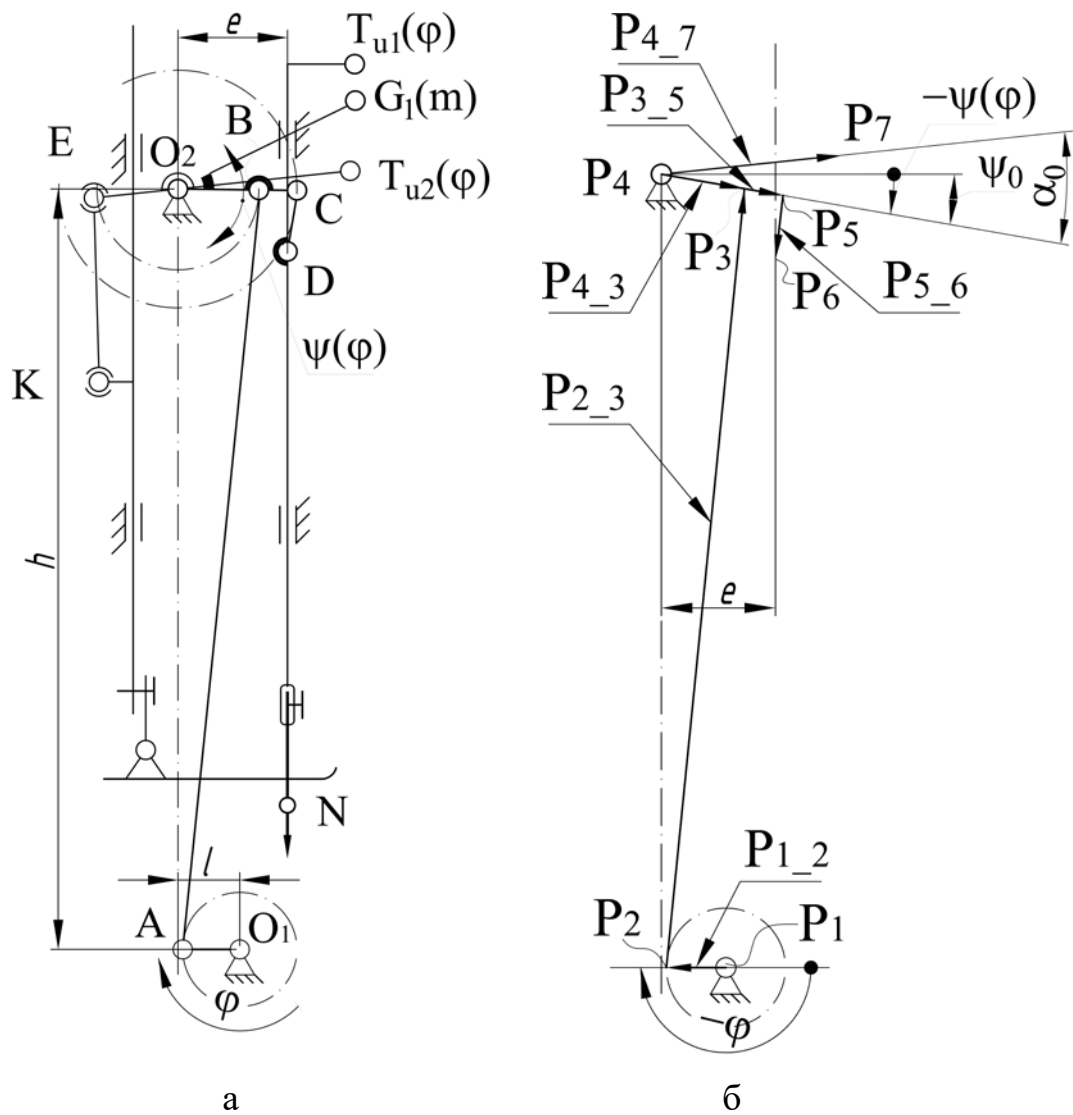


Рис. 4.4 Розрахункова схема функції положення ниткоподавачів T_{u1} та T_{u2} :

а) кінематична; б) векторна

O_1A - P_{1-2} , шатун AB - P_{2-3} , коромисло O_2B - P_{4-3} , інше його плече O_2C - P_{4-5} , шатун CD - P_{5-6} та ниткоподавач O_2T_{u2} P_{4-7} . Довжини (або модулі) вказаних векторів позначено як l_{i-j} .

4.2.4 Дослідження впливу параметрів нитконапрямників на функцію дійсної подачі нитки

Для визначення характеру впливу координат нитконапрямників y_{G1m} , $y_{G2,3}$ (рис. 4.5, 4.6) обох запропонованих структур механізмів (М1) та (М2) визначимо їх вплив з застосуванням методів [160, 161] та отриманих залежностей в П4.2.-4.3.

Параметри варіювання нитконапрямників наведені в таблиці 4.1. За початок координат нитконапрямників G_2, G_3 прийнято КНП ниткоподавача $Tu1$, а початкове положення нитконапрямника G_{1m} прийнято з конструктивних міркувань та можливості вписати в корпус машини його положення $G1m(40, 30)$.

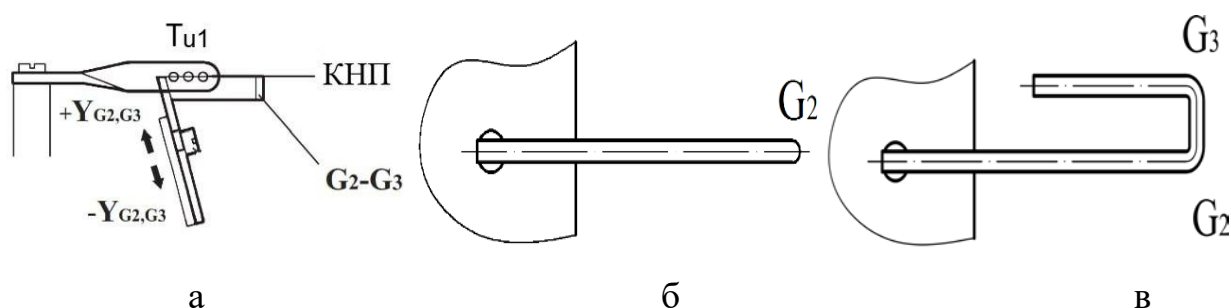
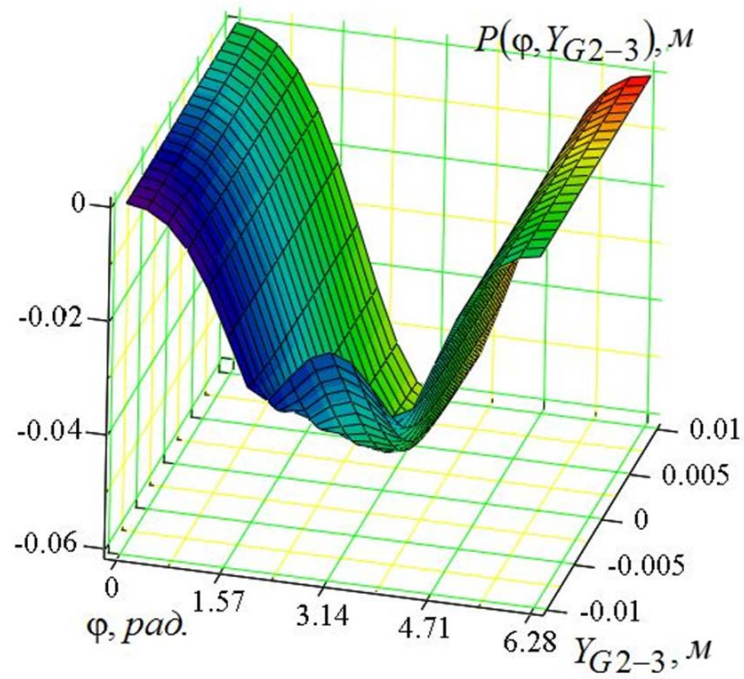


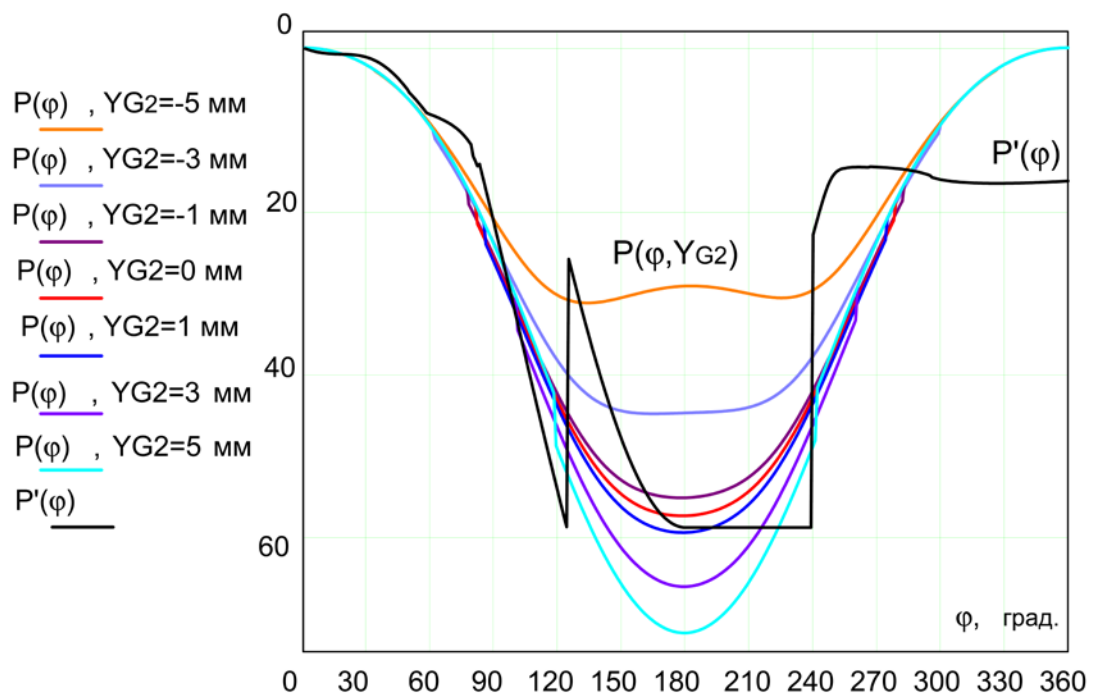
Рис. 4.5 Характеристика нитконапрямників: а) - положення нитконапрямників $\pm Y_{G2,G3}$, б) – «I» подібний нитконапрямник G_2 , в) – «U» подібний нитконапрямник G_2, G_3

Таблиця 4.1
Параметри варіювання положенням нитконапрямників

Найменування	Початкова координат	Діапазон	крок
y_{G2}	0	± 20	5
y_{G2-3}	0	± 5	1; 2
y_{G1m}	40	± 10	2,5

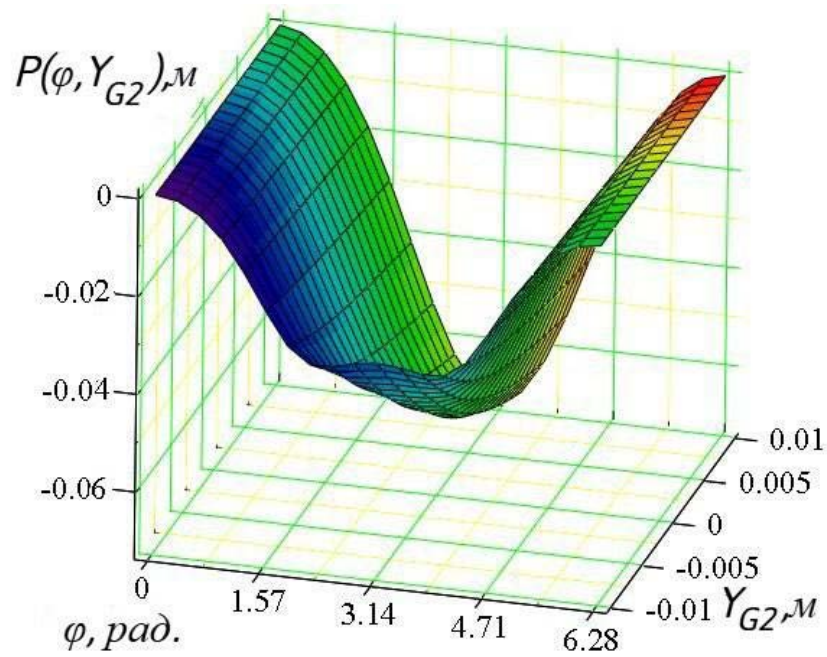


а

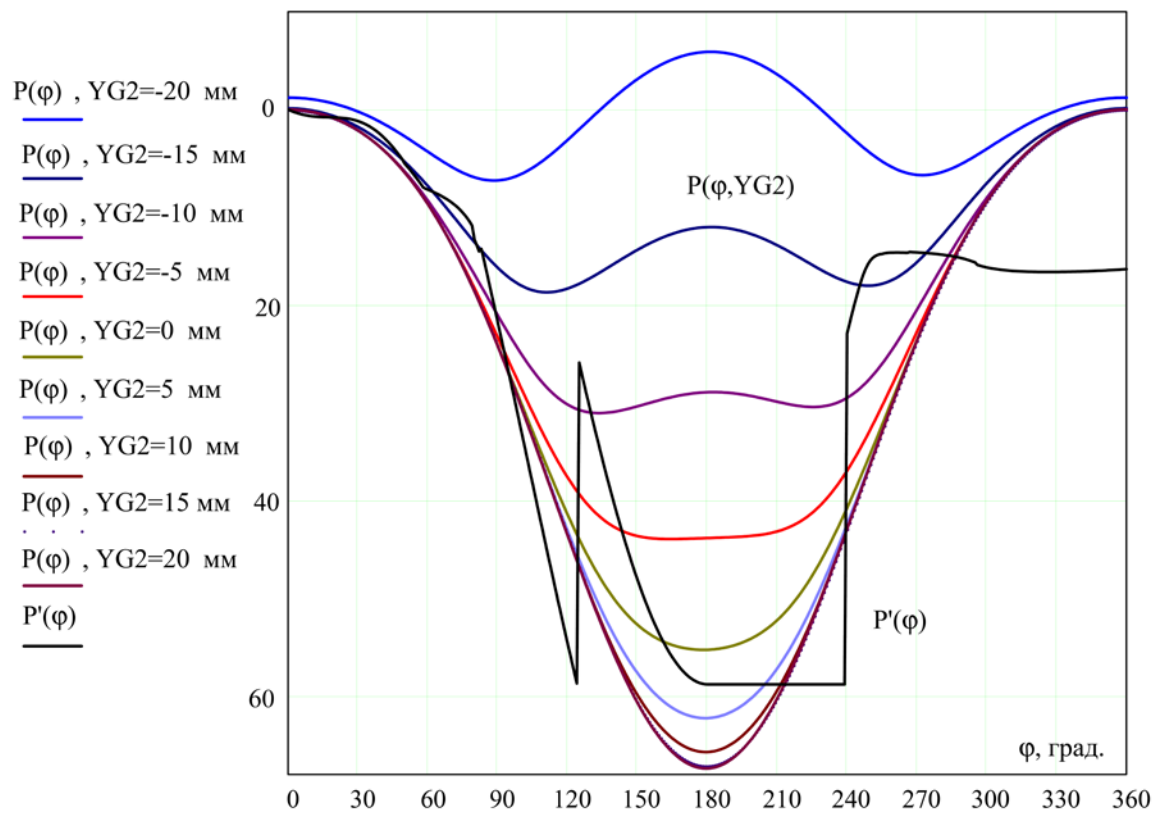


б

Рис. 4.6 Просторовий графік (а) та проєкційні діаграми (б) функцій дійсної $P(\varphi, Y_{G2-3})$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки при варіюванні положення нитконапрямника Y_{G2-3}



а



б

Рис. 4.7 Просторовий графік (а) та проєкційні діаграми (б) функцій дійсної $P(\varphi, Y_{G2})$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки при варіюванні положення нитконапрямника Y_{G2}

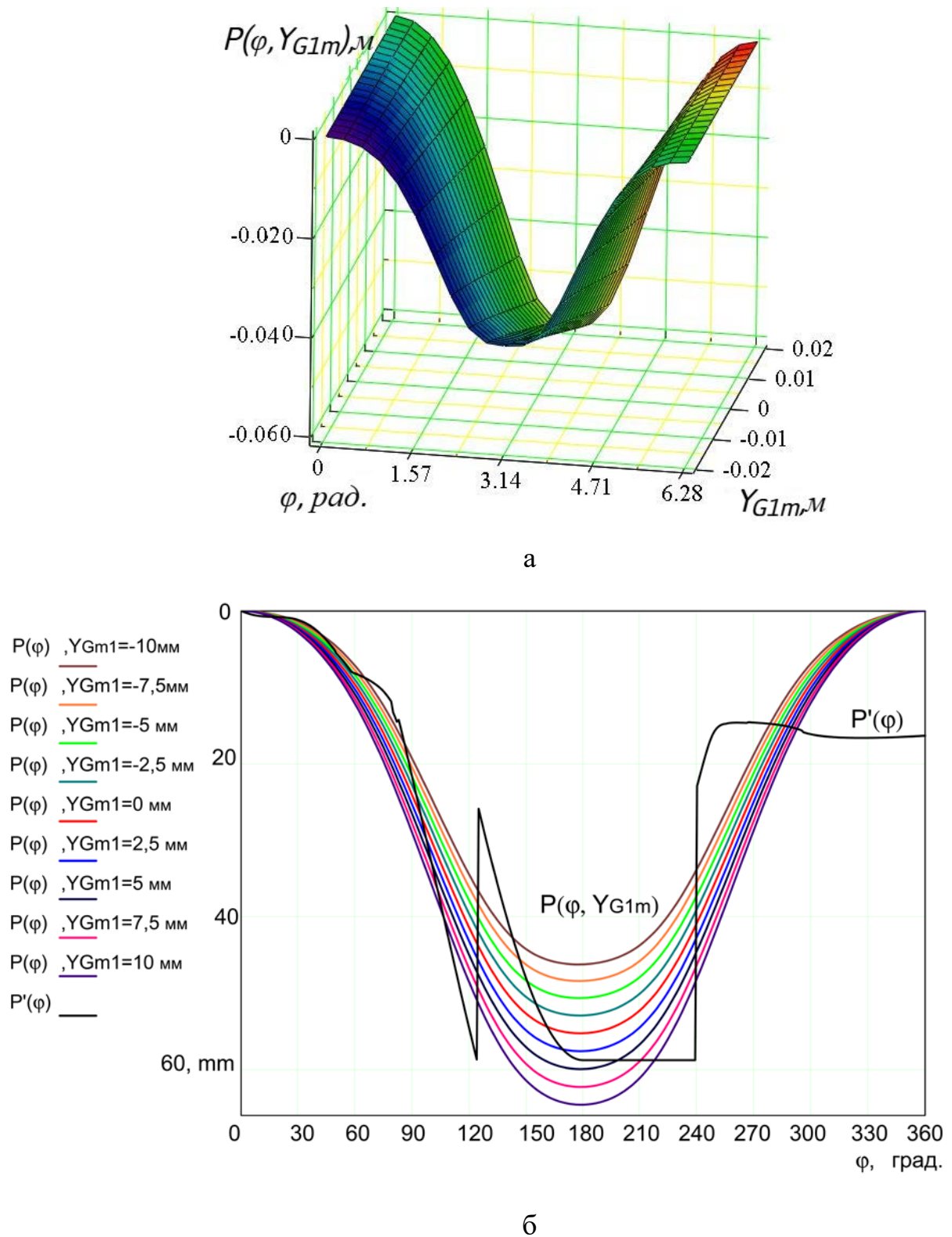


Рис. 4.8 Просторовий графік (а) та проєкційні діаграми (б) функцій дійсної $P(\varphi, Y_{G1m})$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки при варіюванні положення нитконапрявника Y_{G1m}

Аналіз діаграм показав, що зміна значень параметра y_{G2-3} (рис. 4.6) суттєво впливає як на амплітуду, так і на характер функції подачі нитки [161]. Таким чином, при $y_{G2-G3} = 1-2,5$ мм, в околиці КНП голки, спостерігається горизонтальна ділянка графіка $P(\varphi)$, тоді як при від'ємних значеннях утворюється сидлоподібна форма з двома локальними екстремумами.

Варіювання параметра y_{G2} (рис. 4.7) демонструє аналогічну тенденцію, проте ступінь впливу є менш вираженим, однак ступінь його впливу приблизно втричі слабший порівняно з параметром y_{G2-3} . Це зумовлено особливостями форми нитконапрямника, який деформує лише ділянку контуру подачі, під дією ниткоподавача $Tu1$. При значенні $y_{G2} = -5$ мм спостерігається подовження горизонтальної ділянки функції $P(\varphi)$.

В свою чергу, при зміні y_{G1m} в межах від ± 10 мм (рис. 4,8) зафіксовано прямопропорційне зростання максимуму функції $P(\varphi)$, при цьому її форма залишалася майже незмінною, що свідчить про можливість регулювання подачі нитки за рахунок зміни лише вертикальної координати нитконапрямника y_{G1m} .

Необхідні координати нитконапрямників G_i контуру подачі визначимо з умов оптимізаційного синтезу.

4.2 Оптимізаційний синтез механізму подачі нитки

4.2.1 Постановка задачі оптимізації та структуризація параметрів механізму

Синтез механізму подачі нитки з комбінованим кінематичним ланцюгом з пристроєм лапки розглянемо на прикладі механізму для швейної машини типу GK9-2. У даному випадку перша гілка плоского повзунного кінематичного ланцюга - це механізм базової конструкція ниткоподавача $Tu1(\varphi)$. Друга гілка кінематичного ланцюга, який забезпечує рух ниткоподавачу $Tu2(\varphi)$ є частиною механізму голки коромислового ланцюга.

Кожен із ниткоподавачів $Tu_1(\varphi)$ та $Tu_2(\varphi)$ має власний закон руху, а також оснащений нитконапрямниками $G_{2,3}$ для, за аналогією з машинами фірми «Uamoto» [140]. Зокрема, ниткоподавачі Tu_1 і Tu_2 закріплені відповідно на повзуні механізму голки машини GK9-2 та коромислі 4. Таким чином закони руху обох ниткоподавачів визначені структурою та кінематичними параметрами машини GK9-2.

Оскільки основною метою синтезу механізму подачі верхньої нитки є забезпечення максимальної відповідності функції дійсної подачі нитки $P(\varphi)$ до функції необхідної подачі $P'(\varphi)$, то цільову функцію для оптимізації структури механізму в загальному вигляді можна подати у такій формі [162, 168]:

$$\int_0^{2\pi} P'(\varphi) d\varphi - \int_0^{2\pi} P(\varphi) d\varphi \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

Однак під час синтезу механізму подачі нитки необхідно враховувати два важливих аспекти [162]:

1. Функція необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$ є кусково-неперервною, що означає: загальний інтеграл невідповідності слід розглядати як суму інтегралів окремих ділянок, на які розбито інтервал повороту головного вала відповідно до періодів процесу утворення стібка та відповідно до поліномів табл. 3.2.

2. Хоча функція дійсної подачі $P(\varphi)$ є неперервною та монотонною, важливо враховувати нерівнозначність похибок наближення у різних зонах аргументу φ , які визначені ділянками періоду процесу утворення стібка, або їх сумою (табл. 3.2). Зокрема, при $P(\varphi) > P'(\varphi)$ надлишок нитки не критичний при формуванні стібка залишається можливим. Натомість при $P(\varphi) < P'(\varphi)$ виникає дефіцит нитки, що може призвести до її змотування з бобіни із затримкою, або навіть до її обриву, що фактично порушує процес утворення стібка.

З урахуванням зазначених особливостей, функцію мети доцільно подати у вигляді зваженої квадратичної похибки [168]:

$$\sum_{i=1}^n q_i \left(\int_{\varphi_{ni}}^{\varphi_{ki}} f_i(\varphi) d\varphi - \int_{\varphi_{ni}}^{\varphi_{ki}} P(\varphi) d\varphi \right) \rightarrow \min \quad (4.2)$$

де $f(\varphi)$ - значення кусково-безперервної функції $P'(\varphi)$ в i -му інтервалі;

q_i - ваговий коефіцієнт, що враховує важливість приближення функції $P(\varphi)$ до $P'(\varphi)$ i -му інтервалі;

φ_{ni} , φ_{ki} - відповідно значення кута повороту головного валу, що відповідає початку та кінцю i -го інтервалу, град.

Крім того, оскільки синтез механізму подачі нитки виконується для конкретної швейної машини типу GK9-2, доцільно враховувати її конструктивні особливості. Виходячи з конфігурації «контуру подачі» нитки (рис. 4.9), функцію дійсної подачі нитки визначимо з (4.4)-(4.7) з урахуванням умов (4.1).

На підставі наведеного вище можна визначити вхідні та вихідні параметри механізму подачі нитки, що враховуються в процесі його синтезу.

До заданих параметрів відносимо: функції положення ниткоподавачів Tu_1 - Tu_2 , та їх взаємнерозташування, координати нитконапрямника $G_{2,3}$ ($x_{G_2} = x_{G_2} = 6\text{ мм}$ та $y_{G_{2,3}} = 2\text{ мм}$).

До заданих, тобто тих, що підлягають визначенню при синтезі, відносяться параметри, що визначають початкові положення ниткоподавача Tu_2 - α_0 , x_{Tu2} ординати нитконапрямників G_0 та G_{1m} відповідно y_{G0} та y_{G1m} .

4.2.2 Вибір метода оптимізаційного синтезу механізму подачі голки та опис його алгоритму.

З огляду на складну залежність між вихідними параметрами механізму та значеннями функції мети, а також включення вагових коефіцієнтів до процесу

аналізу, завдання синтезу ускладнюється через можливу наявність кількох локальних екстремумів у досліджуваному просторі параметрів.

У таких умовах доцільно застосувати метод стохастичного пошуку (Монте-Карло), який забезпечує ефективне виявлення глобального екстремуму в багатовимірному параметричному просторі та продемонстрував високу результативність у задачах подібного типу [162, 168]. Алгоритм цього метода полягає в тому, що в кожному циклі будуть здійснюватись наступні процедури:

1. Генерується набір випадкових чисел, кожне з яких відповідає певній випадковій величині (координаті). При цьому випадкові числа для координат вибираються із заданого діапазону (в даному випадку - від 0 до 99 відповідно до таблиці [168]).

2. Вираховуються керуючі величини (випадкові координати) [140]:

$$Z_i = a_i + \frac{\sigma_i}{100}(b_i - a_i),$$

де a_i та b_i - границі діапазону можливих значень Z_i .

3. Після цього здійснюється перевірка випадково обраних координат на відповідність встановленим обмеженням, а також додатковим умовам, якщо такі передбачені. У випадку порушення хоча б однієї з цих умов отримане рішення відхиляється і до подальшого аналізу не залучається.

4. Обчислюється числове значення функції мети (4.2), після чого виконується перевірка відповідності отриманого результату умовам обмежень, які накладені на критерії оптимальності. Ці обмеження можуть бути представлені в такому вигляді:

$$F(Z_1, Z_2 \dots Z_n) \leq F',$$

де F' - критерій оптимальності.

5. Якщо зазначене обмеження не виконується, отримане рішення одразу ж виключається з подальшого аналізу.

6. Далі поточне значення функції мети порівнюється з найкращим, що було визначене у попередніх кроках. Якщо отримане значення виявляється меншим, воно фіксується як нове оптимальне, а разом із ним запам'ятовуються й відповідні випадкові координати. Наступні результати порівнюються вже з цим оновленим оптимальним значенням. Якщо ж поточне значення функції мети перевищує найкраще з уже отриманих, то це рішення відкидається і не бере участі у наступних етапах обчислень.

4.2.3 Формулювання обмежень вибору параметрів для синтезу механізму подачі нитки

Обмеження встановлюються на основі результатів аналізу, виконаного у розділі 4.2.4 та з урахуванням геометричних параметрів машини GK-9-2.

Визначення розмірів деяких ланок механізму виконуємо з урахуванням наступних міркувань.

1. Окрім того ниткоподавач має виходити за межі корпусу, таким чином це вносить значення мінімальних параметрів, які є конструктивно необхідними.

Для забезпечення оптимальної роботи механізму необхідно обмежити мінімальну цю відстань. Вона визначається з урахуванням геометричного розташування центра коливання (O_2) (рис. 4.9) двохплечого-коромисла (O_2BC) та положення зовнішньої поверхні корпусу - $l_{O_2Tu_2} \approx 54 \text{ мм}$.

2. Параметр $y_{G_{2,3}} = S_x + 2 \text{ мм}$ координати нитконапрямників $G_{2,3}$ прийнято з результатів моделювання його впливу в П4.2.4[161].

3. Згідно з розрахунками, наведеними в розділі 3, максимальний кут коливання $\psi_{\max}$ ниткоподавача Tu_2 у розглянутій машині GK-9-2 становить приблизно 84° . Виходячи з того що, цей параметр фіксований, а положення ниткоподавача Tu_2 буде визначатися кутом α_0 (рис. 4.9) відносно плеча

коромисла O_2C . Відповідно з урахуванням координати стійки O_2 та конструктивних особливостей ниткоподавача Tu_1 приймаємо $y_{O2} \approx 80$ мм.

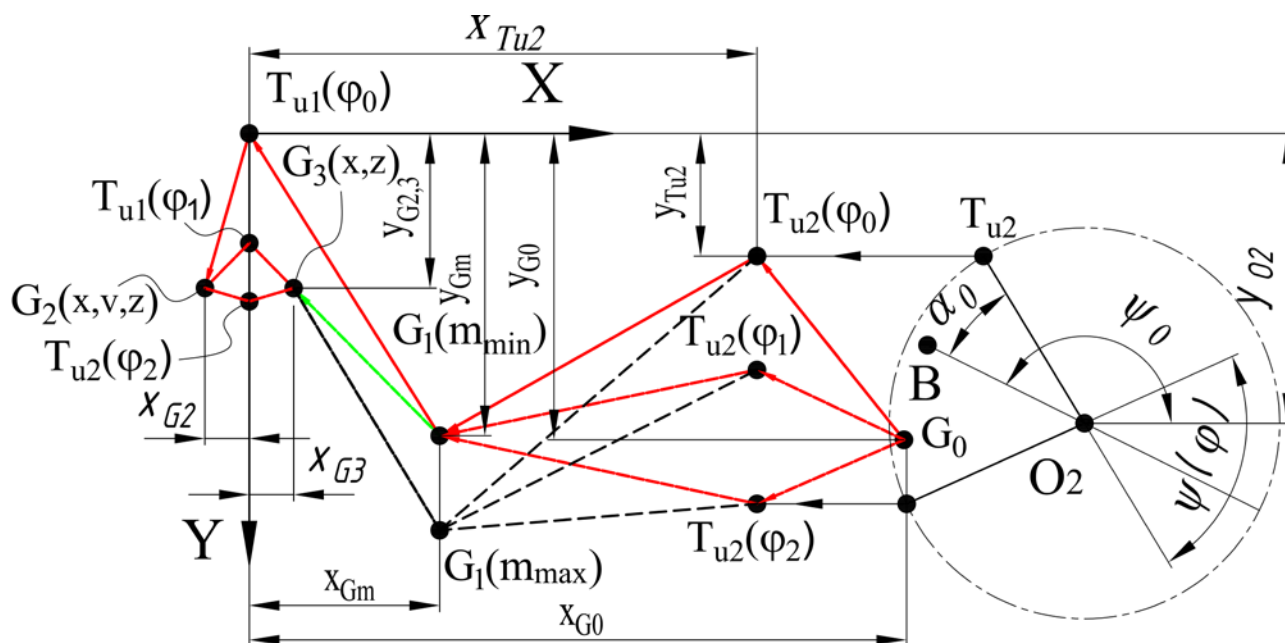


Рис. 4.9 Розрахункова схема для синтезу параметрів контуру подачі нитки

5. Значення параметра X_{G_0}, Y_{G_0} приймаємо, виходячи з можливості встановлення нитконапрямника G_0 на корпусі машини. При цьому важливо забезпечити, щоб нитконапрямник був віддалений від ниткоподавача G_2 та не перетинав площину руху ниткоподавача G_1 , та повинні сприяти зменшенню кута охоплення даного нитконапрямника. Таким чином приймаємо $G_0(40, 90)$.

Значення інтервалів вихідних параметрів згідно зазначених обмежень наведені в табл. 4.2.

Допустимі значення похибок (табл. 4.2) визначено на основі кроку варіювання відповідних параметрів у механізмі подачі нитки машини GK9-2, що застосовувався під час досліджень у підрозділі 4.2.4.

Таблиця 4.2

Значення границь інтервалів керуючих величин

Вихідні параметри	Границі інтервали		Допустима абсолютна похибка результатів α_i
	a_i	b_i	
x_{G_m} , мм.	25	45	2
y_{G_m} , мм.	80	110	5
x_{G_0} , мм.	90	100	5
y_{G_0} , мм.	25	45	5
$x_{T_{u2}}$, град.	45	65	2
α_0 , мм	-20	20	2

Визначаємо число циклів N розрахунків з формули [104]:

$$P = 1 - (1 - p)^N, \quad (4.4)$$

де: P - Ймовірність того, що протягом N реалізацій розрахункового циклу буде знайдено оптимальне рішення, визначається згідно з аналітичними підходами, викладеними у [162, 168]. Відповідно до рекомендацій цих джерел, приймаємо значення цієї ймовірності на рівні 0,95.

$$p = 1/W, \quad (4.5)$$

де: W - загальне число одиночних багатомірних комірок області пошуку.

$$W = \prod_{i=1}^n \frac{b_i - a_i}{\alpha_i} = 96000, \quad (4.6)$$

де: n - число вихідних параметрів ($n = 6$);

α_i - допустима абсолютна похибка результату, з формули (4.4) та (4.5)

отримаємо:

$$N = \frac{\ln(1-P)}{\ln\left(1 - \frac{1}{W}\right)} = 287589, \quad (4.7)$$

де: P - задана ймовірність знаходження хоча б одного глобального екстремуму (наприклад, 0.95),

W - кількість усіх допустимих варіантів (у нашому випадку $W=96000$),

N - необхідна кількість випадкових ітерацій, щоб з ймовірністю P потрапити в потрібну комірку.

4.2.4 Визначення вагових коефіцієнтів методом експертної оцінки

З огляду на відсутність у літературі чітких критеріїв значущості наближення функцій подачі, вагові коефіцієнти було прийнято на основі експертної оцінки з урахуванням методичних положень [162, 168] (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Значення вагових коефіцієнтів

	Об'єкти w_{ij}				
	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV	Зона V
	φ_{0-3}	φ_{3-4}	φ_{4-6}	φ_{6-8}	φ_{8-9}
q_i	0.15	0.403	0.148	0.195	0.104

4.2.5 Оцінка результатів синтезу механізму подачі нитки та їх технічний аналіз

Синтез механізму подачі нитки було виконано відповідно за алгоритмом оптимізації в два етапи. В першому підході синтез виконувався для максимальних технологічних параметрів стібка ($t=12$ мм, $m=8$ мм), це забезпечило визначення функції мети за рівням регресії (3.6) та параметрів коефіцієнтів відповідно до положення головного валу у визначені періоди.

Результати, отримані в процесі оптимізаційного синтезу, а також значення параметрів, що були визначені конструктивно, наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Значення параметрів механізму подачі нитки

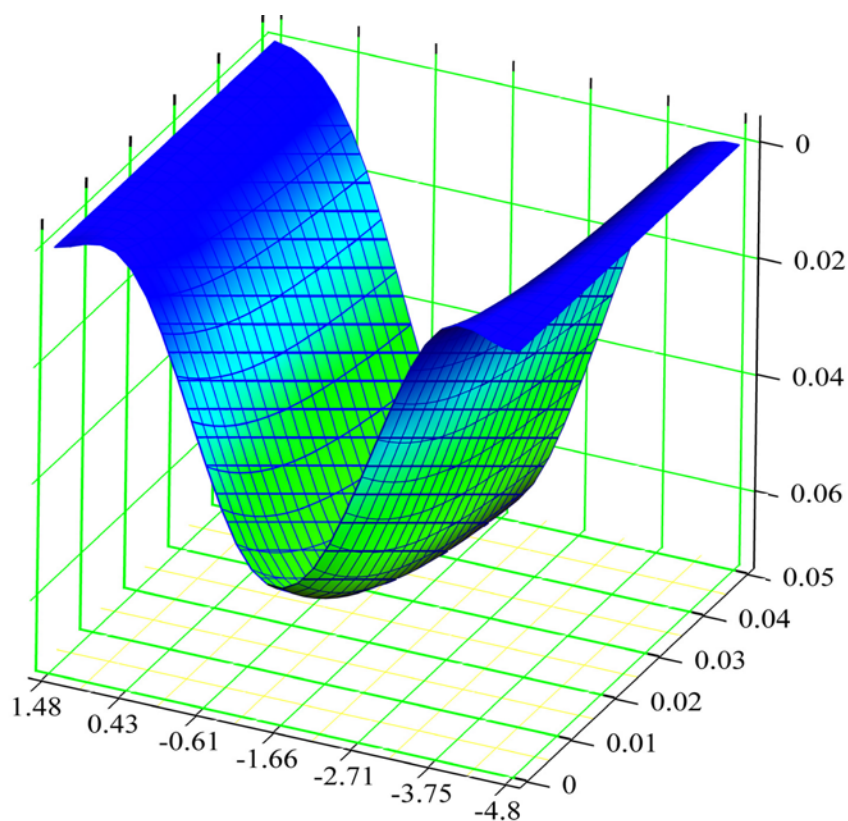
Назва параметра								
Координати	G_0	G_{1m}	G_3	G_2	α_0	T_{u1}	T_{u2}	l_{O2Tu2}
	мм							
х	95	30	+6	-6	0	0	55	54
у	50	46	30	30	25		53	

В другому етапі оптимізаційного синтезу були прийняті технологічні параметри стібка мінімального значення ($t=8$ мм, $m=0,4$ мм). При цьому метою синтезу було визначення нового положення нитконапрямника G_{1m} за умови фіксованих значень усіх інших параметрів механізму. Такий підхід дає змогу визначити значення цього параметра та встановити співвідношення між товщиною матеріалу m і положенням нитконапрямника y_{G1m} , що, своєю чергою, дозволяє визначити довжину плеча важеля O_2E (рис. 4.2).

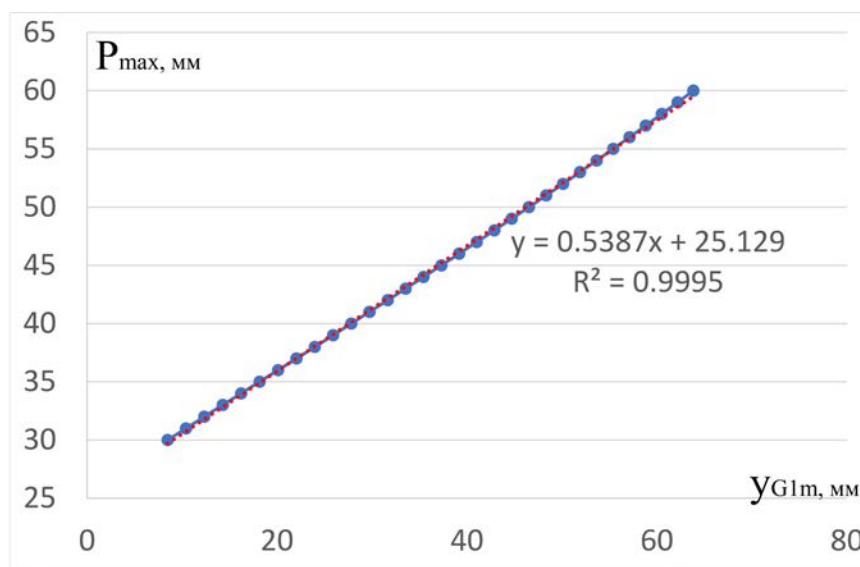
З метою оцінки впливу координати нитконапрямника y_{G1m} на характер функції подачі нитки $P(\varphi)$ побудовано просторову поверхню залежності подачі від кута повороту головного вала та положення нитконапрямника $P(\varphi, y_{G1m})$ (рис. 4.10).

В результаті дослідження отримано апроксимаційне рівняння функції $P_{\max}(y_{G1m})$ (рис. 4.11), що описує зміну подачі нитки залежно від значення y_{G1m} , а також визначено максимальне значення цієї функції в межах досліджуваного діапазону. Залежність (4.8) демонструє чутливу зміну амплітуди подачі нитки при зміщенні координати нитконапрямника G_{1m} , що є вихідним значенням при визначенні параметрів механізму подачі нитки.

$$y_{G1m}(P_{\max}) = \frac{P_{\max} - 25,129}{0,5387}, \quad (4.8)$$



а



б

Рис. 4.10 Вплив параметру y_{G1m} на функцію дійсної подачі нитки: а) поверхня відгуку значень функції $P(\varphi, y_{G1m})$; б) графік максимальних значень функції дійсної подачі нитки $P_{\max}$ від значення параметра y_{G1m} та його апроксимація

Тоді відповідно з конструкції механізму (рис. 4.4, а) визначимо параметри плеч механізму співвідношення товщини матеріалу m та залежності (4.8):

$$\frac{m}{|y_{G_1m}(P_{\max}) - y_{G_1m}(P_{\min})|} = \frac{l_{O_2E}}{l_{O_2G_{1m}}},$$

звідки:

$$(4.9)$$

З урахуванням (3.6) та максимальних і мінімальних параметрів стібка з (4.9) отримаємо залежність, яке справедливе для параметрів механізму табл. 4.4 та достатнє з точки зору вимог до механізму:

$$l_{O_2E} \approx 0,2 \cdot l_{O_2G_{1m}}, \quad (4.5)$$

Довжина ниткоподавача $l_{O_2G_{1m}}$ визначається з конструктивних міркувань в нашому випадку в діапазоні 55-65 мм, а зважаючи, що конструкцією передбачено регулювання його довжини, та початкового положення точне налаштування можна здійснити в реальній машині виконуючи умови (4.5).

На основі параметрів розробленого механізму подачі нитки ($l_{O_2G_{1m}} = 62$ мм, $l_{O_2G_{1m}} = 12,4$) побудовано діаграму подачі (рис. 4.11) для мінімального та максимального значень товщини матеріалу, а також із кроком 2 мм у діапазоні від 0 до 8 мм.

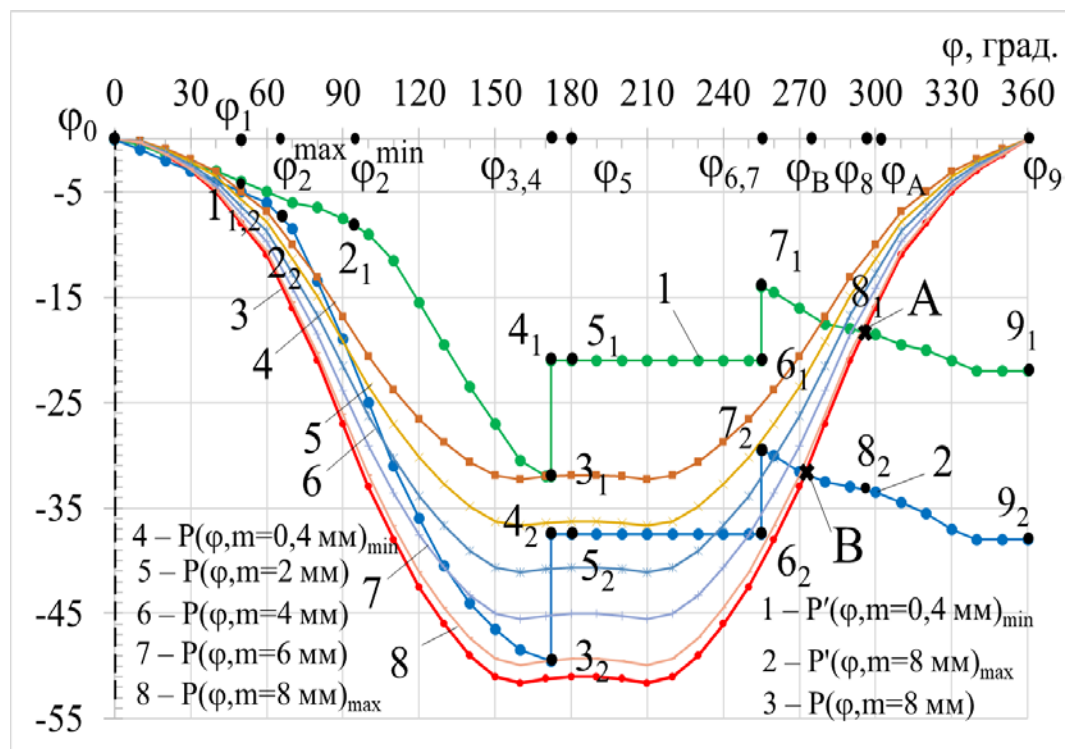


Рис. 4.11 Графіки функцій $P(\varphi)$ та $P'(\varphi)$ нового розробленого механізму подачі нитки

Порівняльний аналіз показує, що нова конструкція механізму забезпечує значно кращу відповідність між дійсною функцією подачі нитки $P(\varphi)$ та необхідною функцією $P'(\varphi)$ у всьому діапазоні товщин. Це свідчить про високий рівень узгодженості між теоретичною та реальною подачею, що підтверджує ефективність обраної структури механізму та доцільність застосованої методики синтезу.

Для перевірки достовірності теоретичних розрахунків у наступному підрозділі передбачається проведення натурного експерименту, спрямованого на визначення зусиль натягу нитки за умов зміни товщини зшиваних матеріалів. Це дозволить оцінити працездатність розробленого механізму в реальних умовах та підтвердити адекватність побудованих моделей.

4.3 Експериментальна перевірка ефективності нового механізму подачі нитки та коректності отриманих аналітичних залежностей

Експериментальне дослідження було спрямоване на реалізацію таких основних завдань:

- Перевірити відповідність між аналітичною функцією необхідної подачі нитки $P'(\varphi)$ та реальною подачею, забезпеченою розробленим механізмом, в умовах зміни товщини матеріалу;
- Визначити зусилля натягу нитки під час зшивання текстильних матеріалів різної товщини за допомогою модернізованої швейної машини та порівняти з базовою конструкцією;
- Оцінити вплив геометричних та технологічних параметрів на стабільність процесу утворення стібка, з урахуванням результатів натурного експерименту;
- Підтвердити працездатність і ефективність нового механізму в умовах реального навантаження, а також обґрунтувати доцільність застосування побудованих аналітичних моделей у подальшому проектуванні подібних машин.

4.3.1 Умови проведення експерименту

Для вимірювання зусилля натягу нитки в швейній машині застосовано тензометричний метод із використанням електричного перетворювача змінного опору. В основі конструкції вимірювального вузла застосована консольна балка, яка сприймає навантаження від натягнутої нитки; на її поверхні закріплено тензодатчики [162, 188]. Геометричні параметри балки попередньо перевірено методом частотного аналізу (Додаток Є).

Для забезпечення об'єктивності порівняння базового та модернізованого механізмів подачі нитки експеримент проводили при сталої частоті обертання головного вала ($n = 600$ об/хв), що дозволило мінімізувати вплив динамічних чинників. Методика дослідження відповідала положенням підрозділу 3.5.

Оскільки необхідне зусилля натягу попередньо не визначається, після кожного досліді здійснювалася оцінка якості стібка відповідно до розрахункової довжини нитки [189–191]. Основними критеріями були: правильне взаємне розташування ниток, відсутність дефектів шва (зборки, стягування), а також відповідність коефіцієнта кількості нитки в стібку $S = 4$ [189–191].

У разі виявлення відхилень проводилося регулювання натягу з подальшим повторним вимірюванням. Тарування тензометричної балки здійснювали до та після серії дослідів із використанням еталонних вантажів для забезпечення достовірності результатів.

4.3.2 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка складається з об'єкта дослідження - швейної машини GK9-2 (1), оснащеної новим механізмом подачі нитки (рис. 4.12, 4.13), засобами контролю швидкості та натягу нитки.

До системи входить комп'ютер 2, який здійснює обробку та виведення результатів, і з'єднаний через USB-порт з контролером 3 - ARDUINO UNO на базі мікроконтролера ATmega328P (рис. 4.14). Контролер 3, у свою чергу,

підключений до аналогово-цифрового перетворювача НХ711 4, а також до магнітного датчика 5 (Холла КУ-003), що використовується для визначення кутової швидкості головного валу машини та положення.

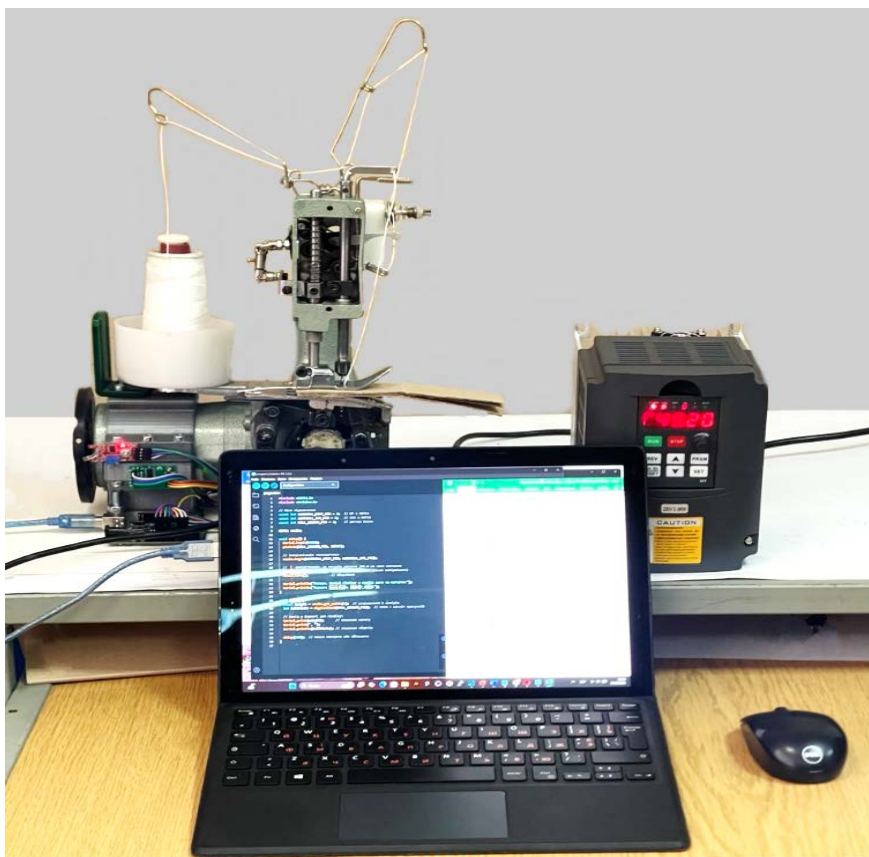


Рис. 4.12 Загальний вигляд експериментальної установки

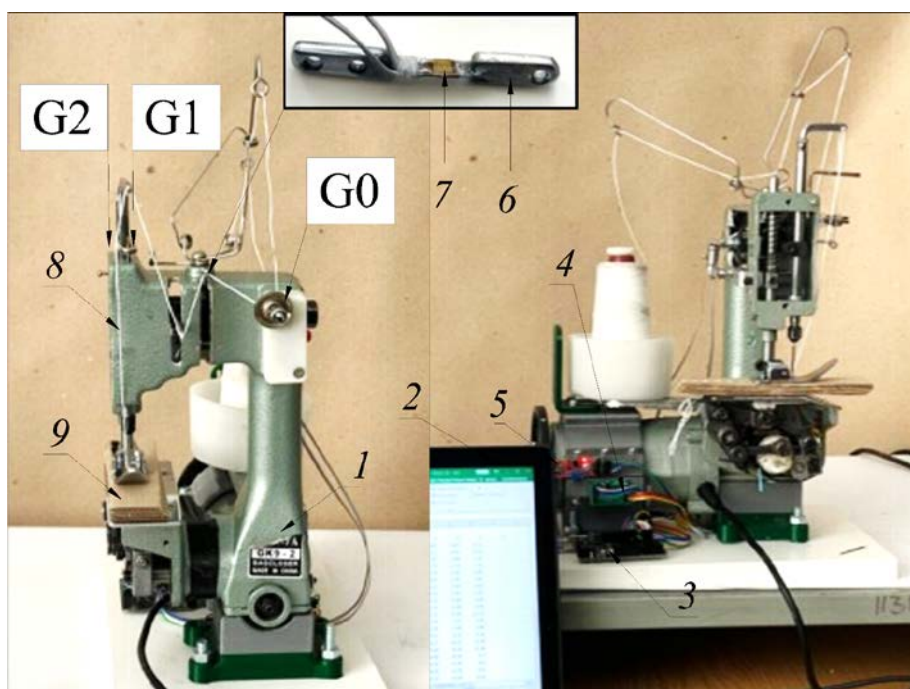


Рис. 4.13 Експериментальна установка для вимрювання зусилля натягу нитки з новим механізмом подачі нитки

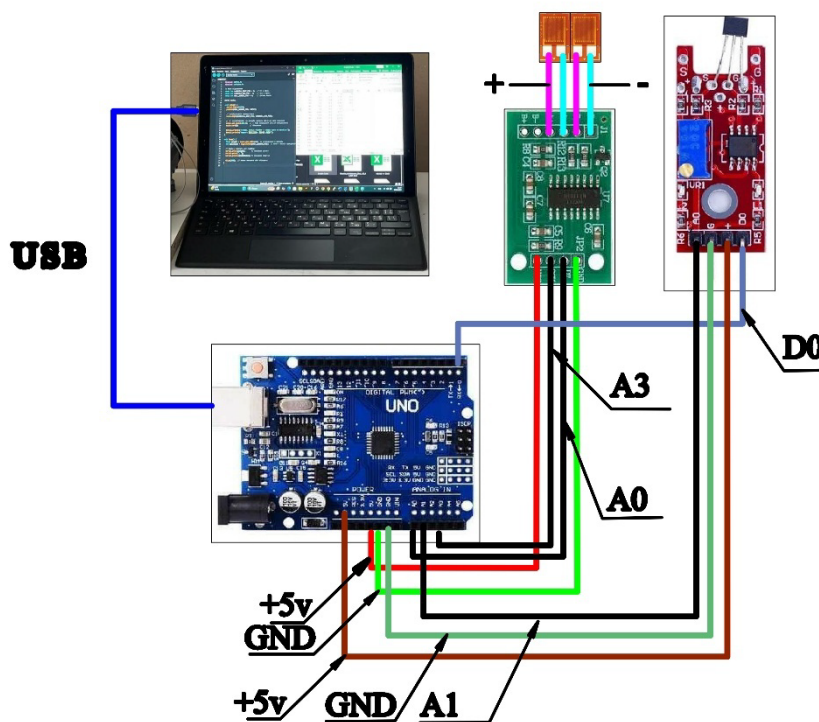


Рис. 4.14 Комбінована схема експериментальної установки

Вибір конструкції та місця встановлення перетворювача визначався траєкторією руху та умовами подачі нитки 8 у досліджуваному механізмі подачі нитки. У розробленій конструкції механізму місце кріплення перетворювача передбачене на ниткоподавачі 6 (рис. 4. 13). З метою забезпечення можливості вимірювання, перетворювач виконано у вигляді балки 6, яка інтегрована до конструкції ниткоподавача як його складова частина.

З обох боків балки 6 закріплені тензодатчики 7 BF350-3AA з опором 350 Ом кожен, які входять до складу вимірювальної електричної схеми (рис. 4.14). Пара тензодатчиків 7 підключена до аналогово-цифрового перетворювача HX711 4 (рис. 4.13, 4.14). Для обробки сигналів використовувалось програмне забезпечення «Arduino IDE». В програмному коді передбачено коефіцієнт тарування, який перевизначає показання балочки у вигляді напруги в значення в ньютонках.

4.3.3 Тарування експериментальної установки

Схему тарування пристрою на базі експериментальної установки наведено на рис. 4.15, 4.16, а. Відмінність її застосування полягає в іншому способі заправлення нитки 8 та застосування тягарця 9, змінної маси.



Рис. 4.15 Схема тарування експериментальної установки

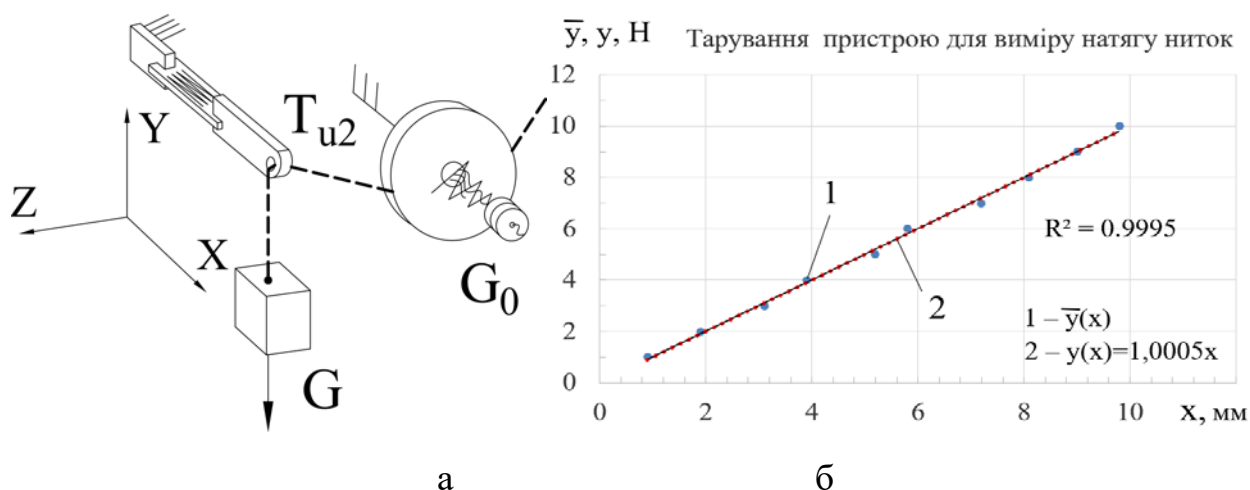


Рис. 4.16 Тарування вимірювального пристрою:

а) схема тарування; б) графік тарування значень прибору

Відповідно до схеми заправки (рис. 4.15, а), нитку 8 заправляли у вічко ниткоподавача 6. До вільного кінця нитки підвішували тягарець 9 з відомою масою. Значення маси змінювали дискретно з інтервалом 10 г, що давало змогу

створити контрольоване й стабільне зусилля натягу нитки, необхідне для тарування вимірювального пристрою.

Процедура тарування виконувалась у такій послідовності. Ниткоподавач 6 разом із балкою (рис. 4.15) встановлювали у верхнє положення, яке відповідало крайньому верхньому положенню голки (КВП). Далі нитку заправляли через регулятор натягу 5 у вічко ниткоподавача 6. Після цього запускали програму Arduino IDE, яка ініціалізувала зчитування сигналів з тензометричного модуля.

До нитки послідовно підвішували тягарці 9 з відомою масою, витримуючи кожне навантаження протягом фіксованого часу для стабілізації сигналу. Зафіксовані цифрові значення відповідали деформації балки при кожному з навантажень. Ці дані дозволили встановити залежність між показами датчика та дійсним зусиллям натягу нитки, що лягла в основу шкали перетворення сигналів під час основного експерименту.

Процедура тарування виконувалася перед початком і після завершення кожної серії вимірювань з метою забезпечення достовірності та повторюваності експериментальних результатів. Графічні результати тарування наведено на рис. 4.16.

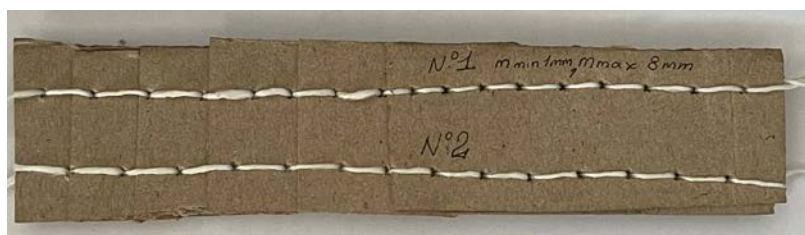
Обробка результатів тарування здійснювалася відповідно до методики, викладеної в підрозділі 3.5.

4.3.4 Алгоритм проведення експерименту та його результати

Алгоритм проведення експерименту реалізовувався за такою послідовністю. Спочатку нитку заправляли відповідно до встановленої схеми (рис. 4.3, б). Далі здійснювали налаштування механізму подачі нитки шляхом встановлення необхідного зусилля затягування на регуляторі натягу G_0 . Після формування кількох пробних стібків вручну проводили оцінку їхньої якості за еталонними критеріями - зокрема, за взаємним розташуванням ниток і відповідністю показника S . У разі виявлення відхилень виконували коригування

натягу за допомогою регулятора, поступово змінюючи силу затиску нитки, починаючи з мінімального значення до досягнення необхідного результату.

Після завершення попереднього налаштування запускали програму Arduino IDE та подавали живлення на швейну машину типу GK9-2 через частотний регулятор (мод. HY03D023B), завдяки якого встановлювалася необхідна швидкість обертання головного валу машини. Для забезпечення коректного порівняння базового та модернізованого механізмів подачі експерименти проводили при сталої частоті обертання головного вала. Швидкість було зафіксовано на рівні 600 об/хв, що дозволяло мінімізувати похибки під час порівняння результатів для обох конструкцій механізмів (з результатами П 3.5). Зразки для зшивання мали змінну товщину матеріалу в діапазоні від 0,4 до 8 мм (рис. 4.17), що відповідало запланованим умовам. Довжину стібка обирали мінімальною для забезпечення достатньої кількості стібків на кожній ділянці з постійною товщиною матеріалу.



а



б

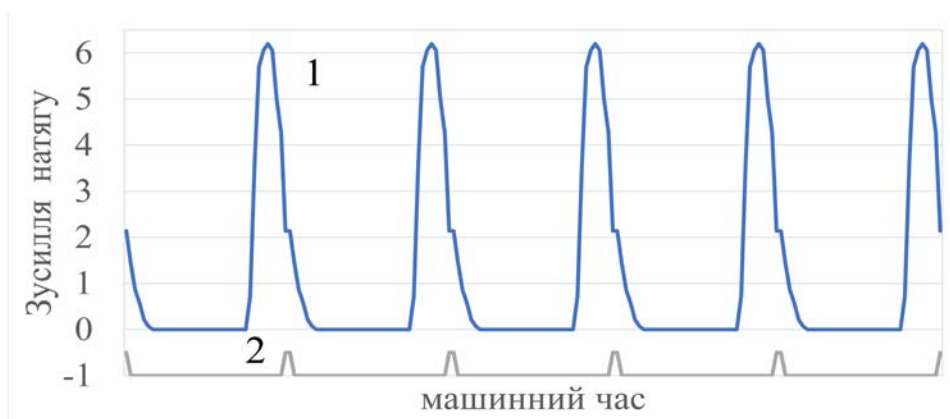
Рис. 4. 17 Зразок матеріалу з різною структурою шва: а) лицьова сторона; б) тильна сторона; 1 – зшивання на базовій конструкції механізму подачі нитки GK-9-2; 2 – зшивання на новій конструкції механізму подачі нитки

Реєстрація зусиль натягу нитки здійснювалась із використанням аналого-цифрового перетворювача НХ711, який перетворював сигнали деформації

пружних елементів у цифрову форму. Положення головного вала та кількість сформованих стібків фіксувалися за допомогою магнітного датчика Холла КУ-003. Отримані дані зберігалися у цифровому вигляді за допомогою програм Arduino IDE та Microsoft Excel.

Для кожної конструкції механізму було проведено серію дослідів, у межах яких виконували по 10 повторних спостережень (табл. В.1, В.2). Приклади реєстрації результатів одного з дослідів для кожної конструкції наведено на рис. 4.18.

Кількість спостережень на кожному етапі тарування становила 5, загалом виконано 10 спостережень. Результати фіксувались аналогічно основному експерименту - за допомогою програм Arduino IDE та Microsoft Excel (Додаток Ж, Д).



a

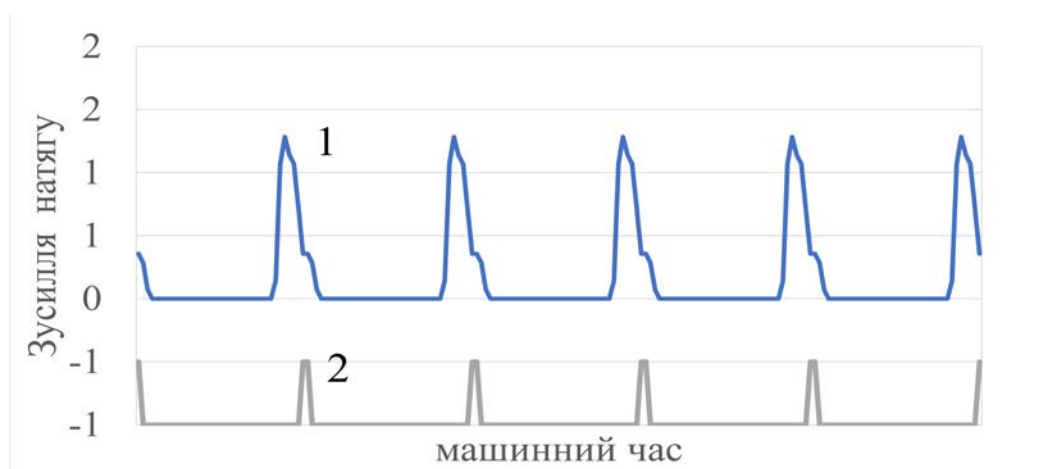


Рис. 4.18 Запис значень зусилля натягу нитки для нової конструкції МПН:

а) при товщині матеріалів $m=0,4$ мм; б) при товщині матеріалів $m=8$ мм;

1- показання балочки, Мв; 2 - відмітка КВП голки

З метою коректного порівняння отриманих експериментальних даних із результатами, визначеними для ділянки контуру подачі G_0 - G_1 , необхідно розрахувати нормальну складову сили натягу нитки $F_n(\varphi)$, яка діє вздовж нитки (рис. 4.19). Для цього використовується залежність, яка враховує кут між напрямком нитки та напрямком дії результуючої сили натягу нитки:

$$F_n(\varphi) = F(\varphi) \cos \alpha(\varphi), \quad (4.8)$$

де $F_n(\varphi)$ - нормальна складова зусилля натягу нитки, Н;

$\alpha(\varphi)$ - миттєвий кут між векторами сили $F_n(\varphi)$ і $F(\varphi)$, рад.

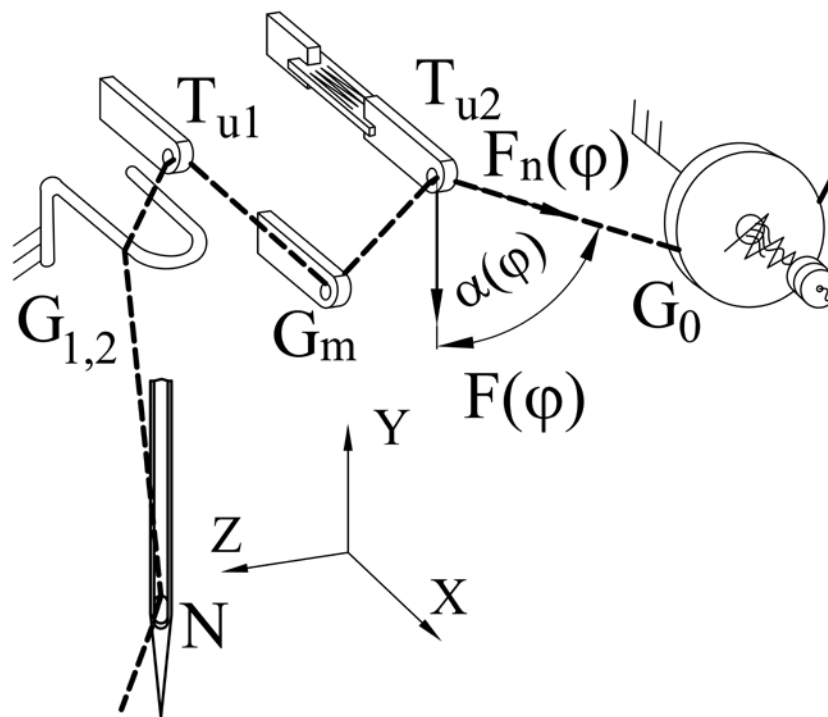


Рис. 4.19 Схема перетворення зусилля натягу нитки

Значення миттєвого кута $\alpha(\varphi)$ виходячи із зазначень координат нитконапрямника G_0 та ниткоподавача $Tu_2(\varphi)$ (табл. 4.4) та його поточного положення $u_{Tu2}(\varphi)$:

$$\cos \alpha(\varphi) = \frac{y_{Tu2} + y_{Tu2}(\varphi) - y_{G0}}{\sqrt{(x_{G0} - x_{Tu2})^2 + (y_{G0} - (y_{Tu2} + y_{Tu2}(\varphi)))^2}}, \quad (4.5)$$

Результати розрахунку представлені в Додатку Д.

4.3.5 Аналіз результатів експерименту

Для порівняння конструкцій механізмів подачі нитки базового та удосконаленого виконання на рис. 4.20 наведено діаграми зміни зусилля натягу нитки, при їх зшиванні, залежно від товщини матеріалів для обох конструкцій машин.

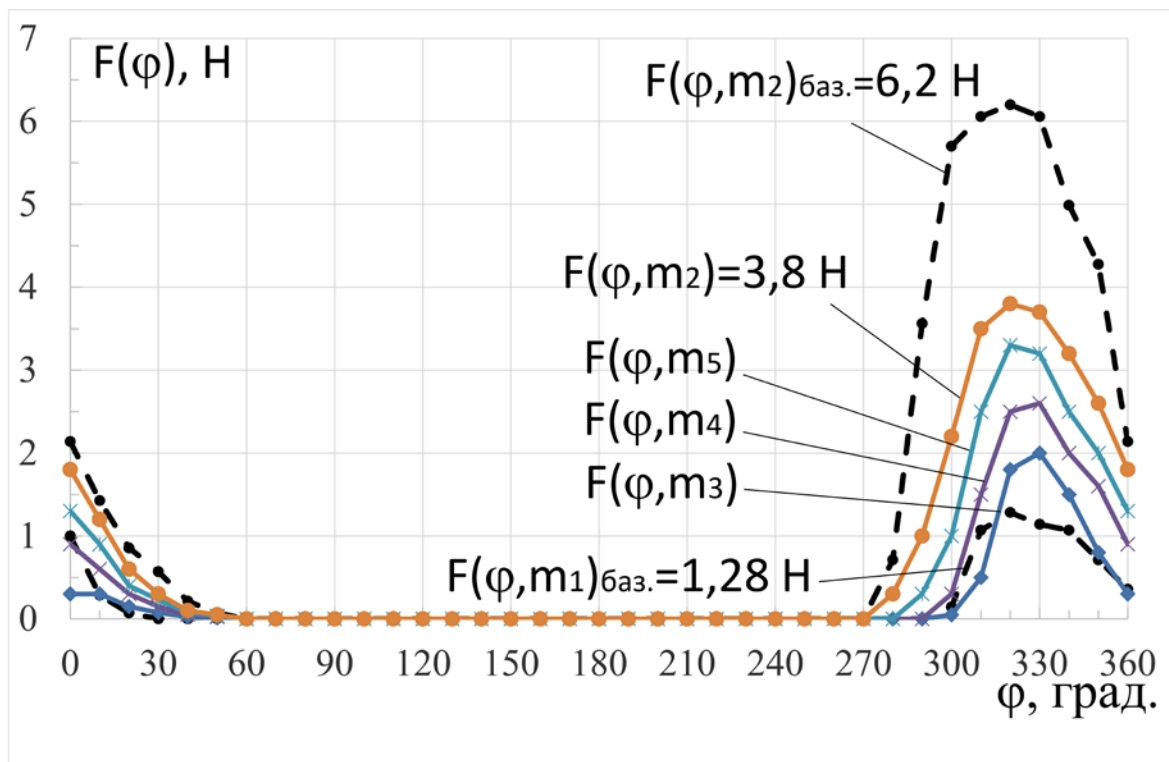


Рис. 4.20 Діаграми зусилля натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 для механізмів базової ($F(\varphi, m)_{\text{баз.}}$) та удосконаленої ($F(\varphi, m)$) конструкцій за різних значень технологічного параметра m : $m_1=0,4 \text{ мм}$, $m_2=8 \text{ мм}$, $m_3=2 \text{ мм}$, $m_4=4 \text{ мм}$, $m_5=6 \text{ мм}$,

Попередні дослідження встановили, що конструкція швейної машини типу GK-9-2 не передбачає регулювання величини подачі нитки під час формування стібка. Кількість поданої нитки залишається сталою незалежно від технологічних умов, зокрема товщини матеріалу. В умовах зшивання багат шарових текстильних структур, зокрема при виготовленні армуючих елементів композитів, це призводить до значної невідповідності між дійсною $P(\varphi)$ та необхідною $P'(\varphi)$ функцією подачі нитки.

Як показано на графіку залежності зусиль у процесі формування стібка типу 101, для тонких матеріалів (наприклад, $m_1=0,4$ мм) фіксується надмірна подача нитки, що перевищує необхідну в середньому на 28–35 %. Це спричиняє провисання нитки, та призводить до слабких міжшарових з'єднань текстильних матеріалів та зниження надійності з'єднання. Натомість для товстіших зон (зокрема, $m_2=8$ мм) через відсутність компенсації виникає надмірне зусилля натягу до 6,2 Н, що фіксується в діапазоні кутів $\varphi=290\text{--}340^\circ$, і призводить до обривів нитки, стягування шва та втрати його геометричної стабільності.

Для усунення цієї проблеми було розроблено новий механізм подачі нитки, який адаптує величину подачі нитки відповідно до фактичної товщини зшивного матеріалу. Завдяки цьому вдалося знизити пікове зусилля натягу до 3,8 Н (при $m_6=8$ мм), що дозволило зменшити навантаження на нитку, уникнути дефектів і забезпечити рівномірну якість шва на всій довжині.

Таким чином, проблему відсутності регулювання подачі нитки в базовій машині GK-9-2 було вирішено завдяки впровадженню адаптивного механізму, який змінює подачу нитки залежно від товщини матеріалу. Це дало змогу досягти головної мети дослідження - забезпечити стабільн зшивання армуючих елементів у композитах зі змінною товщиною.

4.4 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано розробку, аналітичне дослідження, оптимізаційний синтез та експериментальну перевірку нового механізму подачі голкової нитки з автоматичним регулюванням подачі нитки. На основі проведених досліджень встановлено:

1. Запропоновано дві структури механізмів подачі нитки з кінематичним зв'язком нитконапрямника із пристроєм притискної лапки. Показано, що структура з неоднорідною системою нитконапрямників (M2) забезпечує кращу відповідність дійсної $P(\varphi)$ до необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки, та одночасне регулювання її величини у відповідності до зміни товщини матеріалу, який армується.

2. Отримано функції положення ниткоподавачів, та визначені параметри нитконапрямників, а також сформовано аналітичний вираз дійсної функції подачі нитки $P(\varphi)$ з урахуванням проходження нитки через нитконапрямники G_2 - G_3 з тимчасовим контактом. Визначено вплив положення нитконапрямників контуру подачі нового механізму на амплітуду та закон подачі нитки $P(\varphi)$.

3. Встановлено, що варіювання положення нитконапрямника G_2 - G_3 дозволяє ефективно коригувати функцію подачі нитки саме в зоні утворення петлі-напуску. Це забезпечує узгодження форми із необхідною функцією подачі, зокрема за амплітудою та фазовим зсувом.

4. Здійснено оптимізаційний синтез конструкції механізму подачі нитки з використанням методу Монте-Карло. Як критерій оптимізації застосовано зважену цільову функцію, побудовану на основі регресійної моделі необхідної подачі нитки з урахуванням фазового узгодження з синхрограмою машини, визначеною в попередніх розділах. У результаті проведеного синтезу визначено раціональні геометричні параметри механізму, які забезпечують мінімальну середньоквадратичну похибку між функціями дійсної та необхідної подачі нитки в діапазоні товщин матеріалу від 0,4 до 8 мм, який зшивається.

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що застосування нового механізму забезпечує зниження пікового зусилля натягу нитки з 6,2 Н до 3,8 Н. Це свідчить про зменшення сили дії регулятора натягу нитки під час затягування стібка, що вказує на більшу його функціональність. Зростання натягу нитки під час зшивання матеріалів при переході до зон із більшою товщиною відбувається з кількох причин. По-перше, це пов'язано зі зміною положення нитконапрямника $G_1(m)$. Це призводить до збільшення кутів охоплення нитконапрямника $G_1(m)$ та ниткоподавачів Tu_1 та Tu_2 у період затягування стібка. По-друге, натяг зростає внаслідок підвищення опору з боку матеріалів, які зшиваються.

6. Встановлено, що застосування механізму подачі нитки з адаптивним регулюванням величини подачі дозволяє усунути провисання на тонких ділянках матеріалу та запобігти надмірному натягу при зшиванні зон із більшою товщиною. Це забезпечує рівномірну якість з'єднання по всій довжині шва. Отримані експериментальні дані підтверджують достовірність побудованих моделей і ефективність запропонованої конструкції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень вирішено задачу удосконалення швейних машин для виготовлення армуючих елементів композитних виробів, що дало змогу забезпечити стабільність утворення стібка за змінних технологічних умов.

2. Встановлено, що при збільшенні товщини матеріалів у 20 разів зусилля натягу нитки зростає в 4,8 раза (від 1,28 Н до 6,2 Н). Виявлено зміщення фаз проколу та виходу голки залежно від товщини матеріалу.

3. Отримано узагальнену функцію необхідної подачі нитки у вигляді поліномів 6-го порядку. Встановлено, що ваговий коефіцієнт товщини перевищує вплив довжини стібка у 1,5–2,3 раза.

4. Виявлено зниження похибки дійсної подачі нитки з 64,4 % у базовій конструкції до 9,5 % в удосконаленому механізмі.

5. Побудовано синхронізовану схему руху робочих органів удосконаленої машини, що підтвердила стабільність фаз утворення петель при варіації параметрів стібка.

6. Встановлено залежності між геометричними параметрами подаючих елементів і технологічними умовами зшивання, які забезпечують автоматизоване адаптивне керування подачею нитки.

7. Отримано раціональні параметри механізму подачі нитки в результаті синтезу методом Монте-Карло.

8. Удосконалено конструкцію механізму подачі нитки шляхом введення додаткового ниткоподавача та керованого нитконапрямника, які забезпечують автоматизоване регулювання відповідно до технологічних параметрів.

9. Розроблено класифікацію армуючих текстильних структур з поділом за способом формування елементів та за типом просторової організації (1D–3D).

10. Отримані результати можуть бути використані для проєктування та модернізації швейних машин, створення автоматизованих систем керування, виробництва армуючих текстильних елементів (преформ), а також в освітньому процесі та науково-експериментальній базі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вишняков Л. Р. Композиційні матеріали / Л. Р. Вишняков // *Енциклопедія сучасної України* : [Електрон. ресурс] / редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. - Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2014. - Режим доступу: URL: <https://esu.com.ua/article-4385>.
2. Кашицький В. П., Садова О. Л., Заболотний О. В., Малець В. М., Мазурок В. С. Розробка біокомпозитів, наповнених продуктами переробки вторинної сировини рослинного походження // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. - 2022. - № 1. - С. 95-102. - DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-95-102>.
3. Савчук П. П., Садова О. Л., Кашицький В. П., Кальба Є. М., Климовець О. Б. Дослідження властивостей біокомпозитів, наповнених дискретними волокнами природного походження // *Наукові нотатки*. - Луцьк, 2020. - Вип. 69. - С. 75-81. - DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2020.69.11>.
4. Копань В. С. Композиційні матеріали : навч. посіб. / В. С. Копань. - Київ : Університетське вид-во «Пульсари», 2004. - 200 с. : іл.
5. Стухляк П. Д., Букетов А. В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. - Тернопіль : Збруч, 2009. - 237 с.
6. Cox B. N., Flanagan G. *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites* : [Електрон. ресурс] / B. N. Cox, G. Flanagan. - Hampton, VA : NASA Langley Research Center, 1997. - 176 p. - (NASA Contractor Report ; NASA-CR-4750). - Режим доступу: URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970017583>.
7. Orlovsky B. V. Analysis of the use of machine stitches for creating 3D structures from polymer composite interior materials in aircraft construction // *Problems of Friction and Wear*. - 2019. - No. 4 (85). - P. 117-122. - DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(85\).13881](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(85).13881).
8. Wenning L., Guangming C., Xin Q. Proc. of the 38th Int. SAMPE

Symposium. - 1993. - P. 10-13.

9. Macander A. B., Crane R. M., Camponeschi E. T. Fabrication and mechanical properties of multidimensionally (X-D) braided composite materials // *Composite Materials*. - 1986. - P. 422-443.

10. Дмитрик О. М., Боброва С. Ю., Галавська Л. Є., Єліна Т. В. Дослідження розривальних характеристик комплексної пара-арамідної нитки // *Технології та інжиніринг*. - 2022. - № 6. - С. 63-71. - DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.6.6>.

11. Дмитрик О. М. Технологічні засади виготовлення на плосков'язальному обладнанні трикотажних матеріалів для захисту від механічних ушкоджень : дис. д-ра філософії : 182 - Технології легкої промисловості / Дмитрик Оксана Михайлівна ; Київський національний університет технологій та дизайну. - Київ, 2024. - 240 с.

12. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. Fiber architectures for composite applications // In: Sohel R., Raul F. (eds.) *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. - Cham : Springer, 2016. - P. 75-95.

13. Bilisik K., Sahbaz N., Bilisik N., Sahbaz Karaduman N. Fiber architectures for composite applications // *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. - Singapore : Springer, 2015. - DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2_3.

14. Rajak D. K., Pagar D. D., Kumar R., Pruncu C. I. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2019. - Vol. 8, No. 6. - P. 6354-6374. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>.

15. Chou T. W., Ko F. K. *Textile Structural Composites*. - Vol. 3. - Amsterdam : Elsevier, 1989. - 388 p.

16. Pritchard A. Presented at *First World Conference on 3D Fabrics and Their Applications*, Manchester, UK, April 2008. - Organised by TexEng Software Ltd.

17. Malik T., Parmar S. 3-D fabrics - an overview. - 2018.

18. Xiong J., Chen J., Lee P. S. Functional fibers and fabrics for soft robotics,

wearables, and human-robot interface // *Advanced Materials*. - 2020. - Vol. 33. - Art. e2002640. - DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202002640>.

19. Dong F., Yuan Q., Liu J., Qian K., Sun J., Zhang D. Impact behaviors and damage mechanisms of 2.5D woven composites: experiment and simulation // *Journal of Industrial Textiles*. - 2022. - Vol. 52. - Art. 152808372211146. - DOI: <https://doi.org/10.1177/15280837221114631>.

20. Ciobanu L. Development of 3D knitted fabrics for advanced composite materials // *Advances in Composite Materials*. - Rijeka : InTechOpen, 2011. - DOI: <https://doi.org/10.5772/14876>.

21. Chowdhury S., Tripathi L., Behera B. Review: impact resistance and damage tolerance of 3D woven composites // *Journal of Materials Science*. - 2024. - Vol. 59. - P. 1-64. - DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09643-z>.

22. Liu Y., Chou T.-W. Additive manufacturing of multidirectional preforms and composites: from three-dimensional to four-dimensional // *Materials Today Advances*. - 2020. - Vol. 5. - Art. 100045. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2019.100045>.

23. Manaia J. P., Cerejo F., Duarte J. Revolutionising textile manufacturing: a comprehensive review on 3D and 4D printing technologies // *Fashion and Textiles*. - 2023. - Vol. 10. - Art. 20. - DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00339-7>.

24. Pickett A., Erber A., von Reden T., Drechsler K. Comparison of analytical and finite element simulation of 2D braiding // *Plastics, Rubber and Composites*. - 2009. - Vol. 38, Nos 9-10. - P. 387-395.

25. Cherif C., Krzywinski S., Diestel O. et al. Development of a process chain for the realization of multilayer weft knitted fabrics showing complex 2D/3D geometries for composite applications // *Textile Research Journal*. - 2012. - Vol. 82. - P. 1195-1210.

26. Kaddaha M., Lafon P. New geometrical modelling for 2D fabric and 2.5D interlock composites // *Textiles*. - 2022. - Vol. 2. - P. 142-161. - DOI: <https://doi.org/10.3390/textiles2010008>.

27. Wan Y. Z., Zak G., Naumann S. et al. Study of 2.5-D glass-fabric-

reinforced light-curable resin composites for orthotic applications // *Composites Science and Technology*. - 2007. - Vol. 67, Iss. 13. - P. 2739-2746. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.02.010>.

28. Bilisik A. K. Multiaxial three dimensional (3D) circular woven fabric : US Patent 6 129 122. - 10 Dec 2000.

29. Mouritz A. P. Review of z-pinned composite laminates // *Composites Part A*. - 2007. - Vol. 38. - P. 2383-2397.

30. Dow N. F. Triaxial fabric : US Patent 3 446 251. - 06 May 1969.

31. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: a review // *Textile Research Journal*. - 2012. - Vol. 82, No. 7. - P. 725-743. - DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517511435013>.

32. Bilisik K. Multiaxis three dimensional (3D) flat woven fabric and weaving method: feasibility of prototype tube carrier weaving // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. - 2009. - Vol. 17, No. 6. - P. 63-69.

33. Bilisik K. Multiaxis three dimensional (3D) woven fabric. - 2011. - DOI: <https://doi.org/10.5772/16530>.

34. Dell'Anno G., Treiber J. W. G., Partridge I. K. Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. - 2016. - Vol. 37. - P. 262-272.

35. Ниткові з'єднування швейних виробів. Частина 1 : навч. посіб. / Л. А. Бакан, Л. Б. Білоцька, С. Ю. Лозовенко, Т. О. Полька. - Київ : КНУТД, 2017. - 212 с. - ISBN 978-966-7972-92-9.

36. Mohamed M. H., Zhang Z. Method of forming variable cross-sectional shaped three-dimensional fabrics : US Patent 5 085 252. - 04 Feb 1992.

37. Yang H. et al. Continuous and rapid production of three-dimensional woven fabric preforms using a new weaving technique // *Functional Composites and Structures*. - 2020. - Vol. 2, No. 1. - Art. 015005.

38. Inter-Composite : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: URL: <https://inter-composite.com>.

39. Widemuth J. TU Dresden SFB 639 programme objectives : [Електрон.

ресурс]. - Режим доступу: URL: http://www.tu-dresden.de/forschung/forschungskompetenz/sonderforschungsbereiche/sfb639/programm/inhalte_programm_de/ziele/document_view?set_language=en.

40. Juillard N., Vermeersch O., Lévesque J. et al. 3D woven uniform density dry preforms for the aerospace industry // *Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials*. - 2017.

41. Gnaba I., Legrand X., Wang P., Soulat D. Through-the-thickness reinforcement for composite structures: a review // *Journal of Industrial Textiles*. - 2019. - DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083718772299>.

42. Trümper W., Lin H., Callin T. et al. Recent developments in multi-layer flat knitting technology for waste free production of complex shaped 3D-reinforcing structures for composites // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - 2016. - Vol. 141. - Art. 012015. - DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/141/1/012015>.

43. Дмитрик О. М., Галавська Л. Є. Вплив технологічних факторів одержання трикотажу з високоміцних ниток на форму петель та параметри його структури // *Технології та інжиніринг*. - 2023. - № 5. - С. 76-85. - DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.6>.

44. Malik T., Parmar S. 3-D fabrics - an overview. - 2018. - Режим доступу: URL: https://www.researchgate.net/publication/326508034_3-D_FABRICS-An_Overview_3-D_FABRICS-An_Overview.

45. Ji C. et al. Impact damage of 3D orthogonal woven composite circular plates // *Applied Composite Materials*. - 2007. - Vol. 14. - P. 343-362.

46. Complex three dimensional-shaped knitting preforms for composite application // *Journal of Industrial Textiles*. - 2017. - Vol. 46. - DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083715624260>.

47. Rana S., Figueiro R. *Braided Structures and Composites: Production, Properties, Mechanics and Technical Applications*. - Boca Raton : CRC Press, 2015. - 396 p.

48. Wilden K. S., Harris C. G., Flynn B. W. et al. Advanced technology

composite fuselage-manufacturing. - *NASA Contractor Report 4735*. - The Boeing Company, 1997.

49. Fiber Innovations Inc. Technical documents. - 08 Jan 2002.

50. Ameta G., Brown C., Lubell J., Lipman R. A survey of standards for product lifecycle management of structural composites // *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. - 2013. - Vol. 2. - DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2013-12655>.

51. Carey J., Ayranci C. Processing and performance of braided composites // In: Nicolais L., Borzacchiello A. (eds.) *Wiley Encyclopedia of Composites*. - New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. - P. 2427-2437.

52. Yang J. M. Processing and performance of 3-D composites // In: *International Encyclopedia of Composites*. - Vol. 4. - New York : VCH Publishers, 1990. - P. 449-463.

53. Mouritz A. P., Bannister M. K., Falzon P. J., Leong K. H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 1999. - Vol. 30, No. 12. - P. 1445-1461.

54. Bilisik K. Three dimensional (3D) axial braided preforms: experimental determination of effects of structure-process parameters on unit cell // *Textile Research Journal*. - 2011. - Vol. 81. - P. 2095-2116.

55. Legrand X. Courses of composite material. - 3rd year of engineering cycle, ENSAIT-Roubaix, France, 2015.

56. Song Y. Évaluation de l'apport simultané des coutures sur la perméabilité des préformes cousues et sur les performances mécaniques des structures composites cousues : PhD Thesis. - Université de Technologie de Compiègne, 2015.

57. Dell'Anno G. Effect of tufting on the mechanical behaviour of carbon fabric/epoxy composites : PhD dissertation. - Cranfield University, UK, 2007.

58. Wittig. In-mold-reinforcement of preforms by 3-dimensional tufting // *Proceedings of the 47th International SAMPE Symposium and Exhibition*. - Long Beach, CA : SAMPE, 2002. - 12-16 May.

59. ISO 4916:1991. *Textiles - Seam types - Classification and terminology*. -

Geneva : International Organization for Standardization, 1991. - 13 p.

60. DSTU ISO 4915:2015. *Textile materials - Types of seams* : Національний стандарт України. - Київ : Мінекономрозвитку України, 2016. - 24 с.

61. Manoilenko O. Topological analysis and synthesis of machine chain stitches // *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*. - 2020. - Vol. 27, No. 4. - P. 58-69. - Режим доступу: URL: http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_8.pdf.

62. Scardino F. An introduction to textile structures and their behaviour // In: Chou T. W., Ko F. K. (eds.) *Textile Structural Composites*. - Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V., 1989. - Vol. 3. - P. 1-24. - ISBN 0-444-42992-1.

63. Tong L., Mouritz A. P., Bannister M. K. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. - Amsterdam : Elsevier, 2021. - 241 p. - ISBN: 9780080525822.

64. Donetsk K. I., Raskutin A. E., Hilov P. A. et al. Volumetric textile preforms used in the production of composite materials // *Proceedings of VIAM*. - Donetsk, 2015. - No. 9. - P. 77-85.

65. Bezugliy D. M., Manoilenko O. P. 3D frame textile products and their application // *Abstracts of the 5th International Scientific and Practical Conference "Mechatronic Systems: Innovations and Engineering"*. - Kyiv : KNUTD, 2022. - P. 113-114. - Режим доступу: URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19221/1/MSIE_2021_P113-114.pdf.

66. Muñoz R., Martínez V., Sket F. et al. Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2014. - Vol. 59. - P. 93-104. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.01.003>.

67. Stig F., Hallström S. A modelling framework for composites containing 3D reinforcement // *Composite Structures*. - 2012. - Vol. 94, No. 9. - P. 2895-2901. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.009>.

68. Brosius D., Clark S. Textile preformation technologies for low-cost composite structures // *Advanced Composite Materials: New Developments and Applications Conf.* - Detroit, USA, 30 Sept - 3 Oct 1991. - P. 1-10.

69. Ali M., Kausar F., Shahid S. et al. Novel derivatives of 3D woven T-

shaped composites with improved performance // *The Journal of The Textile Institute*.
 - 2019. - Vol. 110, No. 2. - P. 267-273. - DOI:
<https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1480914>.

70. Stig F., Hallström S. A modelling framework for composites containing 3D reinforcement // *Composite Structures*. - 2012. - Vol. 94, Iss. 9. - P. 2895-2901. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.009>.

71. Ogale V., Alagirusamy R. Textile preforms for advanced composites // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. - 2004. - Vol. 29, No. 3. - P. 366-375. -
 Режим доступа: URL:
<https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/24648/1/IJFTR%2029%283%29%20366-375.pdf>.

72. Stig F., Hallström S. Effects of crimp and textile architecture on the stiffness and strength of composites with 3D reinforcement // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2019. - Article ID 8439530. - P. 1-8. - DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8439530>.

73. Kamiya R. et al. Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review // *Composites Science and Technology*. - 2000. - Vol. 60, No. 1. - P. 33-47.

74. Chen X. *Advances in 3D Textiles*. - Amsterdam : Elsevier, 2015. - 336 p.

75. Chen X., Taylor L. W., Tsai L.-J. An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites // *Textile Research Journal*. - 2011. - Vol. 81, No. 9. - P. 932-944.

76. Hao A. et al. Dynamic properties of 3-D orthogonal woven composite T-beam under transverse impact // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2008. - Vol. 39, No. 7. - P. 1073-1082.

77. Moaveni R., Ajeli S., Minapoor S. Experimental study and simulation of non-crimp 3D orthogonal composite shafts during torsional load // *Journal of Industrial Textiles*. - 2022. - Vol. 51. - Article ID: 152808372210893. - DOI: <https://doi.org/10.1177/15280837221089317>

78. Luo Y. et al. Transverse impact behavior and energy absorption of three-

dimensional orthogonal hybrid woven composites // *Composite Structures*. - 2007. - Vol. 81, No. 2. - P. 202-209.

79. Yan L., Chouw N., Jayaraman K. Flax fibre and its composites - a review // *Composites Part B: Engineering*. - 2014. - Vol. 56. - P. 296-317.

80. Gerlach R. et al. In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading // *Composites Science and Technology*. - 2012. - Vol. 72, No. 3. - P. 397-411.

81. Wang P., Legrand X., Soulat D. et al. Experimental and numerical analyses of manufacturing process of a composite square box part: comparison between textile reinforcement forming and surface 3D weaving // *Composites Part B: Engineering*. - 2015. - Vol. 78. - P. 26-34.

82. Wang P., Legrand X., Soulat D. Investigation about the manufacturing technique of the composite corner fitting part // *AUTEX Research Journal*. - 2014. - Vol. 14, No. 2. - P. 111-120.

83. Wu R., Zhou Y., Deng B. et al. Automatic structure synthesis for 3D woven relief // *ACM Transactions on Graphics*. - 2020. - Vol. 39, No. 4. - Art. 102.

84. Schegner P., Schemmann P., Roemer M. et al. Technology development for direct weaving of complex 3D nodal structures // *Applied Composite Materials*. - 2019. - Vol. 26, No. 1. - P. 423-432.

85. Lu S., Wang P., Soulat D. et al. Design and manufacture of 3D rectangular box-shaped fabrics // *Journal of Industrial Textiles*. - 2018. - Vol. 47, No. 6. - P. 1212-1225.

86. Sayem A., Kennon W., Clarke N. Developments in seamless garments // *International Journal of Clothing Science and Technology*. - 2011. - Vol. 22, No. 11.

87. Behera B. K., Kamble Z. Advanced 3D woven profile structures and their composites for automotive applications // *Polymer Composites*. - 2022. - Vol. 43, No. 9. - P. 5946-5953.

88. Layng K., Xu X., Höllerer T. et al. CAVE: making collective virtual narrative // *ACM SIGGRAPH 2019 Art Gallery*. - 2019. - P. 1-8.

89. Yang H. J., Kim D., Kang K. M., Yu W.-R. Manufacturing seamless three-

dimensional woven preforms with complex shapes based on a new weaving technology // *Heliyon*. - 2024. - Vol. 10, No. 1. - Art. e24121. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24121>.

90. Ogale A., Mitschang P. Tailoring of textile preforms for fibre-reinforced polymer composites // *Journal of Industrial Textiles*. - 2004. - Vol. 34. - P. 77-96. - DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083704046949>.

91. Mountasir A., Hoffmann G., Cherif Ch., Kunadt A., Fischer W. J. Mechanical characterization of hybrid-yarn thermoplastic composites from multi-layer woven fabrics with function integration // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. - 2011. - DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705711412814>.

92. Torun A. R., Hoffmann G., Mountasir A., Cherif Ch. Effect of twisting on mechanical properties of GF/PP commingled hybrid yarns and UD-composites // *Journal of Applied Polymer Science*. - 2011. - DOI: <https://doi.org/10.1002/app.34458>.

93. Widemuth J. TU Dresden SFB 639 programme objectives : [Электрон. ресурс]. - Режим доступа: URL: http://www.tu-dresden.de/forschung/forschungskompetenz/sonderforschungsbereiche/sfb639/programm/inhalte_programm_de/ziele/document_view?set_language=en.

94. Préau M., Treiber J. W. G., Partridge I. K. Comportement et endommagement d'un raidisseur carbone/époxy renforcé par tufting // *Proceedings of 17e Journées Nationales sur les Composites*. - 2011.

95. Dransfield K., Baillie C., Mai Y. W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching: a review // *Composites Science and Technology*. - 1994. - Vol. 50. - P. 305-317.

96. Mouritz A. P., Cox B. N. Mechanistic approach to the properties of stitched laminates // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2000. - Vol. 31. - P. 1-27.

97. Lefebvre M., Boussu F., Coutelier D. Influence of high-performance yarn degradation inside three-dimensional warp-interlock fabric // *Journal of Industrial Textiles*. - 2013. - Vol. 42. - P. 475-488.

98. Tan K. T., Watanabe N., Iwahori Y. Stitch fibre comparison for

improvement of interlaminar fracture toughness in stitched composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. - 2011. - Vol. 30. - P. 99-109.

99. Hu J. *Handbook on the 3D Fibrous Assemblies: Properties, Applications and Modelling of Three-Dimensional Textile Structures*. - Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. - 420 p.

100. Mungalov D., Roudaruiviri A. Automated 3-D braiding machine and method : US Patent 6 434 085 B1. - 27 Aug 2002.

101. Wu L., Gu B. Fatigue behaviours of four-step three-dimensional braided composite material: a meso-scale approach computation // *Textile Research Journal*. - 2014. - Vol. 84, No. 18. - P. 1915-1930.

102. Fang G., Liang J. A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites // *Journal of Composite Materials*. - 2011. - Vol. 45, No. 23. - P. 2415-2436.

103. Petermann J., Plumtree A. Unified fatigue failure criterion for unidirectional laminates // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2001. - Vol. 32, No. 1. - P. 107-118.

104. Mouritz A. P. Review of z-pinned composite laminates // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2007. - Vol. 38. - P. 2383-2397.

105. Cartié D. D. R., Dell'Anno G., Poulin E. et al. 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by z-pinning and tufting // *Engineering Fracture Mechanics*. - 2006. - Vol. 73. - P. 2532-2540.

106. Chang P., Mouritz A. P., Cox B. N. Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2006. - Vol. 37. - P. 1501-1513.

107. Partridge I. K., Cartié D. D. R. Delamination-resistant laminates by Z-Fiber pinning: part I. Manufacture and fracture performance // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2005. - Vol. 36. - P. 55-64.

108. Liu H. Y., Yan W., Yu X. Y. et al. Experimental study on z-pinned DCB mode I delamination // In: *Proceedings of the International Conference on Structural Integrity and Fracture*. - 2004. - P. 26-29.

109. Cartié D. D. R., Cox B. N., Fleck N. A. Mechanisms of crack bridging by composite and metallic rods // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2004. - Vol. 35. - P. 1325-1336.
110. Abeysooriya R. P., Wickramasinghe G. L. D. Regression model to predict thread consumption incorporating thread-tension constraint: study on lock-stitch 301 and chain-stitch 401 // *Fashion and Textiles*. - 2014. - Vol. 1, No. 1. - Art. 14. - DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-014-0014-5>.
111. Rasheed A., Sheraz A., Nauman A. et al. Geometrical model to calculate the consumption of sewing thread for 504 over-edge stitch // *Journal of the Textile Institute*. - 2018. - Vol. 109, No. 11. - P. 1418-1423. - DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1423902>.
112. Reis L. M. M., Ribeiro M. L., Madureira F. et al. Mechanical properties and failure mode of 3D stitched composites // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2024. - Vol. 29. - P. 90-100. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.283>.
113. Plain K. P., Tong L. Mode I and II fracture toughness of laminates stitched with a one-sided stitching technique // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2011. - Vol. 42, No. 2. - P. 203-210. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.11.006>.
114. Mouritz A. P. Flexural properties of stitched GRP laminates // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 1996. - Vol. 27, No. 7. - P. 525-530. - DOI: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00010-3](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00010-3).
115. Fristedt T. Novel fiber placement technologies for composite applications // *Tailored Fiber Placement*. - 2012. - Режим доступа: URL: <https://www.tailoredfiberplacement.com/laystitch-acce-2012.pdf>.
116. Nie J., Xu Y., Zhang L. et al. Effect of stitch spacing on mechanical properties of carbon/silicon-carbide composites // *Composites Science and Technology*. - 2008. - Vol. 68, No. 12. - P. 2425-2432. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.04.012>.
117. Kaya G., Soutis C., Potluri P. Flexural behaviour of unreinforced and Z-

fibre-reinforced 3D carbon/epoxy composites // *Applied Composite Materials*. - 2021.
- DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09949-0>.

118. Malik T., Parmar S. 3-D fabrics - an overview. - 2007. - Режим доступу:
URL: <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/1715/3-d-fabrics-an-overview>.

119. Karvatskii A. Ya. *Finite element method in problems of mechanics of continuous media. Laboratory practicum* (Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ) : навч. посіб. - Kyiv : NTUU "Igor Sikorsky KPI", 2020. - 428 с.

120. Dzyuba V. I. *Scientific basis of automated design of working processes of knitting machines. Object-oriented approach* (Наукові основи автоматизованого проектування робочих процесів трикотажних машин. Об'єктно-орієнтований підхід). - Kyiv : KDUTD, 2000. - 185 с.

121. Orlovsky B. V., Tropsha D. A. Basic principles of object-oriented design of work processes and machines of light industry // *Visnyk DALPU*. - 2000. - No. 2. - P. 44-51.

122. Shcherban V. Yu., Shcherban Yu. Yu., Kolysko O. Z. et al. *Basic CAD software in the fashion industry*. - Kyiv : Education of Ukraine, 2018. - 902 p. - ISBN 978-617-7625-44-4.

123. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M., Kalashnyk V. Warp yarn tension during fabric formation // *Vlákná a textil (Fibres and Textiles)*. - 2018. - Vol. 25, No. 2. - P. 97-104.

124. Shcherban V., Melnyk G., Sholudko M. et al. Yarn tension while knitting textile fabric // *Vlákná a textil (Fibres and Textiles)*. - 2018. - Vol. 25, No. 3. - P. 74-83.

125. Guyader G., Gabor A., Hamelin P. Analysis of 2D and 3D circular braiding processes: modeling the interaction between the process parameters and the pre-form architecture // *Mechanism and Machine Theory*. - 2013. - Vol. 69. - P. 90-104.

126. Kessels J. F. A., Akkerman R. Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

- 2002. - Vol. 33, No. 8. - P. 1073-1081.

127. Zhang Q., Beale D., Broughton R. M. Analysis of circular braiding process. Part 2: mechanics analysis // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. - 1999. - Vol. 121, No. 3. - P. 351-359.

128. Zhang Q., Beale D., Broughton R. M. Analysis of circular braiding process. Part 1: theoretical investigation of kinematics // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. - 1999. - Vol. 121, No. 3. - P. 345-350.

129. Du G. W., Popper P. Analysis of a circular braiding process for complex shapes // *Journal of the Textile Institute*. - 1994. - P. 316-337.

130. Rawal A., Potluri P., Steele C. Prediction of yarn paths in braided structures formed on a square pyramid // *Journal of Industrial Textiles*. - 2005. - Vol. 35, No. 2. - P. 115-135.

131. Potluri P., Manan A. Mechanics of non-orthogonally interlaced textile composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2003. - Vol. 34. - P. 481-492.

132. Березненко С. М. Основи теорії ресурсозберігаючих технологічних процесів формування і формозакріплення деталей одягу з врахуванням анізотропії текстильних матеріалів : дис. д-ра техн. наук. - Київ : КНУТД, 2002.

133. Кострицький В. В. Методика і випробувальна установка на дослідження динамічних властивостей полімерних плівкових матеріалів і волокон // *Заводська лабораторія*. - 1990. - № 5. - С. 38-42.

134. Садретдінова Н. В. Удосконалення процесів дублювання та забезпечення формостійкості деталей одягу із лляних тканин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.04 / Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. - Київ, 2005. - 21 с. : рис., табл.

135. Jinzhifeng (Tianjin) Automation Technology Co., Ltd. Jinzhifeng Automation Technology : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: URL: <http://www.jzf-tj.com/en/>.

136. HeBei QingGong Sewing Machine Co., Ltd. HeBei QingGong Sewing Machine Co., Ltd. : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: URL:

<https://www.qgfr.com/en/>.

137. Malek S., Khedher F., Adolphe D. C., Jaouachi B. Sewing thread consumption for chain stitches of class 400 using geometrical and multilinear regression models // *AUTEX Research Journal*. - 2021. - Vol. 21, No. 1. - DOI: <https://doi.org/10.2478/aut-2019-0051>.

138. Rehman A., Rasheed A., Javed Z. et al. Geometrical model to determine sewing thread consumption for stitch class 406 // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. - 2021. - Vol. 29, No. 6. - P. 72-76. - DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2726>.

139. Пищиков В. О. Проектування швейних машин. - Київ : Формат, 2007. - 320 с.

140. Орловський Б. В., Абрінова Н. С. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво). - Київ : КНУТД, 2013. - 285 с.

141. Orlovsky B. V., Manoilenko O. P., Bezuhlyi D. M. Object-oriented analysis of frame 3D textile structures // *Journal of Engineering Sciences*. - 2023. - Vol. 9, No 1. - P. 1-5. - DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).c4).

142. McDonnell C., Hayes S., Potluri P. Investigation into the tensile properties of ISO-401 double-thread chain-stitched glass-fibre composites // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. - 2021. - Vol. 4, No 2. - P. 203-209. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.11.001>.

143. Velmurugan R., Solaimurugan S. Improvements in Mode I interlaminar fracture toughness and in-plane mechanical properties of stitched glass/polyester composites // *Composites Science and Technology*. - 2007. - Vol. 67, No 1. - P. 61-69. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.032>.

144. Dransfield K. A., Jain L. K., Mai Y. W. On the effects of stitching in CFRPs - I. Mode I delamination toughness // *Composites Science and Technology*. - 1998. - Vol. 58, No 6. - P. 815-827. - DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00229-7).

145. Wood M. D. K., Sun X., Tong L., Katzos A., Rispler A. R., Mai Y. W. The effect of stitch distribution on Mode I delamination toughness of stitched

laminated composites - experimental results and FEA simulation // *Composites Science and Technology*. - 2007. - Vol. 67, No 6. - P. 1058-1072. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.002>.

146. Hui C., Chen C., Legrand X., Wang P. Investigation of the interlaminar shear performance of tufted preforms and composites under Mode II loading condition // *Polymers*. - 2022. - Vol. 14, No 4. - P. 1-13. - DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040690>.

147. Mouritz A. P., Cox B. N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2010. - Vol. 41, No 6. - P. 709-728. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.001>.

148. Song W., Liu T., Song C. et al. Effects of stitching yarn types on flexural fatigue properties of 3D stitched carbon fiber composites // *Polymer Testing*. - 2022. - Vol. 115. - Art. 107744. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107744>.

149. Lee B., Herszberg I., Bannister M. K., Curiskis J. I. The effect of weft binder path length on the architecture of multi-layer woven carbon preforms // *Textile Composites and Characterisation*. - 1997. - Vol. 5. - P. 260-269. - Режим доступу: URL: https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM11proceedings/papers/ICCM11_V5_27.pdf.

150. Wang P., Legrand X., Soulat D. Three-dimensional textile preform using advanced textile technologies for composite manufacturing // In: *Textiles for Advanced Applications*. - 2017. - P. 161-189. - DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.68175>.

151. Jaouachi B., Khedher F. Effect of compressional behaviour and sewing-machine foot pressure on sewing-thread consumption // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*. - 2021. - Vol. 46. - P. 325-332.

152. Щербань В. Ю. *Механіка нитки*. - Київ : Укрбланковидав, 2012. - 533 с.

153. Безрядін В. М., Дворжак В. М. Дослідження двокривошипного чотириланкового механізму ниткопритягувача швейної машини // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні*

науки. - 2017. - № 6 (116). - С. 26-34.

154. Орловський Б. В., Дворжак В. М., Радченко Є. С. Метричний синтез оберненого кулісного механізму ниткопритягувача швейної машини // *Технології та дизайн*. - 2011. - № 1.

155. Орловський Б. В., Дворжак В. М., Радченко Є. С. Метричний синтез оберненого кулісного механізму ниткопритягувача швейної машини // *Технології та дизайн*. - 2012. - № 1 (2).

156. Гудим А. Г., Манойленко О. П. Визначення функції дійсної подачі ідеальної нитки човникових швейних машин // *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг*. - Київ : КНУТД, 2023. - С. 83-84.

157. Манойленко О. П., Горобець В. А. Дослідження процесу ниткоподачі нитки швейних машин потайного одноститкового ланцюгового стібка // *Технології та дизайн*. - 2011. - № 1. - Режим доступу: URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/2895/1/td_2011_N1_05.pdf.

158. Горобець В. А., Манойленко О. П. Діаграми подачі верхньої нитки при утворенні стібків класу 400 з урахуванням її деформації // *Вісник КНУТД*. - 2007. - № 2 (34). - С. 21-24.

159. Горобець В. А., Манойленко О. П. Діаграми подачі верхньої нитки при утворенні стібків класу 400 з урахуванням її деформації // *Вісник КНУТД*. - 2007. - № 3 (35). - С. 16-22.

160. Manoilenko O. P., Horobets V., Dvorzhak V. et al. Research of variable parameters of needle thread take-up mechanisms and development of recommendations for adjusting multi-thread chain-stitch sewing machines // *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*. - 2023. - Vol. 30, No 5. - P. 52-60.

161. Manoilenko O., Dvorzhak V., Horobets V., Panasiuk I., Assessing the impact of sewing-machine thread take-up-mechanism parameters on the magnitude and nature of thread take-up // *Engineering Technological Systems*. - 2024. - Vol. 6, No 1 (132). - P. 64-75. - DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315129>.

162. Манойленко О. П. *Розробка механізмів подачі голкової нитки сточувальних машин ланцюгового стібка* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. -

Київ : КНУТД, 2008.

163. Манойленко О. П., Горобець В. А., Дворжак В. М. та ін. Аналітичний огляд та розроблення класифікації механізмів подачі голкових ниток швейних машин ланцюгового стібка // *Технології та інженерінг*. - 2022. - № 4 (9). - С. 35-47. - DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.3>.

164. Глобенко С. М. *Розробка машини для зшивання пакетів з гофрованими середніми шарами* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Київ : КНУТД, 1984. - 20 с.

165. Горобець В. А., Манойленко О. П., Дворжак В. М. Аналіз взаємодії робочих органів швейної машини потайного ланцюгового стібка. Повідомлення 1 // *Вісник КНУТД*. - 2010. - Т. 4, № 5. - С. 29-33.

166. Горобець В. А., Манойленко О. П., Дворжак В. М. Аналіз взаємодії робочих органів швейної машини потайного ланцюгового стібка. Повідомлення 2 // *Вісник КНУТД*. - 2011. - № 3. - С. 9-16.

167. Горобець В. А., Манойленко О. П. Новий спосіб утворення плоского ланцюгового стібка та визначення параметрів робочих органів // *Вісник КНУТД. Технічні науки*. - 2016. - № 6 (104). - С. 34-46.

168. Горобець В. А., Манойленко О. П. Оптимізаційний синтез механізмів подачі нитки сточувальних машин ланцюгового стібка // *Вісник КНУТД*. - 2008. - № 1. - С. 72-77.

169. Дворжак В. М. Аналітичне дослідження динаміки типових кулісних механізмів технологічних машин легкої промисловості // *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. - 2018. - № 3 (122). - С. 9-18.

170. Єгоров В. В. *Розробка машини двониткового ланцюгового стібка з реверсивним переміщенням матеріалів* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Київ : КТІЛП, 1983. - 20 с.

171. Манойленко О. П. Проектування механізмів швейних машин для реалізації триниткового ланцюгового зигзагоподібного стібка // *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. - 2015. - № 6 (92). - С. 91-99.

172. Пищиков В. О., Орловський Б. В. *Проектування швейних машин* :

навч. посіб. - Київ : Формат, 2007. - 320 с.

173. Боброва С. Ю., Дмитрик О. М., Галавська Л. Є., Єліна Т. В. Розривальні характеристики комплексної поліетиленової нитки // *Технології та інженіринг*. - 2021. - № 4. - С. 51-59. - DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.5>.

174. Машенцев С. В. *Розробка петлеутворюючих механізмів машин двониткового ланцюгового зигзаг-стібка* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Київ : КНУТД, 1985. - 24 с.

175. Горобець В. А. *Аналіз і синтез механізмів голки та петлителя машин багатониткового плоского ланцюгового стібка* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Київ : КТІЛП, 1980. - 20 с.

176. HBQG Sewing Equipment Manufacturer. - Режим доступу: URL: <http://en.hbqg.net/>

177. Jocky Sewing Machine Co., Ltd. - Режим доступу: URL: <https://www.jockytech.com/>

178. Горобець В. А., Манойленко О. П., Сисенко І. В. До питання синтезу багатоланкових механізмів з масивною веденою ланкою // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки*. - 2017. - № 1 (245). - С. 16-23. - Режим доступу: URL: https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/9462/7/VHNU_2017_1%28245%29.pdf

179. Манойленко О. П., Горобець В. А., Дворжак В. М., Писаренко Д. Д., Билик К. А. Аналітичний огляд та розроблення класифікації механізмів подачі голкових ниток швейних машин ланцюгового стібка // *Технології та інженіринг*. - 2022. - № 4 (9). - С. 35-47. - DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.3>

180. Горобець В. А., Дворжак В. М. Аналітичне дослідження динаміки типових двокривошипних механізмів технологічних машин легкої промисловості // *Вісник КНУТД. Технічні науки*. - 2018. - № 5. - С. 33-39.

181. Дворжак В. М., Орловський Б. В., Петрів Б. М., Залюбовський М. Г. Схемотехнічне моделювання механізмів основов'язальних машин зі

структурними групами III класу. Повідомлення 1 // *Технології та дизайн*. - 2012.
 - № 4 (5). - Режим доступу: URL:
https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/2830/1/td_2012_N4_08.pdf

182. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Метод найменших квадратів // У: *Вища математика в прикладах і задачах*. - 2-ге вид. - Київ : Центр учбової літератури, 2009. - С. 358. - 594 с.

183. Карташов М. В. *Імовірність, процеси, статистика: Посібник*. - Київ : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. - Режим доступу: URL: https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/VPS_Pv.pdf

184. PJSC "Kyiv Cardboard and Paper Mill". *Papir*. - Режим доступу: URL: <https://www.papir.kiev.ua/>

185. Degtyarov A. V., Kokodiy M. G., Maslov V. O., Timanyuk V. O. Setting up the experiment and processing the results: A study guide for students of physical specialties of higher educational institutions. - Kharkiv: V. N. Karazin KhNU, 2017. - Режим доступу: URL: http://quant.univer.kharkov.ua/pdf/Metod_5.pdf

186. Важинський С. Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. / С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми : СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.

187. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Метод найменших квадратів // У: *Вища математика в прикладах і задачах*. - 2-ге вид. - Київ : Центр учбової літератури, 2009. - С. 358. - 594 с.

188. Koncer P., Gürarda A., Kaplangiray B., Kanik M. The effects of sewing thread properties on the needle thread tension in an industrial sewing machine [Електронний ресурс] // *Tekstil ve Konfeksiyon*. – 2014. – Vol. 24, No. 2. – С. 145–150.
 – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/283692984_The_effects_of_sewing_thread_properties_on_the_needle_thread_tension_in_an_industrial_sewing_machine

189. Coats. Thread Consumption Reference Chart [Електронний ресурс] // coats.com. – Режим доступу: https://cdn.coats.com/wp-content/uploads/Thread-Consumption-Guide_tcm35-166622.pdf

190. Apparel Merchandising Learner. Sewing Thread Consumption [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://apparelmerchandisinglearner.blogspot.com/2017/05/sewing-thread-consumption.html>

191. Textile Calculator. Sewing Thread Ratio Calculator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://textilecalculator.com/sewing-thread-ratio-calculator>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**Аналітичні вирази функцій положення робочих органів, розраховані в
Mathcad**

Додаток А 1

Аналітичні вирази функцій положення механізму голки та подачі нитки
нової конструкції швейної машини GK-9-2

Функція користувача:

ORIGIN := 1

X := 1, Y := 2, Z := 3

$$T_Z(\alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ort}(r) := \frac{r}{|r|}$$

$$\rho_Z(r_1, \alpha, \text{mod_r}_2) := T_Z(\alpha) \cdot \text{Ort}(r_1) \cdot \text{mod_r}_2$$

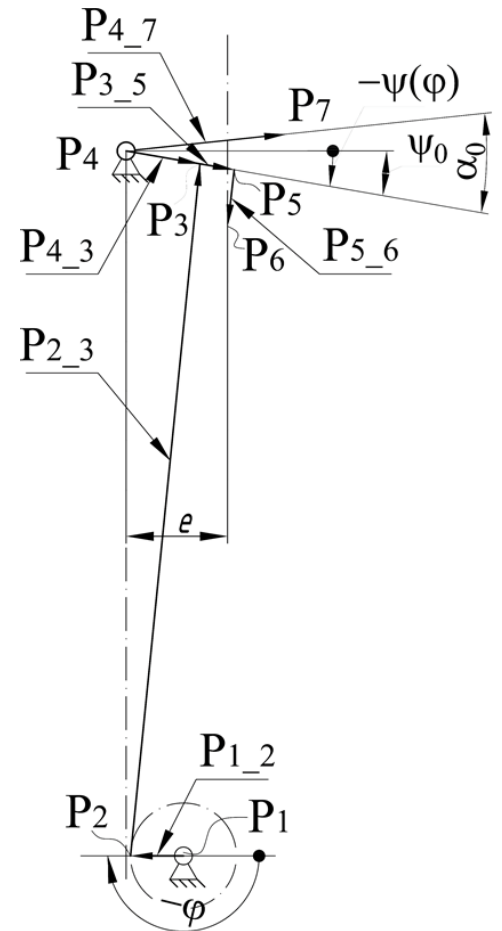
$$\rho_Z(r_1, \alpha, \text{mod_r}_2) := T_Z(\alpha) \cdot \text{Ort}(r_1) \cdot \text{mod_r}_2$$

$$e_Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad e_X := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\text{Kut}(L_1, L_2, L_3) := \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right)$$

$$r'(r, \alpha) := \begin{bmatrix} \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_X) \\ \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_Y) \\ \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_Z) \end{bmatrix} \quad r''(r, \alpha) := \begin{bmatrix} \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_X) \\ \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_Y) \\ \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_Z) \end{bmatrix}$$

$$\phi'(r, r') := \frac{\text{Ort}(r) \times r'}{|r|}$$

Рис. А 1.1 Розрохункова
векторна схема механізму
голки подачі нитки нової
конструкції

$$\begin{aligned}
\text{Повзув}_Z(P_1, P_2, P_3, L_{1_4}, P) &:= \left\{ \begin{array}{l} P_{1_2} \leftarrow P_2 - P_1 \\ P_{2_3} \leftarrow P_3 - P_2 \\ L_{1_5} \leftarrow (P_{1_2} \times \text{Ort}(P_{2_3}))_Z \\ P_{1_5} \leftarrow \rho_Z(P_{2_3}, -\text{sign}(L_{1_5}) \cdot 90^\circ, |L_{1_5}|) \\ U_{4_1_5} \leftarrow \arccos\left(\frac{|L_{1_5}|}{L_{1_4}}\right) \\ P_{1_4} \leftarrow \begin{cases} \rho_Z(P_{1_5}, -\text{sign}(L_{1_5}) \cdot U_{4_1_5}, L_{1_4}) & \text{if } P = P_2 \\ \rho_Z(P_{1_5}, \text{sign}(L_{1_5}) \cdot U_{4_1_5}, L_{1_4}) & \text{if } P = P_3 \end{cases} \\ P_4 \leftarrow P_1 + P_{1_4} \end{array} \right. \\
P_{\text{Перетн}}(P_1, P_2, P_3, P_4) &:= \left[\begin{array}{c} \frac{(P_{4_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{3_Y} - P_{4_X} \cdot P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{4_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{2_Y} - P_{3_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{4_X} \cdot P_{1_Y} \cdot P_{2_X} + P_{3_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{2_Y} + P_{3_X} \cdot P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{3_X} \cdot P_{1_Y} \cdot P_{2_X})}{(-P_{2_Y} \cdot P_{4_X} + P_{2_Y} \cdot P_{3_X} + P_{1_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} + P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{3_Y})} \\ \frac{(P_{2_Y} \cdot P_{3_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_Y} \cdot P_{3_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_Y} \cdot P_{3_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_X} \cdot P_{2_Y} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{2_Y} \cdot P_{3_Y} + P_{1_Y} \cdot P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{1_Y} \cdot P_{2_X} \cdot P_{3_Y})}{(-P_{2_Y} \cdot P_{4_X} + P_{2_Y} \cdot P_{3_X} + P_{1_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} + P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{3_Y})} \\ 0 \end{array} \right]
\end{aligned}$$

Вихідні параметри механізму

$$P_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{mm} \quad P_4 := \begin{pmatrix} -13 \\ 160 \\ 0 \end{pmatrix} \text{mm} \quad N_1 := \begin{pmatrix} P_{4_X} + 23\text{mm} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad N_2 := \begin{pmatrix} P_{4_X} + 23\text{mm} \\ 160\text{mm} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$L_{1_2} := 12\text{mm}, \quad L_{2_3} := 160\text{mm}, \quad L_{4_3} := 18\text{mm}, \quad L_{4_5} := 24\text{mm}, \quad \text{Kut}_{3_4_5} := 0^\circ,$$

$$W_{2_3_4} := -1, \quad L_{5_6} := 13\text{mm}$$

$$\text{Rotation}_{1_2} := -1, \quad \omega_{1_2} := \text{Rotation}_{1_2} \cdot 1\text{s}^{-1}, \quad \varepsilon_{1_2} := 0\text{s}^{-2}, \quad \text{Position}_{1_2} := 360$$

$$\varphi_{1_2_min} := 90\text{deg}, \quad \varphi_{1_2_max} := \varphi_{1_2_min} + \text{Rotation}_{1_2} \cdot 360^\circ,$$

$$\Delta\varphi_{1_2} := \frac{\varphi_{1_2_max} - \varphi_{1_2_min}}{\text{Position}_{1_2}} \quad \varphi_{1_2} := \varphi_{1_2_min}, \varphi_{1_2_min} + \Delta\varphi_{1_2} \dots \varphi_{1_2_max}$$

Розрахунок положення кінематичних пар

$$P_{1_2}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(e_X, \varphi_{1_2}, L_{1_2})$$

$$P_2(\varphi_{1_2}) := P_1 + P_{1_2}(\varphi_{1_2})$$

$$P_{4_2}(\varphi_{1_2}) := P_2(\varphi_{1_2}) - P_4$$

$$\text{Kut}_{2_4_3}(\varphi_{1_2}) := \text{Kut}(|P_{4_2}(\varphi_{1_2})|, L_{4_3}, L_{2_3})$$

$$P_{4_3}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{4_2}(\varphi_{1_2}), -W_{2_3_4} \cdot Kut_{2_4_3}(\varphi_{1_2}), L_{4_3})$$

$$P_3(\varphi_{1_2}) := P_4 + P_{4_3}(\varphi_{1_2})$$

$$P_{2_3}(\varphi_{1_2}) := P_3(\varphi_{1_2}) - P_2(\varphi_{1_2})$$

$$P_{4_5}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{4_3}(\varphi_{1_2}), Kut_{3_4_5}, L_{4_5})$$

$$P_5(\varphi_{1_2}) := P_4 + P_{4_5}(\varphi_{1_2})$$

$$P_6(\varphi_{1_2}) := \text{Повзун}_Z(P_5(\varphi_{1_2}), N_1, N_2, L_{5_6}, N_1)$$

$$P_{5_6}(\varphi_{1_2}) := P_6(\varphi_{1_2}) - P_5(\varphi_{1_2})$$

Кут між коромислом O2D та

$$Kut_{3_4_7} := -25\text{deg}$$

$$P_{4_7}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{4_3}(\varphi_{1_2}), Kut_{3_4_7}, L_{4_7})$$

$$P_7(\varphi_{1_2}) := P_4 + P_{4_7}(\varphi_{1_2})$$

Проекція на ординату точок 6 (Tu1(φ)) та 7 (Tu2(φ))

$$\text{Proj}_{6_Y}(\varphi_{1_2}) := P_6(\varphi_{1_2})_Y - P_6(\varphi_{1_2_min})_Y$$

$$\text{Proj}_{7_Y}(\varphi_{1_2}) := P_7(\varphi_{1_2})_Y - P_7(\varphi_{1_2_min})_Y$$

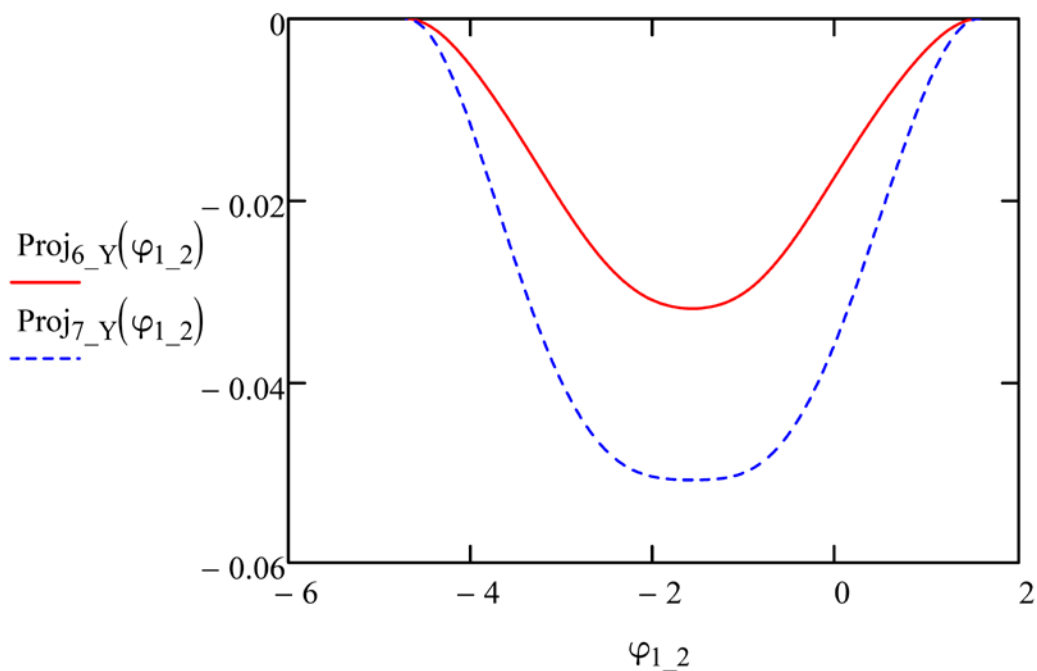


Рис. А 1.2 Графіки функцій ниткоподавачів Tu1 (т. 6) та Yu2 (т. 7)

Додаток А 2

Аналітичні вирази функцій положення механізму зубчастої рейки швейної машини GK-9-2

Функція користувача

ORIGIN := 1

X := ORIGIN

Y := ORIGIN + 1

Z := ORIGIN + 2

$$T_Z(\alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Ort}(r) := \frac{r}{|r|}$$

$$\rho_Z(r_1, \alpha, \text{mod_}r_2) := T_Z(\alpha) \cdot \text{Ort}(r_1) \cdot \text{mod_}r_2$$

$$e_X := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad e_Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Kut}(L_1, L_2, L_3) := \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right)$$

$$\varphi'(r, r') := \frac{\text{Ort}(r) \times r'}{|r|} \quad \varphi''(r, r'') := \frac{\text{Ort}(r) \times r''}{|r|}$$

$$r'(r, \alpha) := \begin{bmatrix} \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_X) \\ \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_Y) \\ \frac{d}{d\alpha}(r(\alpha)_Z) \end{bmatrix} \quad r''(r, \alpha) := \begin{bmatrix} \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_X) \\ \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_Y) \\ \frac{d^2}{d\alpha^2}(r(\alpha)_Z) \end{bmatrix}$$

$$\text{Повзун}_Z(P_1, P_2, P_3, L_{1_4}, P) := \begin{cases} P_{1_2} \leftarrow P_2 - P_1 \\ P_{2_3} \leftarrow P_3 - P_2 \\ L_{1_5} \leftarrow (P_{1_2} \times \text{Ort}(P_{2_3}))_Z \\ P_{1_5} \leftarrow \rho_Z(P_{2_3}, -\text{sign}(L_{1_5}) \cdot 90^\circ, |L_{1_5}|) \\ U_{4_1_5} \leftarrow \arccos\left(\frac{|L_{1_5}|}{L_{1_4}}\right) \\ P_{1_4} \leftarrow \begin{cases} \rho_Z(P_{1_5}, -\text{sign}(L_{1_5}) \cdot U_{4_1_5}, L_{1_4}) & \text{if } P = P_2 \\ \rho_Z(P_{1_5}, \text{sign}(L_{1_5}) \cdot U_{4_1_5}, L_{1_4}) & \text{if } P = P_3 \end{cases} \\ P_4 \leftarrow P_1 + P_{1_4} \end{cases}$$

$$P_{\text{Перетин}}(P_1, P_2, P_3, P_4) := \begin{bmatrix} \frac{(P_{4_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{3_Y} - P_{4_X} \cdot P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{4_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{2_Y} - P_{3_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{4_X} \cdot P_{1_Y} \cdot P_{2_X} + P_{3_X} \cdot P_{1_X} \cdot P_{2_Y} + P_{3_X} \cdot P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{3_X} \cdot P_{1_Y} \cdot P_{2_X})}{(-P_{2_Y} \cdot P_{4_X} + P_{2_Y} \cdot P_{3_X} + P_{1_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} + P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{3_Y})} \\ \frac{(P_{2_Y} \cdot P_{3_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_Y} \cdot P_{3_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_Y} \cdot P_{3_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_X} \cdot P_{2_Y} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{2_Y} \cdot P_{3_Y} + P_{1_Y} \cdot P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{1_Y} \cdot P_{2_X} \cdot P_{3_Y})}{(-P_{2_Y} \cdot P_{4_X} + P_{2_Y} \cdot P_{3_X} + P_{1_Y} \cdot P_{4_X} - P_{1_Y} \cdot P_{3_X} + P_{2_X} \cdot P_{4_Y} - P_{2_X} \cdot P_{3_Y} - P_{1_X} \cdot P_{4_Y} + P_{1_X} \cdot P_{3_Y})} \\ 0 \end{bmatrix}$$

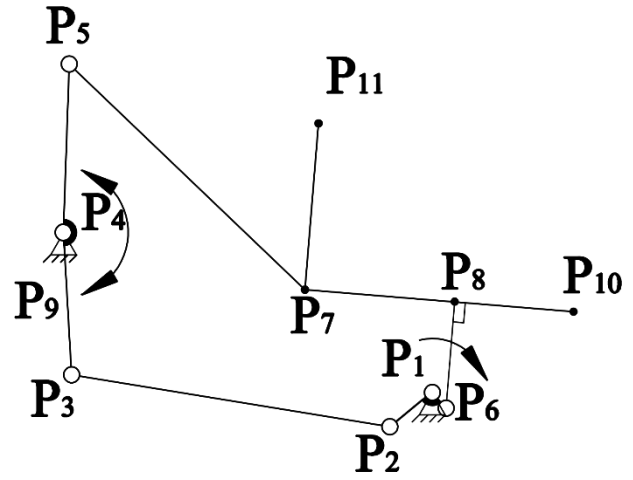


Рис. А 2.1 Розрахункова векторна схема механізму зубчастої рейки

Параметри механізму

$$P_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mm}, \quad P_4 := \begin{pmatrix} -40 \\ 18 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ mm}, \quad L_{1_2} := 6 \text{ mm}, \quad L_{2_3} := 35 \text{ mm}, \quad L_{4_3} := 16 \text{ mm}, \quad L_{4_5} := 19 \text{ mm}, \quad \text{Kut}_{3_4_5} := 175^\circ, \\ L_{1_6} := 2.2 \text{ mm}, \quad \text{Kut}_{2_1_6} := 90^\circ, \quad W_{2_3_4} := 1, \quad L_{5_7} := 36 \text{ mm}, \quad \text{Kut}_{5_7_8} := 140^\circ, \quad L_{6_8} := 12 \text{ mm}, \quad L_{7_11} := 19.5 \text{ mm}, \\ L_{7_10} := 30 \text{ mm}$$

Напрямок та параметри обертання кривошипа 1_2

$$\text{Rotation}_{1_2} := -1, \quad \varphi_{1_2_{\min}} := 177^\circ$$

$$\varphi_{1_2_{\max}} := \varphi_{1_2_{\min}} + \text{Rotation}_{1_2} \cdot 360^\circ$$

$$\text{Position}_{1_2} := 24$$

$$\Delta\varphi_{1_2} := \frac{\varphi_{1_2_{\max}} - \varphi_{1_2_{\min}}}{\text{Position}_{1_2}}, \quad \varphi_{1_2} := \varphi_{1_2_{\min}}, \varphi_{1_2_{\min}} + \Delta\varphi_{1_2} \cdot \text{Position}_{1_2}$$

Визначення функцій положення кінематичних пар

$$P_{1_2}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(e_X, \varphi_{1_2}, L_{1_2}) \\ P_2(\varphi_{1_2}) := P_1 + P_{1_2}(\varphi_{1_2}) \\ P_{4_2}(\varphi_{1_2}) := P_2(\varphi_{1_2}) - P_4 \\ \text{Kut}_{2_4_3}(\varphi_{1_2}) := \text{Kut}(|P_{4_2}(\varphi_{1_2})|, L_{4_3}, L_{2_3}) \\ P_{4_3}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{4_2}(\varphi_{1_2}), -W_{2_3_4} \cdot \text{Kut}_{2_4_3}(\varphi_{1_2}), L_{4_3}) \\ P_3(\varphi_{1_2}) := P_4 + P_{4_3}(\varphi_{1_2}) \\ P_{4_5}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{4_3}(\varphi_{1_2}), \text{Kut}_{3_4_5}, L_{4_5}) \\ P_5(\varphi_{1_2}) := P_4 + P_{4_5}(\varphi_{1_2}) \\ P_{1_6}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{1_2}(\varphi_{1_2}), \text{Kut}_{2_1_6}, L_{1_6}) \\ P_6(\varphi_{1_2}) := P_1 + P_{1_6}(\varphi_{1_2}) \\ P_{5_6}(\varphi_{1_2}) := P_6(\varphi_{1_2}) - P_5(\varphi_{1_2}) \\ L_{5_9} := L_{5_7} \cdot \sin(180^\circ - \text{Kut}_{5_7_8}) \\ L_{9_8}(\varphi_{1_2}) := \sqrt{(|P_{5_6}(\varphi_{1_2})|)^2 - (L_{5_9} + L_{6_8})^2} \\ \text{Kut}_{6_5_9}(\varphi_{1_2}) := \arccos\left(\frac{L_{5_9} + L_{6_8}}{|P_{5_6}(\varphi_{1_2})|}\right) \\ P_{5_9}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{5_6}(\varphi_{1_2}), -\text{Kut}_{6_5_9}(\varphi_{1_2}), L_{5_9}) \\ P_9(\varphi_{1_2}) := P_5(\varphi_{1_2}) + P_{5_9}(\varphi_{1_2}) \\ P_{9_8}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{5_9}(\varphi_{1_2}), 90^\circ, L_{9_8}(\varphi_{1_2})) \\ P_8(\varphi_{1_2}) := P_9(\varphi_{1_2}) + P_{9_8}(\varphi_{1_2}) \\ P_{5_7}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{5_9}(\varphi_{1_2}), \text{Kut}_{5_7_8} - 90^\circ, L_{5_7}) \\ P_7(\varphi_{1_2}) := P_5(\varphi_{1_2}) + P_{5_7}(\varphi_{1_2}) \\ P_{7_10}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{9_8}(\varphi_{1_2}), 0^\circ, L_{7_10}) \\ P_{10}(\varphi_{1_2}) := P_7(\varphi_{1_2}) + P_{7_10}(\varphi_{1_2}) \\ P_{7_11}(\varphi_{1_2}) := \rho_Z(P_{9_8}(\varphi_{1_2}), 90^\circ, L_{7_11}) \\ P_{11}(\varphi_{1_2}) := P_7(\varphi_{1_2}) + P_{7_11}(\varphi_{1_2}) \\ P_{11_X}(\varphi_{1_2}) := P_{11}(\varphi_{1_2})_X - P_{11}(\varphi_{1_2_{\min}})_X \\ P_{11_Y}(\varphi_{1_2}) := P_{11}(\varphi_{1_2})_Y - P_{11}(\varphi_{1_2_{\min}})_Y$$

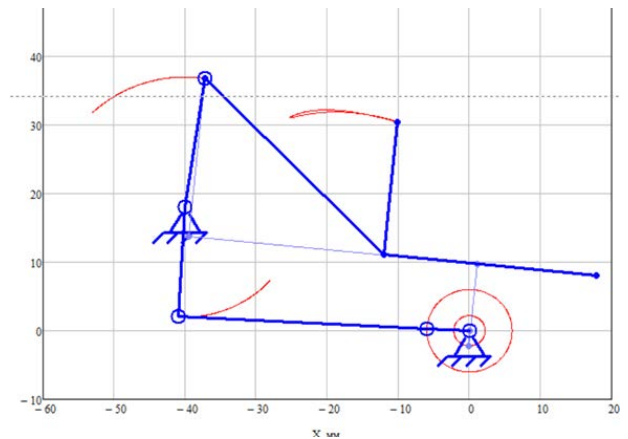


Рис. А 2.2 Траєкторії характерних точок механізму зубчастої рейки

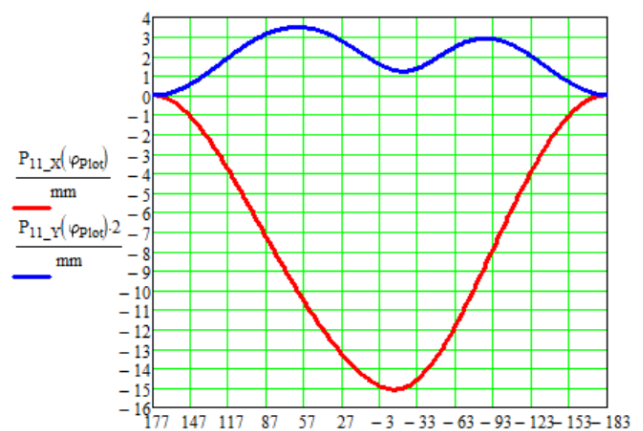


Рис. А 2.3 Складові траєкторії рейки

ДОДАТОК Б

**Експериментальні значення функції подачі нитки базового механізму
подачі нитки швейної машини GK9-2**

Таблиця Б. 1

Значення вимірів, отриманих в процесі тарування мірального пристрою

Позначення на пристрої	Шкала на приборі, мм									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.8	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,8	1,6	1,8	1,9
2	5.0	5	5	4,9	5,1	5	5	4,9	4,9	5,1
3	6.5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
4	8.5	8,3	8,5	8,3	8,5	8,4	8,6	8,5	8,6	8,4
5	10.1	10,2	10,1	10,1	10,2	10,1	10	10,2	10,1	10,1
6	13.5	13,4	13,4	13,5	13,4	13,4	13,5	13,5	13,6	13,5
7	14.5	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,5	14,5
8	20.3	20,4	20,3	20,4	20,4	20,3	20,4	20,3	20,3	20,3
9	20.0	20,1	20	20	20,1	19,9	20	20	20	20,1
10	23.7	23,7	23,7	23,6	23,7	23,6	23,7	23,8	23,8	23,7
11	23.5	23,6	23,5	23,6	23,5	23,4	23,5	23,5	23,5	23,4
12	27.5	27,5	27,6	27,5	27,5	27,4	27,4	27,5	27,5	27,5
13	28.2	28,1	28,3	28,3	28,2	28,3	28,2	28,3	28,2	28,2
14	31.2	31,2	31,2	31,1	31,2	31,2	31,1	31,2	31,3	31,2
15	33.2	33,2	33,1	33,2	33,3	33,2	33,1	33,4	33,1	33,2
16	35.8	35,8	35,7	35,8	35,9	35,9	35,9	35,8	35,9	35,8
17	36.0	35,9	36,2	36,0	35,9	36,1	35,9	35,9	36,1	36,0
18	39.5	39,5	39,5	39,4	39,5	39,5	39,6	39,5	39,4	39,5
19	41.9	41,9	42,0	42,0	42,0	41,8	41,9	41,9	41,9	41,8
20	44.2	44,2	44,1	44,2	44,2	44,1	44,2	44,3	44,2	44,2
21	45.8	45,8	45,8	46	45,8	45,9	45,9	45,8	45,8	45,8
22	48.2	48,3	48,3	48,3	48,2	48,2	48,1	48,1	48,1	48,2
23	50.0	49,9	49,9	49,9	50	50,1	49,9	50,2	50	49,9
24	52.3	52,3	52,4	52,3	52,2	52,3	52,3	52,2	52,3	52,3
25	54.6	54,6	54,6	54,7	54,6	54,6	54,7	54,7	54,6	54,7
26	56.0	55,8	56	56,1	56	56,1	56	55,9	56	55,9
27	58.5	58,5	58,50	58,6	58,50	58,5	58,5	58,5	58,50	58,60
28	61.5	61,4	61,50	61,6	61,50	61,5	61,4	61,6	61,50	61,60
29	62.2	62,2	62,20	62,2	62,10	62,1	62,2	62,2	62,30	62,20
30	63.0	62,8	63,00	62,9	63,10	63	63	63	63,10	63,00

Таблиця Б. 2

Результати обрахунку отриманих в процесі тарування мірального пристрою

Шкала на лінійці	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{\text{с.р.}} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{\text{тар.}}$
0	0,00	0,000	0,000	0,02
1	1,79	0,008	0,063	0,07
2	4,99	0,005	0,053	0,06
3	6,51	0,001	0,023	0,03
4	8,46	0,012	0,077	0,08
5	10,12	0,004	0,045	0,05
6	13,47	0,005	0,048	0,05
7	14,52	0,002	0,030	0,04
8	20,34	0,003	0,037	0,04
9	20,02	0,004	0,045	0,05
10	23,70	0,004	0,048	0,05
11	23,50	0,004	0,048	0,05
12	27,49	0,003	0,041	0,05
13	28,23	0,005	0,048	0,05
14	31,19	0,003	0,041	0,05
15	33,20	0,009	0,067	0,07
16	35,83	0,005	0,048	0,05
17	36,00	0,011	0,075	0,08
18	39,49	0,003	0,041	0,05
19	41,91	0,005	0,053	0,06
20	44,19	0,003	0,041	0,05
21	45,84	0,005	0,050	0,06
22	48,20	0,007	0,058	0,06
23	49,98	0,011	0,074	0,08
24	52,29	0,003	0,041	0,05
25	54,64	0,003	0,037	0,04
26	55,98	0,008	0,066	0,07
27	58,52	0,002	0,030	0,04
28	61,51	0,005	0,053	0,06
29	62,19	0,003	0,041	0,05
30	62,99	0,008	0,063	0,07
$\Delta_{\text{тар.с.}}$				$\pm 0,05$

Таблиця Б. 3

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для машини GK9-2 ($t=8$ мм, $m=0,4$ мм)

Положення головного вала, φ	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5
20	1	1,1	1	0,8	0,9	1,1	1	1	1	1
30	2,5	2,6	2,5	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,5	2,5
40	4	4	4	4	4,1	3,9	4,1	4	4	4
50	5,5	5,5	5,4	5,4	5,6	5,4	5,5	5,4	5,6	5,5
60	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,4	6,5
70	7,5	7,5	7,5	7,6	7,5	7,6	7,5	7,5	7,6	7,5
80	8,5	8,6	8,6	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	8,5	8,4
90	10,5	10,5	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
95	12	12,1	11,9	12,1	12,1	11,9	12	12,1	12,1	12,1
100	13	13	13,1	13	12,9	12,8	12,9	12,9	13	13
110	16	16,1	15,9	16	16	16,1	16,1	16,1	16	16
120	20	20	20	20	19,9	19,8	20	20	20	20,1
130	23	22,9	23	22,9	22,9	22,9	23	23	23,1	23
140	26	26,1	26	26	26,1	25,8	26,1	26	26	26,1
150	28	27,9	27,9	28,2	28	28	28	28	28	28
160	29	28,9	29,1	29	29,1	29	29,1	29	29	29
170	29,5	29,5	29,5	29,5	29,6	29,6	29,5	29,4	29,5	29,6
172	29,5	29,4	29,5	29,3	29,5	29,5	29,4	29,5	29,5	29,4
172	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
180	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
190	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
200	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
210	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
220	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
230	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
240	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
244	19,5	19,4	19,4	19,4	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
244	13,5	13,4	13,6	13,5	13,6	13,5	13,6	13,5	13,6	13,5
250	13,5	13,5	13,4	13,5	13,6	13,5	13,5	13,6	13,4	13,5
260	14	14	14	14	14	13,9	13,9	14,1	14	14,1
270	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	14,5	14,5	14,7	14,5	14,4
280	15	15	15	14,9	15	15,2	15	15,1	15	14,9
290	15	15	15	14,9	15,1	15	15	15	14,9	15
300	15	15	15,1	15,1	15	15,1	15	15	15,1	14,9
310	16	16	16	16,1	16	16	16,1	16	15,9	16
320	17	16,9	17	17	17	17	17	16,9	17	17
330	19	19	19,1	19,1	19,1	19	19	18,9	19,1	18,9
340	19	19	19,1	19,1	19,1	19	19	18,9	19,1	18,9
350	19	19	19,1	19,1	19,1	19	19	18,9	19,1	18,9
360	19	19	19,1	19,1	19,1	19	19	18,9	19,1	18,9

Таблиця Б. 4

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для
машини GK9-2 ($t=12$ мм, $m=8$ мм)

Положення головного вала, φ	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,0	2,1	2,1	1,9	2,0	2,0	2,2	1,9	2,0	1,9
30	3,0	3,1	3,1	2,9	3,1	3,0	3,0	3,0	3,1	3,0
40	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,0	4,1	4,1
50	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,1	5,0	5,0	5,2	4,9
60	6,0	6,1	6,0	5,8	6,0	5,9	6,0	6,0	6,1	6,0
70	8,5	8,5	8,4	8,4	8,4	8,6	8,5	8,6	8,5	8,5
80	13,5	13,6	13,5	13,5	13,4	13,4	13,6	13,5	13,5	13,5
90	19,0	19,0	19,0	18,9	18,9	19,0	19,0	19,0	19,0	18,9
100	25,0	25,1	25,1	25,0	25,1	25,1	25,1	25,0	24,9	25,1
110	31,0	31,0	31,1	31,1	31,1	30,9	31,1	31,1	30,9	30,9
120	36,0	36,1	35,9	36,0	36,0	35,9	36,0	36,0	36,1	36,0
130	40,5	40,5	40,6	40,5	40,5	40,4	40,6	40,5	40,6	40,6
140	44,0	43,9	43,9	44,1	44,0	44,1	44,1	44,0	44,0	44,0
150	46,5	46,6	46,5	46,5	46,5	46,6	46,5	46,6	46,4	46,5
160	48,5	48,4	48,5	48,5	48,6	48,5	48,5	48,5	48,5	48,4
172	49,5	49,4	49,5	49,5	49,4	49,4	49,5	49,4	49,5	49,5
172	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
180	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
190	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
200	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
210	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
220	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
230	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
240	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
250	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
255	37,5	37,5	37,4	37,4	37,5	37,4	37,5	37,5	37,5	37,5
255	29,5	29,5	29,6	29,5	29,4	29,5	29,4	29,5	29,5	29,6
260	30,0	29,9	29,9	30,0	30,0	30,0	30,0	29,9	30,0	30,0
270	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,6
280	32,5	32,5	32,6	32,6	32,5	32,6	32,5	32,5	32,5	32,5
290	33,0	33,0	32,9	33,0	33,0	32,9	33,1	33,0	33,0	33,0
300	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,7	33,5	33,5	33,5	33,6
310	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5	34,7	34,4	34,4
320	35,5	35,5	35,5	35,5	35,6	35,5	35,4	35,5	35,4	35,5
330	37,0	37,0	37,0	37,0	37,1	37,1	37,0	37,1	36,8	37,0
340	38,0	37,9	38,1	37,9	38,0	38,0	37,9	37,9	37,9	38,1
350	38,0	37,9	38,1	37,9	38,0	38,0	37,9	37,9	37,9	38,1
360	38,0	37,9	38,1	37,9	38,0	38,0	37,9	37,9	37,9	38,1

Таблиця Б. 6

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=8 мм, m=0,4мм)

Положення головного вала φ , град	t=8 мм, m=0,4мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
1	2	3	4	5
0	0,00	0,000	0,000	0,02
10	0,50	0,004	0,048	0,05
20	0,99	0,008	0,063	0,07
30	2,50	0,007	0,058	0,06
40	4,01	0,003	0,041	0,05
50	5,48	0,006	0,056	0,06
60	6,51	0,003	0,041	0,05
70	7,53	0,002	0,035	0,04
80	8,50	0,004	0,048	0,05
90	10,46	0,005	0,050	0,06
95	12,04	0,007	0,060	0,07
100	12,96	0,007	0,060	0,07
110	16,03	0,005	0,048	0,05
120	19,98	0,006	0,056	0,06
130	22,97	0,005	0,048	0,05
140	26,02	0,008	0,066	0,07
150	28,00	0,007	0,058	0,06
160	29,02	0,004	0,045	0,05
170	29,52	0,004	0,045	0,05
172	29,45	0,005	0,051	0,06
172	19,48	0,004	0,045	0,05
180	19,48	0,004	0,045	0,05
190	19,48	0,004	0,045	0,05
200	19,48	0,004	0,045	0,05
210	19,48	0,004	0,045	0,05
220	19,48	0,004	0,045	0,05
230	19,48	0,004	0,045	0,05
240	19,48	0,004	0,045	0,05
244	19,48	0,004	0,045	0,05
244	13,53	0,005	0,048	0,05
250	13,50	0,004	0,048	0,05
260	14,00	0,004	0,048	0,05
270	14,52	0,006	0,056	0,06
280	15,01	0,008	0,063	0,07
290	14,99	0,003	0,041	0,05
300	15,03	0,005	0,048	0,05
310	16,01	0,003	0,041	0,05
320	16,98	0,002	0,030	0,04
330	19,02	0,006	0,056	0,06
340	19,02	0,006	0,056	0,06
350	19,02	0,006	0,056	0,06
360	19,02	0,006	0,056	0,06
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,06$

Таблиця Б. 7

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=12 мм, m=8мм)

Положення головного вала φ , град	t=12 мм, m=8мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
1	2	3	4	7
0	0,00	0,000	0,000	0,02
10	1,03	0,002	0,035	0,04
20	2,01	0,010	0,071	0,08
30	3,03	0,005	0,048	0,05
40	4,03	0,002	0,035	0,04
50	5,02	0,006	0,056	0,06
60	5,99	0,008	0,063	0,07
70	8,49	0,005	0,053	0,06
80	13,50	0,004	0,048	0,05
90	18,97	0,002	0,035	0,04
95	25,05	0,005	0,051	0,06
100	31,02	0,008	0,066	0,07
110	36,00	0,004	0,048	0,05
120	40,53	0,005	0,048	0,05
130	44,01	0,005	0,053	0,06
140	46,52	0,004	0,045	0,05
150	48,49	0,003	0,041	0,05
160	49,46	0,003	0,037	0,04
170	37,47	0,002	0,035	0,04
172	37,47	0,002	0,035	0,04
172	37,47	0,002	0,035	0,04
180	37,47	0,002	0,035	0,04
190	37,47	0,002	0,035	0,04
200	37,47	0,002	0,035	0,04
210	37,47	0,002	0,035	0,04
220	37,47	0,002	0,035	0,04
230	37,47	0,002	0,035	0,04
240	37,47	0,002	0,035	0,04
244	29,50	0,004	0,048	0,05
244	29,97	0,002	0,035	0,04
250	31,51	0,001	0,023	0,03
260	32,53	0,002	0,035	0,04
270	32,99	0,003	0,041	0,05
280	33,53	0,005	0,048	0,05
290	34,50	0,007	0,058	0,06
300	35,49	0,003	0,041	0,05
310	37,01	0,008	0,063	0,07
320	37,97	0,007	0,059	0,06
330	37,97	0,007	0,059	0,06
340	37,97	0,007	0,059	0,06
350	37,97	0,007	0,059	0,06
360	37,97	0,007	0,059	0,06
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,05$

Таблиця Б. 8

Результати обрахунку експериментальних значень функції дійсної подачі нитки
для машини GK9-2

Положення головного вала φ , град	Базовий механізм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,00	0,000	0,000	0,02
10	0,51	0,003	0,041	0,05
20	1,96	0,007	0,060	0,07
30	5,02	0,004	0,045	0,05
40	8,96	0,003	0,037	0,04
50	12,48	0,004	0,045	0,05
60	17,02	0,004	0,045	0,05
70	22,00	0,004	0,048	0,05
80	27,03	0,005	0,048	0,05
90	31,98	0,004	0,045	0,05
100	37,00	0,004	0,048	0,05
110	41,02	0,004	0,045	0,05
120	45,01	0,014	0,086	0,09
130	48,02	0,006	0,056	0,06
140	50,05	0,005	0,051	0,06
150	50,97	0,007	0,059	0,06
160	52,00	0,004	0,048	0,05
170	52,47	0,002	0,035	0,04
180	52,52	0,004	0,045	0,05
190	52,53	0,005	0,048	0,05
200	52,04	0,007	0,060	0,07
210	51,52	0,008	0,066	0,07
220	50,50	0,009	0,067	0,07
230	48,47	0,005	0,048	0,05
240	46,06	0,005	0,050	0,06
250	42,51	0,005	0,053	0,06
260	38,48	0,006	0,056	0,06
270	34,01	0,005	0,053	0,06
280	29,02	0,004	0,045	0,05
290	23,50	0,002	0,034	0,04
300	18,97	0,007	0,059	0,06
310	13,97	0,005	0,048	0,05
320	9,99	0,005	0,053	0,06
330	5,99	0,003	0,041	0,05
340	3,50	0,002	0,034	0,04
350	1,50	0,011	0,075	0,08
360	0,00	0,000	0,000	0,02
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,05$

ДОДАТОК В

**Експериментальне значення функцій положення робочих органів
механізмів швейної машини GK9-2**

Таблиця В.1

Експериментальні значення функції положень голки $S(\varphi)$ та ниткоподавача $Tu1(\varphi)$ машини GK9-2

Ф, град	Порядкови номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10°	0,36	0,33	0,34	0,36	0,33	0,35	0,38	0,35	0,37	0,38
20°	1,35	1,36	1,34	1,36	1,35	1,37	1,36	1,36	1,35	1,37
30°	2,82	2,80	2,82	2,82	2,84	2,84	2,83	2,85	2,85	2,82
40°	4,77	4,80	4,78	4,75	4,77	4,76	4,79	4,77	4,76	4,76
50°	6,91	6,87	6,90	6,92	6,93	6,90	6,93	6,90	6,94	6,92
60°	9,33	9,36	9,33	9,34	9,32	9,34	9,35	9,36	9,33	9,34
70°	11,38	11,38	11,37	11,39	11,40	11,37	11,39	11,35	11,36	11,40
80°	14,21	14,21	14,20	14,23	14,25	14,22	14,21	14,17	14,21	14,22
90°	17,36	17,35	17,34	17,37	17,35	17,36	17,36	17,37	17,35	17,38
100°	20,52	20,53	20,50	20,53	20,51	20,49	20,54	20,51	20,53	20,51
110°	22,72	22,72	22,70	22,72	22,75	22,75	22,71	22,70	22,71	22,74
120°	25,30	25,32	25,28	25,27	25,33	25,33	25,31	25,31	25,29	25,30
130°	27,49	27,49	27,51	27,50	27,48	27,48	27,48	27,49	27,46	27,53
140°	29,26	29,26	29,24	29,26	29,25	29,25	29,26	29,25	29,25	29,25
150°	30,63	30,62	30,68	30,63	30,63	30,63	30,65	30,61	30,59	30,66
160°	31,63	31,63	31,64	31,61	31,61	31,64	31,63	31,65	31,60	31,63
170°	32,06	32,07	32,06	32,04	32,04	32,07	32,06	32,07	32,07	32,05
180°	32,13	32,10	32,12	32,15	32,11	32,16	32,11	32,13	32,14	32,12
190°	32,04	32,02	32,05	32,04	32,03	32,04	32,05	32,07	32,05	32,03
200°	31,61	31,62	31,60	31,62	31,61	31,60	31,62	31,59	31,59	31,62
210°	30,82	30,82	30,82	30,82	30,82	30,80	30,86	30,79	30,82	30,83
220°	29,57	29,57	29,61	29,57	29,60	29,56	29,56	29,56	29,57	29,56
230°	27,90	27,90	27,90	27,92	27,88	27,90	27,90	27,90	27,88	27,90
240°	25,86	25,87	25,88	25,85	25,88	25,89	25,86	25,86	25,89	25,90
250°	23,46	23,45	23,45	23,46	23,46	23,45	23,49	23,46	23,48	23,49
260°	20,88	20,87	20,88	20,87	20,88	20,88	20,88	20,89	20,88	20,89
270°	17,93	17,93	17,96	17,92	17,94	17,93	17,93	17,91	17,93	17,93
280°	15,10	15,08	15,09	15,09	15,08	15,12	15,11	15,13	15,10	15,10
290°	12,26	12,27	12,29	12,26	12,27	12,30	12,26	12,26	12,22	12,27
300°	9,61	9,58	9,62	9,60	9,61	9,60	9,60	9,63	9,61	9,59
310°	7,14	7,16	7,13	7,16	7,15	7,13	7,14	7,15	7,13	7,14
320°	4,91	4,92	4,92	4,89	4,92	4,93	4,93	4,92	4,89	4,88
330°	2,91	2,91	2,93	2,91	2,95	2,92	2,89	2,92	2,91	2,92
340°	1,30	1,32	1,31	1,29	1,29	1,33	1,30	1,31	1,33	1,31
350°	0,36	0,39	0,33	0,39	0,35	0,37	0,35	0,37	0,37	0,35
360°	0,00	0,02	0,0	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,02	-0,01	0,03

Таблиця В. 2

Результати обрахунку експериментальних значень функції положень голки $S(\varphi)$
та ниткоподавача Tu1(φ) машини GK9-2

Положення головного вала φ , град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{с.р.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,00	0,30	12,30	0,017
10	0,36	0,30	13,20	0,02
20	1,36	0,10	6,80	0,012
30	2,83	0,30	11,40	0,016
40	4,77	0,20	10,90	0,016
50	6,91	0,40	14,60	0,020
60	9,34	0,20	9,50	0,015
70	11,38	0,30	11,90	0,017
80	14,21	0,40	14,70	0,02
90	17,36	0,10	8,60	0,014
100	20,52	0,20	11,20	0,016
110	22,72	0,40	13,40	0,018
120	25,30	0,40	14,40	0,019
130	27,49	0,40	13,70	0,019
140	29,25	0,00	4,80	0,010
150	30,63	0,60	18,20	0,020
160	31,63	0,20	11,20	0,016
170	32,06	0,10	8,60	0,014
180	32,13	0,40	13,50	0,018
190	32,04	0,20	10,00	0,0150
200	31,61	0,20	8,80	0,014
210	30,82	0,30	13,10	0,018
220	29,57	0,30	12,60	0,018
230	27,90	0,10	8,10	0,014
240	25,87	0,30	11,80	0,017
250	23,46	0,20	11,30	0,016
260	20,88	0,00	4,80	0,010
270	17,93	0,20	9,20	0,014
280	15,10	0,30	11,70	0,017
290	12,27	0,40	15,20	0,020
300	9,60	0,20	10,30	0,015
310	7,14	0,10	8,30	0,013
320	4,91	0,30	12,80	0,020
330	2,92	0,20	11,20	0,016
340	1,31	0,20	10,40	0,015
350	0,36	0,40	13,50	0,018
360	0,00	0,20	11,30	0,016
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,017$

Таблица В. 3

Експериментальні значення функції положень розширювача вздовж строчки
L(φ) машини GK9-2

[illegible]

Таблиця В. 4

Результати обрахунку експериментальних значень функції положень розширювача вздовж строчки L(φ) машини GK9-2

Положення головного вала φ , град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,00	0,00	0,00	0,005
10	-	-	-	0,005
20	-	-	-	0,005
30	-	-	-	0,005
40	-	-	-	0,005
50	-	-	-	0,005
60	-	-	-	0,005
70	-	-	-	0,005
80	-	-	-	0,005
90	-	-	-	0,005
100	-	-	-	0,005
110	-	-	-	0,005
120	0,00	0,00	0,00	0,005
130	0,26	0,12	7,76	0,013
140	0,99	0,13	8,10	0,013
150	3,89	0,15	8,73	0,014
160	7,38	0,30	12,29	0,017
170	10,08	0,18	9,66	0,015
180	12,96	0,11	7,57	0,013
190	14,19	0,17	9,45	0,014
200	14,20	0,41	14,54	0,020
210	12,78	0,12	7,93	0,013
220	9,92	0,10	7,00	0,012
230	6,37	0,17	9,30	0,014
240	3,03	0,32	12,86	0,018
250	0,80	0,30	12,41	0,017
260	0,04	0,23	10,74	0,016
270	0,00	0,00	0,00	0,005
280	-	-	-	0,005
290	-	-	-	0,005
300	-	-	-	0,005
310	-	-	-	0,005
320	-	-	-	0,005
330	-	-	-	0,005
340	-	-	-	0,005
350	-	-	-	0,005
360	-	-	-	0,005
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,016$

Експериментальні значення функції положень розширювача поперек строчки
Z(φ) машини GK9-2

[illegible]

Таблиця В. 6

Результати обрахунку експериментальних значень функції положень розширювача поперек строчки $Z(\varphi)$ машини GK9-2

Положення головного вала φ , град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{с.р.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
		$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$	
0	-	-	-	0,005
10	-	-	-	0,005
20	-	-	-	0,005
30	-	-	-	0,005
40	-	-	-	0,005
50	-	-	-	0,005
60	0,00	0,00	0,00	0,005
70	0,279	0,38	13,98	0,019
80	1,384	0,30	12,29	0,017
90	3,086	0,26	11,61	0,017
100	4,334	0,29	12,16	0,017
110	5,196	0,36	13,62	0,019
120	5,888	0,31	12,60	0,018
130	6,389	0,18	9,65	0,015
140	6,549	0,27	11,65	0,017
150	6,569	0,32	12,77	0,018
160	6,568	0,22	10,62	0,016
170	6,317	0,44	15,07	0,020
180	5,353	0,34	13,17	0,018
190	4,059	0,11	7,50	0,012
200	2,634	0,24	11,00	0,016
210	1,705	0,11	7,54	0,013
220	0,290	0,22	10,54	0,016
230	0,00	0,00	0,00	0,005
240	-	-	-	0,005
250	-	-	-	0,005
260	-	-	-	0,005
270	-	-	-	0,005
280	-	-	-	0,005
290	-	-	-	0,005
300	-	-	-	0,005
310	-	-	-	0,005
320	-	-	-	0,005
330	-	-	-	0,005
340	-	-	-	0,005
350	-	-	-	0,005
360	-	-	-	0,005
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,015$

Експериментальні значення функції положень зубчастої рейки вздовж строчки
T(φ) машини GK9-2 ($t_{\max}=12$ мм)

[illegible]

Таблиця В. 8

Результати обрахунку експериментальних значень функції положень зубчастої рейки вздовж строчки $T(\varphi)$ машини GK9-2 ($t_{\max}=12$ мм)

Положення головного вала φ , град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{\text{с.р.}} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{\text{заг.}}$
0	0,00	0,00	0,00	0,01
10	1,095	0,32	12,78	0,02
20	2,155	0,17	9,30	0,01
30	3,199	0,36	13,63	0,02
40	3,983	0,21	10,25	0,02
50	4,772	0,06	5,64	0,01
60	5,436	0,23	10,75	0,02
70	6,004	0,29	12,25	0,02
80	6,416	0,14	8,48	0,01
90	6,642	0,33	12,94	0,02
100	6,707	0,15	8,73	0,01
110	6,608	0,34	13,22	0,02
120	6,238	0,13	8,15	0,01
130	5,693	0,11	7,60	0,01
140	4,811	0,23	10,85	0,02
150	3,660	0,47	15,47	0,02
160	1,847	0,15	8,79	0,01
170	0,270	0,06	5,74	0,01
180	-0,938	0,13	8,20	0,01
190	-1,984	0,21	10,36	0,02
200	-3,389	0,16	8,98	0,01
210	-4,732	0,32	12,83	0,02
220	-5,748	0,31	12,64	0,02
230	-6,626	0,27	11,85	0,02
240	-7,155	0,05	4,83	0,01
250	-7,342	0,17	9,38	0,01
260	-7,393	0,17	9,43	0,01
270	-7,246	0,12	7,88	0,01
280	-6,93	0,04	4,47	0,01
290	-6,516	0,17	9,24	0,01
300	-5,879	0,28	11,89	0,02
310	-5,194	0,23	10,82	0,02
320	-4,289	0,35	13,38	0,02
330	-3,282	0,10	6,99	0,01
340	-2,256	0,70	18,95	0,02
350	-1,148	0,35	13,33	0,02
360	0,00	0,00	0,00	0,01
$\Delta_{\text{заг.с.}}$				$\pm 0,015$

Т(φ) машини GK9-2 ($t_{\min}=8$ мм)

[illegible]

Таблиця В. 10

Результати обрахунку експериментальних значень функції положень зубчастої рейки вздовж строчки Т(φ) машини GK9-2 ($t_{\max}=8$ мм)

Положення головного вала φ, град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{\text{с.р.}} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{\text{заг.}}$
		$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$	
0	0,00	0,00	0,00	0,01
10	0,709	0,19	9,98	0,01
20	1,393	0,26	11,47	0,02
30	1,967	0,19	9,76	0,01
40	2,439	0,25	11,20	0,02
50	2,849	0,43	14,86	0,02
60	3,104	0,15	8,90	0,01
70	3,241	0,11	7,61	0,01
80	3,182	0,24	11,07	0,02
90	3,088	0,28	11,94	0,02
100	2,974	0,30	12,30	0,02
110	2,847	0,22	10,59	0,02
120	2,441	0,38	13,92	0,02
130	1,820	0,27	11,68	0,02
140	1,115	0,32	12,89	0,02
150	0,275	0,09	6,79	0,01
160	-0,829	0,22	10,52	0,02
170	-1,923	0,14	8,40	0,01
180	-2,776	0,17	9,26	0,01
190	-3,448	0,21	10,34	0,02
200	-4,327	0,17	9,27	0,01
210	-5,063	0,17	9,22	0,01
220	-5,750	0,26	11,51	0,02
230	-6,309	0,20	10,10	0,02
240	-6,591	0,22	10,56	0,02
250	-6,634	0,12	7,92	0,01
260	-6,516	0,30	12,43	0,02
270	-6,216	0,10	7,07	0,01
280	-5,821	0,22	10,59	0,02
290	-5,333	0,28	11,94	0,02
300	-4,71	0,07	6,12	0,01
310	-4,040	0,25	11,30	0,02
320	-3,261	0,33	12,99	0,02
330	-2,440	0,12	7,89	0,01
340	-1,640	0,40	14,32	0,02
350	-0,830	0,17	9,21	0,01
360	0,00	0,00	0,00	0,01
$\Delta_{\text{заг.с.}}$				$\pm 0,015$

Таблица В. 11

Експериментальні значення функції вертикальної складової переміщення
зубчастої рейки $H(\varphi)$ машини GK9-2

[illegible]

Таблиця В. 12

Результати обрахунку експериментальних значень функції вертикальної складової переміщення зубчастої рейки Н(φ) машини GK9-2

Положення головного вала φ, град	мм			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,00	0,00	0,00	0,01
10	0,027	0,15	8,90	0,01
20	0,120	0,31	12,63	0,02
30	0,289	0,26	11,54	0,02
40	0,485	0,23	10,75	0,02
50	0,721	0,11	7,34	0,01
60	0,962	0,29	12,16	0,02
70	1,184	0,13	8,13	0,01
80	1,401	0,36	13,56	0,02
90	1,561	0,24	11,11	0,02
100	1,676	0,25	11,33	0,02
110	1,729	0,23	10,84	0,02
120	1,736	0,08	6,56	0,01
130	1,661	0,19	9,92	0,01
140	1,558	0,17	9,36	0,01
150	1,403	0,07	6,15	0,01
160	1,186	0,35	13,41	0,02
170	0,979	0,36	13,56	0,02
180	0,788	0,27	11,85	0,02
190	0,652	0,25	11,33	0,02
200	0,611	0,17	9,35	0,01
210	0,690	0,22	10,52	0,02
220	0,845	0,47	15,52	0,02
230	1,051	0,15	8,74	0,01
240	1,243	0,16	9,13	0,01
250	1,382	0,24	11,11	0,02
260	1,447	0,20	10,11	0,02
270	1,438	0,19	9,91	0,01
280	1,350	0,23	10,75	0,02
290	1,204	0,31	12,60	0,02
300	0,999	0,25	11,26	0,02
310	0,774	0,12	7,94	0,01
320	0,552	0,24	10,99	0,02
330	0,333	0,10	7,12	0,01
340	0,158	0,34	13,11	0,02
350	0,061	0,29	12,23	0,02
360	0,00	0,00	0,00	0,01
$\Delta_{заг.с.}$				±0,016

ДОДАТОК Г

**Аналітичні значення функції положення механізмів
швейної машини GK-9-2**

Таблиця Г

Аналітичні значення складових траєкторії робочих органів механізмів: голки (подачі нитки) та зубастої рейки (вершини зубця в середній частині рейки)

Положення головного вала φ , град	Механізм голки (подачі нитки)		Механізм зубчастої рейки	
	$S(\varphi)$, $Tu1(\varphi)$,	$\psi(\varphi)$	$T(\varphi)$	$H(\varphi)$
	мм	град.	мм	
1	4	5	2	3
0	0	0	0	0
10	0,344	1,594	-0,128	0,025
20	1,331	4,678	-0,492	0,121
30	2,826	8,983	-1,076	0,279
40	4,697	14,21	-1,85	0,484
50	6,845	20,085	-2,781	0,719
60	9,212	26,383	-3,827	0,962
70	11,755	32,92	-4,948	1,194
80	14,439	39,552	-6,106	1,399
90	17,212	46,157	-7,27	1,564
100	20,001	52,626	-8,414	1,678
110	22,706	58,854	-9,517	1,735
120	25,213	64,723	-10,564	1,733
130	27,406	70,095	-11,543	1,672
140	29,189	74,802	-12,442	1,556
150	30,512	78,646	-13,248	1,392
160	31,38	81,403	-13,945	1,194
170	31,852	82,872	-14,51	0,982
180	31,999	82,923	-14,906	0,787
190	31,864	81,552	-15,084	0,651
200	31,428	78,88	-14,988	0,613
210	30,64	75,106	-14,585	0,688
220	29,453	70,453	-13,884	0,852
230	27,853	65,122	-12,935	1,053
240	25,861	59,284	-11,799	1,242
250	23,535	53,078	-10,533	1,381
260	20,955	46,621	-9,19	1,448
270	18,214	40,023	-7,814	1,438
280	15,409	33,389	-6,448	1,352
290	12,626	26,841	-5,13	1,201
300	9,934	20,521	-3,898	1,002
310	7,394	14,608	-2,786	0,776
320	5,068	9,327	-1,824	0,546
330	3,039	4,947	-1,043	0,335
340	1,426	1,766	-0,466	0,163
350	0,372	0,06	-0,114	0,048
360	0	0	0	0

ДОДАТОК Д

**Експериментальні значення зусилля натягу нитки в процесі утворення
стібка типу 101**

Таблиця Д.1

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (базовий механізм $t=8$ мм, $m=0,4$ мм)

Положення головного вала, ф	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	1,00	1,02	1,03	1,03	1,02	0,86	0,99	1,05	1,03	0,99
10	0,29	0,28	0,30	0,29	0,29	0,28	0,34	0,40	0,32	0,27
20	0,07	0,12	0,08	0,11	-0,01	0,06	0,08	0,00	0,08	0,10
30	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0,14	0,20	0,23	0,23	0,15	0,12	0,21	0,18	0,21	0,12
310	1,07	1,04	1,12	1,13	1,14	1,11	1,05	1,04	1,04	1,03
320	1,28	1,39	1,23	1,19	1,33	1,09	1,27	1,27	1,47	1,32
330	1,14	1,10	1,20	1,18	1,14	1,08	1,09	1,18	1,17	1,24
340	1,07	1,04	1,05	1,19	1,17	1,09	1,15	1,09	1,02	0,90
350	0,71	0,63	0,80	0,73	0,67	0,70	0,74	0,75	0,75	0,69
360	0,36	0,39	0,24	0,36	0,38	0,42	0,37	0,26	0,25	0,32

Таблиця Д.2

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (базовий механізм $t=8$ мм, $m=0,4$ мм)

Положення головного вала ф, град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	1,00	0,00	0,04	0,04
10	0,31	0,00	0,03	0,03
20	0,07	0,00	0,03	0,03
30	0,01	0,00	0,01	0,01
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
300	0,18	0,00	0,03	0,03
310	1,08	0,00	0,03	0,03
320	1,28	0,01	0,07	0,07
330	1,15	0,00	0,04	0,04
340	1,08	0,01	0,06	0,06
350	0,72	0,00	0,03	0,03
360	0,33	0,00	0,04	0,04
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,04$

Таблиця Д. 3

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (базовий механізм $t=12$ мм, $m=8$ мм)

Положення головного вала, φ	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	1,00	0,93	1,05	1,14	0,84	1,03	0,92	1,01	0,95	1,00
10	0,29	0,21	0,21	0,23	0,23	0,33	0,25	0,23	0,30	0,44
20	0,07	0,08	0,02	0,14	0,11	0,13	0,14	0,16	0,06	0,01
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0,14	0,05	0,25	0,23	0,08	0,30	0,14	0,18	0,17	0,19
310	1,07	1,00	1,12	1,10	0,93	1,06	0,99	0,99	1,02	0,99
320	1,28	1,19	1,34	1,35	1,18	1,29	1,22	1,31	1,24	1,15
330	1,14	1,13	1,17	1,22	1,20	1,17	1,11	1,21	1,15	1,17
340	1,07	1,23	1,02	1,07	0,98	1,09	1,02	1,03	1,20	1,14
350	0,71	0,67	0,61	0,74	0,84	0,77	0,66	0,89	0,75	0,77
360	0,36	0,40	0,41	0,37	0,32	0,36	0,48	0,29	0,37	0,43

Таблиця Д. 4

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (базовий механізм $t=12$ мм, $m=8$ мм)

Положення головного вала φ , град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	2,14	0,01	0,06	0,06
10	1,41	0,00	0,04	0,04
20	0,83	0,01	0,05	0,06
30	0,58	0,00	0,04	0,04
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
300	5,68	0,00	0,04	0,04
310	6,06	0,01	0,05	0,06
320	6,19	0,00	0,05	0,05
330	6,04	0,00	0,05	0,05
340	4,99	0,01	0,06	0,06
350	4,29	0,00	0,03	0,03
360	2,15	0,00	0,05	0,05
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,05$

Таблиця Д. 5

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=2$ мм)

Положення головного вала, ф	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	0,30	0,24	0,27	0,18	0,39	0,21	0,24	0,43	0,16	0,28
10	0,30	0,32	0,27	0,14	0,35	0,27	0,40	0,37	0,31	0,28
20	0,15	0,17	0,15	0,16	0,04	0,10	0,17	0,22	0,12	0,14
30	0,08	0,12	0,01	0,04	0,03	0,18	0,09	0,06	0,10	0,07
40	0,03	0,08	0,01	0,12	0,09	0,05	0,06	0,00	0,08	0,02
50	0,01	0,00	0,00	0,08	0,06	0,03	0,14	0,00	0,00	0,00
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0,05	0,13	0,22	0,04	0,21	0,01	0,10	0,09	0,05	0,06
310	0,20	0,11	0,32	0,21	0,22	0,15	0,02	0,18	0,13	0,11
320	0,90	0,95	0,91	0,93	0,92	0,85	0,81	1,04	0,94	0,95
330	0,93	0,87	0,90	0,87	0,92	0,90	0,91	0,86	0,85	1,01
340	0,85	0,78	0,82	0,73	0,82	0,86	0,92	0,79	0,87	0,94
350	0,80	0,75	0,85	0,79	0,89	0,86	0,82	0,76	0,69	0,83
360	0,30	0,26	0,37	0,44	0,28	0,34	0,32	0,24	0,28	0,30

Таблиця Д. 6

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=2$ мм)

Положення головного вала ф, град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,27	0,01	0,06	0,06
10	0,30	0,00	0,05	0,05
20	0,14	0,00	0,03	0,03
30	0,08	0,00	0,03	0,03
40	0,05	0,00	0,03	0,03
50	0,03	0,00	0,03	0,03
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
300	0,10	0,00	0,05	0,05
310	0,17	0,01	0,05	0,06
320	0,92	0,00	0,04	0,04
330	0,90	0,00	0,03	0,03
340	0,84	0,00	0,04	0,04
350	0,80	0,00	0,04	0,04
360	0,31	0,00	0,04	0,04
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,04$

Таблиця Д. 7

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=4$ мм)

Положення головного вала, ф	Порядковий номер досліджу									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	0,90	0,90	0,92	0,94	0,92	0,87	0,95	0,97	0,92	1,02
10	0,60	0,65	0,58	0,56	0,69	0,59	0,71	0,57	0,64	0,66
20	0,30	0,33	0,43	0,35	0,34	0,24	0,27	0,27	0,27	0,45
30	0,15	0,06	0,11	0,04	0,10	0,20	0,15	0,25	0,12	0,11
40	0,05	0,02	0,05	0,17	0,15	0,11	0,09	0,14	0,04	0,19
50	0,03	0,01	0,04	0,07	0,04	0,07	0,04	0,06	0,01	0,02
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	0,30	0,25	0,42	0,38	0,27	0,33	0,38	0,23	0,22	0,27
310	1,00	1,06	0,87	1,07	0,98	0,99	0,97	1,05	1,02	1,01
320	1,85	1,89	1,79	1,96	1,84	1,83	1,76	1,77	1,80	1,76
330	1,90	1,83	1,95	1,87	1,81	1,82	1,94	1,99	1,78	1,89
340	1,80	1,78	1,94	1,82	1,72	1,70	1,81	1,88	1,82	1,69
350	1,20	1,17	1,16	1,33	1,31	1,20	1,16	1,26	1,23	1,09
360	0,90	0,94	0,81	0,94	0,90	0,81	0,94	0,95	0,92	0,83

Таблиця Д. 8

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=4$ мм)

Положення головного вала ф, град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	0,93	0,00	0,03	0,03
10	0,63	0,00	0,04	0,04
20	0,33	0,00	0,05	0,05
30	0,13	0,00	0,04	0,04
40	0,10	0,00	0,04	0,04
50	0,04	0,00	0,02	0,02
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
300	0,31	0,00	0,05	0,05
310	1,00	0,00	0,04	0,04
320	1,83	0,00	0,04	0,04
330	1,88	0,00	0,05	0,05
340	1,80	0,01	0,05	0,05
350	1,21	0,00	0,05	0,05
360	0,89	0,00	0,04	0,04
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,04$

Таблиця Д. 9

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=6$ мм)

Положення головного вала, ф	Порядковий номер досліду									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	1,30	1,27	1,36	1,30	1,21	1,39	1,33	1,30	1,27	1,31
10	0,90	0,81	0,89	0,87	0,84	1,05	0,92	0,87	1,00	0,82
20	0,40	0,44	0,37	0,35	0,37	0,41	0,26	0,46	0,43	0,37
30	0,23	0,25	0,28	0,30	0,30	0,24	0,20	0,30	0,18	0,27
40	0,08	0,12	0,04	0,24	0,15	0,08	0,08	0,13	0,03	0,14
50	0,04	0,09	0,03	0,03	0,12	0,02	0,17	0,03	0,03	0,02
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	0,30	0,29	0,30	0,29	0,37	0,22	0,19	0,40	0,38	0,33
300	1,00	0,96	0,90	1,09	0,99	0,97	0,99	1,06	1,05	0,89
310	2,00	2,00	1,95	1,90	2,03	1,99	1,96	2,03	2,04	1,95
320	3,00	3,00	2,93	3,03	2,74	2,91	3,01	3,03	3,01	3,01
330	2,90	2,77	2,98	2,83	2,97	2,87	2,87	2,84	2,80	2,94
340	2,50	2,38	2,39	2,45	2,47	2,54	2,61	2,53	2,51	2,42
350	2,00	2,08	2,07	2,01	2,04	2,02	1,99	1,99	1,90	2,02
360	1,30	1,25	1,18	1,34	1,31	1,27	1,23	1,31	1,26	1,26

Таблиця Д. 10

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=6$ мм)

Положення головного вала ф, град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	1,30	0,00	0,03	0,04
10	0,90	0,01	0,05	0,05
20	0,39	0,00	0,04	0,04
30	0,26	0,00	0,03	0,03
40	0,11	0,00	0,04	0,04
50	0,06	0,00	0,04	0,04
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
290	0,31	0,00	0,05	0,05
300	0,99	0,00	0,04	0,05
310	1,99	0,00	0,03	0,03
320	2,97	0,01	0,06	0,06
330	2,88	0,00	0,05	0,05
340	2,48	0,00	0,05	0,05
350	2,01	0,00	0,03	0,04
360	1,27	0,00	0,03	0,03
$\Delta_{заг.с.}$				$\pm 0,04$

Таблиця Д. 11

Експериментальні значення натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=8$ мм)

Положення головного вала, φ	Порядковий номер досліджу									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
град	мм									
0	1,80	1,73	1,71	1,77	1,73	1,74	1,79	1,72	1,81	1,75
10	1,20	1,20	1,32	1,22	1,18	1,24	1,12	1,13	1,19	1,24
20	0,60	0,58	0,62	0,74	0,64	0,66	0,57	0,69	0,59	0,60
30	0,30	0,29	0,22	0,27	0,36	0,34	0,36	0,41	0,21	0,29
40	0,10	0,03	0,03	0,11	0,27	0,03	0,14	0,06	0,03	0,06
50	0,05	0,00	0,02	0,01	0,16	0,01	0,12	0,10	0,01	0,07
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	0,30	0,30	0,32	0,37	0,25	0,26	0,35	0,25	0,38	0,36
290	1,00	0,96	1,04	1,03	0,92	0,93	0,91	1,11	0,95	0,96
300	2,20	2,17	2,14	2,26	2,18	2,23	2,24	2,28	2,11	2,26
310	3,50	3,53	3,51	3,59	3,47	3,46	3,48	3,52	3,44	3,51
320	3,80	3,72	3,87	3,84	3,74	3,81	3,82	3,88	3,78	3,84
330	3,70	3,71	3,61	3,64	3,78	3,70	3,66	3,53	3,80	3,75
340	3,20	3,27	3,12	3,27	3,09	3,09	3,23	3,23	3,20	3,34
350	3,00	3,05	2,99	2,90	2,98	2,94	3,03	2,97	2,94	3,00
360	1,80	1,79	1,82	1,74	1,75	1,76	1,81	1,62	1,79	1,76

Таблиця Д. 12

Результати обрахунку експериментальних значень натягу нитки в процесі утворення стібка типу 101 на машині GK9-2 (новий механізм $t=8$ мм, $m=2$ мм)

Положення головного вала φ , град	Н			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{с.р.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	$\Delta_{заг.}$
0	1,76	0,00	0,02	0,03
10	1,20	0,00	0,04	0,04
20	0,63	0,00	0,04	0,04
30	0,31	0,00	0,04	0,04
40	0,09	0,01	0,05	0,05
50	0,06	0,00	0,04	0,04
...	—	—	—	—
...	—	—	—	—
280	0,31	0,00	0,03	0,04
290	0,98	0,00	0,04	0,04
300	2,21	0,00	0,04	0,04
310	3,50	0,00	0,03	0,03
320	3,81	0,00	0,04	0,04
330	3,69	0,01	0,06	0,06
340	3,20	0,01	0,06	0,06
350	2,98	0,00	0,03	0,03
360	1,76	0,00	0,04	0,04
	$\Delta_{заг.с.}$			$\pm 0,04$

ДОДАТОК Е

Експериментальні дані функції подачі нитки залежно від технологічних параметрів стібка типу 101, отримані за двох факторним планом експерименту

Таблиця Е. 1

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для машини
GK9-2 матеріал $t=6,8$ мм, $m=0,4$ мм

Положення головного вала, ϕ	Порядковий номер досліду									
	19	11	23	35	30	33	17	22	10	16
град	мм									
0	0,2	-0,0	-0,3	0,1	-0,0	0,2	-0,1	0,0	0,1	-0,0
10	1,1	0,9	1,3	0,8	1,2	1,6	1,0	1,0	1,0	1,1
20	2,2	2,2	2,2	2,5	2,3	2,7	2,3	2,5	2,4	2,4
30	3,4	3,3	3,2	2,9	3,2	3,1	3,5	3,2	3,2	3,1
40	4,3	4,1	3,8	4,5	4,0	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2
50	5,8	5,8	5,4	5,6	5,4	5,7	5,4	5,7	5,8	5,6
60	6,5	6,6	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,7
70	7,5	7,9	7,7	7,9	7,6	7,7	7,7	7,8	7,9	7,2
80	9,5	9,8	9,3	9,7	9,2	9,2	9,5	9,7	9,3	9,3
90	12,0	12,3	12,4	12,4	12,2	12,1	12,1	12,5	12,1	12,1
100	15,2	15,2	15,1	15,2	15,1	15,1	15,2	15,1	15,3	15,2
110	19,6	19,7	20,0	19,5	19,8	19,8	19,7	19,8	19,8	20,0
120	24,4	24,4	24,6	24,2	24,5	24,6	24,6	24,3	24,5	24,7
130	28,4	28,6	28,8	29,0	28,6	28,7	28,8	28,9	29,0	28,9
140	32,6	32,4	32,5	32,7	32,6	32,5	32,3	32,7	32,6	32,6
150	34,6	34,8	34,8	34,4	34,4	34,9	34,4	34,7	34,6	34,6
160	35,8	35,7	35,4	35,5	35,4	35,7	35,9	35,7	36,1	35,6
172	35,6	35,5	35,6	35,6	35,7	35,4	35,8	35,4	35,6	35,8
172	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	24,8	25,4	25,2	24,8	25,3
180	25,2	25,1	25,0	24,9	24,9	24,9	25,2	25,2	24,9	25,0
190	24,9	25,1	25,2	25,3	25,0	25,4	25,3	25,2	25,3	25,1
200	25,3	25,3	25,1	25,1	25,4	25,3	25,1	25,4	25,2	25,0
210	25,0	25,4	24,8	24,7	25,2	25,1	25,4	25,4	25,1	25,1
220	25,2	25,3	25,4	25,2	25,2	25,4	25,3	25,2	25,3	25,1
230	25,2	24,9	25,2	25,1	25,1	24,8	25,1	25,0	25,3	24,7
244	25,4	24,9	25,3	25,2	25,0	25,0	25,1	25,2	25,0	25,2
244	15,1	15,2	14,9	14,7	14,9	15,0	14,9	14,8	15,0	14,9
250	15,1	15,2	14,9	14,7	14,9	15,0	14,9	14,8	15,0	14,9
260	15,1	15,2	14,9	14,7	14,9	15,0	14,9	14,8	15,0	14,9
270	15,5	15,8	15,3	16,0	15,7	15,5	15,6	15,7	15,4	15,8
280	16,8	16,8	17,1	17,2	16,9	16,9	17,2	17,2	17,2	16,9
290	17,1	17,1	17,4	17,5	17,5	17,3	17,5	17,1	17,5	17,5
300	18,1	17,8	17,9	17,7	17,8	17,8	17,7	17,6	17,8	18,0
310	18,3	18,3	18,1	18,2	18,3	18,5	18,2	18,5	18,3	18,2
320	18,6	18,1	18,3	18,6	18,5	18,4	18,4	18,4	18,4	18,3
330	19,8	19,9	19,8	19,5	19,6	19,5	19,7	19,5	19,8	19,7
340	19,5	19,6	19,9	19,6	19,8	19,8	19,8	19,9	19,8	20,1
350	19,8	19,5	19,6	19,6	19,6	19,6	19,8	19,6	19,5	19,9
360	19,7	19,7	19,3	19,9	19,6	19,9	19,7	19,7	19,7	19,8

Таблиця Е. 2

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=6,8 мм, m=0,4 мм)

Положення ГОЛОВНОГО вала φ, град	t=6,8мм, m=0,4 мм (x1=-1, x2=-1)			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	Δзаг.
0	0,0	0,02	0,11	0,11
10	1,1	0,05	0,16	0,16
20	2,4	0,02	0,11	0,11
30	3,2	0,03	0,12	0,12
40	4,2	0,03	0,13	0,13
50	5,6	0,03	0,12	0,12
60	6,6	0,01	0,08	0,09
70	7,7	0,06	0,17	0,17
80	9,4	0,05	0,15	0,16
90	12,2	0,03	0,12	0,12
100	15,2	5,4e-03	0,05	0,06
110	19,8	0,02	0,10	0,11
120	24,5	0,02	0,11	0,11
130	28,8	0,04	0,14	0,14
140	32,5	0,01	0,08	0,08
150	34,6	0,03	0,13	0,13
160	35,7	0,05	0,16	0,16
172	35,6	0,02	0,11	0,11
172	25,1	0,04	0,14	0,14
180	25,0	0,02	0,09	0,10
190	25,2	0,02	0,11	0,11
200	25,2	0,02	0,09	0,09
210	25,1	0,06	0,17	0,17
220	25,2	0,01	0,07	0,08
230	25,1	0,04	0,14	0,15
244	25,1	0,02	0,11	0,11
244	14,8	0,02	0,10	0,10
250	14,9	0,02	0,10	0,10
260	14,9	0,02	0,10	0,10
270	15,6	0,04	0,15	0,15
280	17,0	0,02	0,11	0,11
290	17,4	0,03	0,12	0,12
300	17,8	0,02	0,11	0,11
310	18,3	0,02	0,10	0,10
320	18,4	0,02	0,11	0,11
330	19,7	0,02	0,10	0,10
340	19,8	0,02	0,11	0,11
350	19,7	0,02	0,09	0,10
360	19,7	0,03	0,12	0,13

Таблиця Е. 3

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для машини GK9-2 (t=7,4 мм, m=0,4 мм)

Положення головного вала, φ	Порядковий номер досліду (x1=-1, x2=-1)									
	22	35	33	36	12	9	18	20	21	1
град	мм									
0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	1,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
20	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3
30	2,3	2,4	2,3	2,3	2,4	2,4	2,3	2,3	2,4	2,3
40	3,8	3,8	3,9	3,8	3,9	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8
50	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5
60	7,6	7,7	7,6	7,6	7,8	7,7	7,7	7,7	7,6	7,6
70	9,5	9,6	9,5	9,5	9,5	9,5	9,6	9,5	9,5	9,5
80	11,4	11,3	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,5	11,3	11,4
90	13,4	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,5	13,2	13,4	13,4
100	15,6	15,9	16,0	15,4	15,7	15,8	15,7	16,1	16,1	15,6
110	19,3	19,2	19,0	19,6	19,2	19,5	19,6	19,3	19,3	19,3
120	24,0	24,4	24,6	24,2	24,3	23,8	24,5	24,7	24,3	24,0
130	29,5	29,3	29,3	29,4	29,9	29,4	29,6	29,4	29,5	29,5
140	31,9	32,3	32,3	32,4	32,7	33,0	32,2	31,8	32,3	31,9
150	35,9	35,9	36,2	36,3	36,6	36,5	36,4	35,4	36,2	35,9
160	38,5	38,3	38,5	38,9	38,5	37,9	38,8	38,2	38,4	38,5
172	39,5	39,3	40,0	40,3	40,4	38,8	39,8	40,3	40,8	39,5
172	39,5	39,8	40,5	39,7	39,1	39,8	40,0	40,2	39,8	39,5
180	32,1	32,4	32,2	31,6	31,6	31,6	32,3	32,2	31,9	32,1
190	31,9	31,6	32,2	32,6	32,4	31,9	31,6	32,2	32,7	31,9
200	32,4	31,9	31,8	32,4	31,7	32,8	32,5	31,9	32,2	32,4
210	32,1	32,6	32,8	32,4	31,4	32,4	32,4	32,1	32,5	32,1
220	32,4	32,2	32,4	33,0	32,3	32,1	31,9	32,1	32,2	32,4
230	32,8	32,4	32,1	32,7	31,7	32,6	32,6	32,9	32,3	32,8
244	32,4	32,4	31,9	32,7	32,3	31,8	32,2	31,6	31,6	32,4
244	32,4	32,6	31,9	32,1	32,3	32,2	32,3	31,8	32,4	32,4
250	19,0	19,2	19,1	19,1	19,0	19,3	19,0	19,3	19,0	19,0
260	18,9	18,7	19,2	19,0	19,2	19,3	18,9	18,9	19,1	18,9
270	19,1	19,2	18,9	19,0	19,3	19,2	19,2	18,9	19,1	19,1
280	20,3	20,1	20,4	20,4	20,0	20,4	20,5	20,1	20,2	20,3
290	21,5	21,5	22,0	21,8	21,5	21,5	22,0	22,2	21,7	21,5
300	22,2	22,2	22,6	21,9	22,4	22,8	22,5	22,3	22,4	22,2
310	22,7	22,5	23,0	23,0	22,7	22,9	22,7	23,3	22,6	22,7
320	24,0	23,8	23,8	24,5	24,1	23,2	24,1	24,0	23,7	24,0
330	25,2	25,4	24,7	24,8	25,0	25,1	25,1	25,1	24,8	25,2
340	26,3	26,7	26,5	26,7	26,4	26,1	26,2	26,4	26,4	26,3
350	27,5	27,5	27,5	27,2	27,4	27,6	28,0	27,4	27,3	27,5
360	29,0	29,4	28,8	29,8	28,8	29,4	29,8	29,4	29,4	29,0

Таблиця Е. 4

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=7,4 мм, m=0,4 мм)

Положення головного вала φ, град	t=7,4 мм, m=0,4 мм (x1=+1, x2=-1)			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	Δзаг.
1	2	3	4	7
0	0,020	0,001	0,023	0,023
10	1,360	0,005	0,051	0,051
20	2,350	0,001	0,023	0,023
30	3,840	0,002	0,032	0,032
40	6,520	0,002	0,032	0,032
50	7,680	0,006	0,055	0,055
60	9,550	0,006	0,055	0,055
70	11,400	0,006	0,055	0,055
80	13,350	0,009	0,068	0,068
90	15,790	0,043	0,148	0,148
100	19,340	0,036	0,136	0,136
110	24,270	0,086	0,210	0,210
120	29,430	0,049	0,158	0,158
130	32,350	0,144	0,271	0,271
140	36,130	0,141	0,269	0,269
150	38,450	0,078	0,200	0,200
160	39,980	0,358	0,428	0,428
172	39,860	0,157	0,283	0,283
172	32,030	0,111	0,238	0,238
180	32,160	0,147	0,274	0,274
190	32,130	0,144	0,271	0,271
200	32,240	0,159	0,285	0,285
210	32,250	0,086	0,210	0,210
220	32,450	0,136	0,264	0,264
230	32,070	0,133	0,261	0,261
244	32,210	0,058	0,172	0,172
244	19,120	0,017	0,093	0,093
250	19,020	0,036	0,136	0,136
260	19,110	0,020	0,101	0,101
270	20,280	0,031	0,126	0,126
280	21,740	0,064	0,181	0,181
290	22,390	0,060	0,175	0,175
300	22,810	0,056	0,169	0,169
310	23,840	0,153	0,280	0,280
320	25,010	0,046	0,153	0,153
330	26,460	0,069	0,188	0,188
340	27,470	0,044	0,150	0,150
350	29,330	0,121	0,249	0,249
360	30,530	0,086	0,210	0,210

Таблиця Е. 5

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для
машини GK9-2 ($t=6,8$ мм, $m=8$ мм)

Положення Головного вала, φ	Порядковий номер досліду ($x_1=-1$, $x_2=+1$)									
	9	15	19	21	11	20	24	3	25	6
град	мм									
0	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
10	1,04	1,07	0,98	0,98	0,96	0,91	1,01	0,95	1,06	0,91
20	2,53	2,52	2,54	2,50	2,56	2,50	2,47	2,53	2,48	2,49
30	3,03	3,03	3,03	2,96	3,03	3,02	3,10	2,97	3,05	2,91
40	4,03	3,91	4,04	3,97	3,89	4,06	4,00	4,09	4,07	4,02
50	4,86	4,92	4,88	4,80	4,86	4,89	4,85	4,84	4,90	4,85
60	6,00	5,92	6,00	6,03	6,05	5,97	5,99	5,95	5,90	6,07
70	7,86	7,86	7,86	7,90	7,62	7,90	7,77	7,89	7,84	7,86
80	9,85	10,00	9,71	9,95	9,74	9,96	9,80	9,87	9,74	9,75
90	14,21	14,36	14,24	14,14	14,10	14,17	14,11	14,21	14,21	13,89
100	19,32	19,45	19,50	19,71	19,38	19,60	19,27	19,39	19,13	19,25
110	23,81	24,30	24,15	24,50	24,01	24,32	24,41	24,31	24,21	24,15
120	29,97	29,70	30,40	30,22	29,83	30,36	30,59	30,16	30,72	30,77
130	34,91	34,13	34,80	34,25	34,45	34,70	34,27	34,50	34,65	34,40
140	40,46	40,72	40,07	39,46	40,75	40,48	40,72	39,41	39,82	40,42
150	44,75	43,78	43,50	43,77	43,74	44,22	43,90	44,55	45,03	44,56
160	46,58	45,77	46,59	46,74	46,45	46,14	46,22	46,59	47,75	46,38
172	45,72	45,64	46,29	46,68	45,95	46,54	47,06	46,19	46,55	47,07
172	34,33	34,08	34,99	34,97	34,38	33,86	34,53	34,69	35,96	34,56
180	34,28	35,20	34,77	34,72	34,97	34,74	34,10	34,94	34,66	34,29
190	34,51	35,30	34,70	34,71	34,60	35,28	34,33	35,24	34,58	34,42
200	34,78	34,87	34,26	34,73	35,04	34,78	35,09	34,25	35,37	34,59
210	34,83	34,87	34,62	35,20	35,19	34,63	34,51	34,96	34,17	34,69
220	34,67	35,12	34,57	35,20	34,92	34,70	35,18	34,48	34,75	34,60
230	34,77	33,77	34,58	34,90	34,39	34,45	34,28	35,15	34,94	34,59
244	34,03	34,08	34,83	34,45	34,96	34,29	34,42	34,98	34,70	35,27
244	25,04	24,65	25,34	25,02	25,39	24,90	25,05	25,67	25,21	25,63
250	25,24	25,07	25,24	25,42	25,23	25,20	24,88	25,59	25,47	24,98
260	24,88	25,32	25,07	25,34	25,30	25,42	24,88	25,31	24,91	25,06
270	25,16	25,37	25,60	25,22	25,57	25,28	24,73	25,66	25,47	25,34
280	25,15	25,58	25,35	25,94	25,19	26,08	25,49	25,34	25,14	25,70
290	25,76	25,81	25,84	25,89	25,54	25,77	25,72	25,41	25,65	25,91
300	25,49	25,92	25,92	26,44	25,80	25,74	25,93	25,92	26,10	25,86
310	26,33	25,76	25,86	25,85	26,39	25,86	26,58	25,75	26,65	26,03
320	27,52	26,62	27,22	26,49	27,48	26,85	27,23	26,93	27,14	26,55
330	27,56	27,53	27,95	27,96	27,29	28,55	28,23	27,48	27,81	28,05
340	27,84	28,88	28,40	28,77	28,62	28,62	28,12	28,38	28,56	28,65
350	30,92	30,85	30,67	30,46	31,12	30,84	30,88	31,04	30,87	31,04
360	32,40	33,21	32,37	32,59	32,74	32,87	32,67	33,07	32,23	32,47

Таблиця Е. 6

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=6,8 мм, m=8 мм)

Положення головного вала φ, град	t=6,8 мм, m=8 мм (x1=-1, x2=+2)			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	Δзаг.
1	2	3	4	5
0	0,020	0,001	0,023	0,02
10	1,360	0,005	0,051	0,04
20	2,350	0,001	0,023	0,02
30	3,840	0,002	0,032	0,04
40	6,520	0,002	0,032	0,05
50	7,680	0,006	0,055	0,02
60	9,550	0,006	0,055	0,04
70	11,400	0,006	0,055	0,06
80	13,350	0,009	0,068	0,07
90	15,790	0,043	0,148	0,08
100	19,340	0,036	0,136	0,12
110	24,270	0,086	0,210	0,14
120	29,430	0,049	0,158	0,25
130	32,350	0,144	0,271	0,17
140	36,130	0,141	0,269	0,35
150	38,450	0,078	0,200	0,35
160	39,980	0,358	0,428	0,35
172	39,860	0,157	0,283	0,28
172	32,030	0,111	0,238	0,40
180	32,160	0,147	0,274	0,24
190	32,130	0,144	0,271	0,25
200	32,240	0,159	0,285	0,24
210	32,250	0,086	0,210	0,21
220	32,450	0,136	0,264	0,18
230	32,070	0,133	0,261	0,27
244	32,210	0,058	0,172	0,28
244	19,120	0,017	0,093	0,22
250	19,020	0,036	0,136	0,15
260	19,110	0,020	0,101	0,14
270	20,280	0,031	0,126	0,18
280	21,740	0,064	0,181	0,22
290	22,390	0,060	0,175	0,11
300	22,810	0,056	0,169	0,17
310	23,840	0,153	0,280	0,24
320	25,010	0,046	0,153	0,25
330	26,460	0,069	0,188	0,26
340	27,470	0,044	0,150	0,21
350	29,330	0,121	0,249	0,13
360	30,530	0,086	0,210	0,21

Таблиця Е. 7

Експериментальні значення функції необхідної подачі нитки для машини GK9-2 матеріал m=8 мм t=7,4 мм

Положення головного вала, φ	Порядковий номер дослідів									
	15	23	1	36	10	5	28	21	34	27
град	мм									
0	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
10	1,14	1,12	1,15	1,22	1,07	1,13	1,11	1,13	1,14	1,13
20	3,25	3,23	3,29	3,33	3,34	3,30	3,32	3,32	3,26	3,32
30	4,75	4,78	4,70	4,76	4,87	4,78	4,78	4,79	4,82	4,85
40	5,49	5,44	5,46	5,36	5,43	5,46	5,46	5,37	5,46	5,44
50	6,76	6,87	6,82	6,65	6,76	6,84	6,82	6,78	6,87	6,74
60	8,33	8,31	8,18	8,28	8,06	8,36	8,28	8,29	8,29	8,22
70	10,71	10,82	10,92	10,86	10,95	10,72	10,88	10,84	10,97	10,95
80	15,36	15,40	15,54	15,29	15,27	15,23	15,41	15,33	15,28	15,31
90	20,51	20,10	20,50	20,35	20,95	20,33	20,61	20,35	19,98	20,24
100	25,92	26,04	25,50	25,97	26,08	25,35	26,18	25,80	25,32	25,73
110	31,29	30,75	30,58	31,01	30,69	30,20	31,13	30,87	31,24	30,70
120	35,70	35,59	35,57	36,42	35,79	36,51	36,14	36,01	36,27	36,04
130	40,86	40,42	40,72	40,71	40,27	40,95	41,21	40,80	41,12	39,97
140	45,30	45,27	45,36	45,04	45,98	45,57	44,33	44,84	45,77	44,73
150	48,12	47,99	47,81	48,23	47,84	47,88	47,23	48,38	47,71	47,48
160	50,29	50,31	50,94	50,25	49,66	49,61	49,59	49,14	49,55	49,77
172	49,93	49,57	49,60	50,16	49,52	49,14	49,77	49,31	48,91	49,40
172	35,33	35,71	35,84	35,71	35,88	35,46	35,79	35,89	36,04	36,16
180	35,68	35,53	35,54	35,91	36,03	36,04	36,25	35,58	36,36	35,37
190	35,94	36,22	36,33	35,74	35,24	35,61	35,64	36,03	35,50	35,78
200	35,86	35,88	35,82	36,05	35,51	36,29	36,35	36,13	35,32	35,74
210	36,11	35,55	36,13	36,42	35,62	36,16	35,81	35,48	35,52	35,67
220	36,00	35,09	35,88	36,36	35,98	36,71	35,51	36,03	36,60	36,16
230	36,11	35,71	35,78	35,76	36,18	36,23	35,68	35,89	36,17	36,00
244	36,24	35,51	35,65	35,60	35,62	35,06	36,17	35,29	36,11	36,14
244	25,45	25,20	25,40	25,18	25,69	25,49	25,68	25,57	25,52	25,59
250	25,93	25,18	26,09	25,63	25,69	25,86	25,48	25,51	25,91	25,61
260	25,26	25,68	25,61	25,77	26,14	25,51	25,62	25,14	25,37	25,78
270	26,73	26,90	26,62	26,42	26,78	26,65	26,57	26,38	26,55	26,29
280	26,58	27,26	27,00	26,94	26,83	27,42	27,22	27,67	27,20	26,50
290	27,54	27,49	27,01	27,04	27,35	27,31	27,30	27,45	27,96	26,91
300	27,55	27,18	27,22	27,63	27,92	27,54	27,51	27,46	27,49	27,70
310	28,70	28,39	28,35	28,37	28,42	28,45	28,06	28,20	28,17	28,60
320	28,56	28,77	28,79	28,68	28,75	29,00	28,93	29,03	29,20	28,50
330	29,07	29,63	29,07	29,42	29,59	29,85	29,66	29,43	29,23	29,11
340	32,37	31,94	31,85	31,90	31,71	32,00	32,92	31,96	31,78	31,87
350	32,52	31,99	32,76	32,55	32,63	33,08	32,61	32,91	32,92	32,63
360	34,04	33,66	35,12	34,18	34,82	34,22	34,12	33,90	34,98	34,42

Таблиця Е. 8

Результати обрахунку експериментальних значень функції необхідної подачі
нитки для машини GK9-2 (t=7,4 мм m=8 мм)

Положення головного вала φ, град	t=7,4 мм m=8 мм (x1=+1, x2=+1)			
	$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$	$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$	$\Delta_{c.p.} = t_p \sqrt{\frac{D}{N}}$	Δзаг.
1	2	3	4	7
0	0,020	0,001	0,023	0,02
10	1,130	0,001	0,023	0,03
20	3,300	0,001	0,023	0,03
30	4,790	0,002	0,032	0,03
40	5,440	0,002	0,032	0,03
50	6,790	0,005	0,051	0,05
60	8,260	0,008	0,064	0,06
70	10,860	0,008	0,064	0,06
80	15,340	0,008	0,064	0,06
90	20,390	0,074	0,195	0,19
100	25,790	0,094	0,219	0,21
110	30,850	0,111	0,238	0,23
120	36,000	0,113	0,240	0,23
130	40,700	0,148	0,275	0,26
140	45,220	0,249	0,357	0,34
150	47,870	0,118	0,246	0,23
160	49,910	0,275	0,375	0,36
172	49,530	0,136	0,264	0,30
172	35,780	0,061	0,177	0,17
180	35,830	0,113	0,240	0,23
190	35,800	0,111	0,238	0,23
200	35,890	0,106	0,233	0,22
210	35,850	0,110	0,237	0,23
220	36,030	0,233	0,345	0,33
230	35,950	0,045	0,152	0,14
244	35,740	0,166	0,291	0,28
244	25,480	0,031	0,126	0,12
250	25,690	0,071	0,191	0,18
260	25,590	0,083	0,206	0,20
270	26,590	0,036	0,136	0,13
280	27,060	0,134	0,262	0,25
290	27,340	0,094	0,219	0,21
300	27,520	0,046	0,153	0,15
310	28,370	0,037	0,138	0,13
320	28,820	0,048	0,157	0,15
330	29,410	0,077	0,198	0,19
340	32,030	0,129	0,257	0,24
350	32,660	0,089	0,213	0,20
360	34,350	0,232	0,345	0,33

Таблиця Е. 9

Таблиця значень вагових коефіцієнтів

φ, град.	a0	a1	a2	a12
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
10.00	0.978	0.027	-0.013	-0.001
20.00	2.383	0.051	0.045	0.010
30.00	2.801	0.166	0.032	0.013
40.00	3.170	0.253	-0.054	-0.010
50.00	4.544	0.270	-0.073	-0.002
60.00	5.269	0.348	-0.084	-0.008
70.00	6.022	0.453	-0.013	-0.008
80.00	7.609	0.639	0.106	0.019
90.00	10.627	0.659	0.287	0.031
100.00	13.637	0.723	0.457	0.026
110.00	18.296	0.733	0.481	0.026
120.00	22.889	0.730	0.539	0.007
130.00	27.850	0.645	0.610	0.032
140.00	31.849	0.578	0.713	0.015
150.00	34.230	0.510	0.800	-0.002
160.00	35.230	0.500	0.879	-0.015
170.00	35.230	0.500	0.879	-0.015
170.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
180.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
190.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
200.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
210.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
220.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
230.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
240.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
250.00	23.599	0.557	0.571	-0.068
260.00	14.655	0.304	0.724	-0.044
270.00	15.027	0.399	0.690	-0.038
280.00	16.144	0.443	0.597	-0.037
290.00	16.417	0.449	0.575	-0.039
300.00	16.833	0.446	0.556	-0.041
310.00	16.988	0.520	0.530	-0.041
320.00	18.110	0.507	0.496	-0.043
330.00	18.033	0.564	0.476	-0.061
340.00	19.500	0.655	0.513	-0.035
350.00	21.133	0.574	0.496	-0.055
360.00	22.093	0.588	0.530	-0.061

Таблиця Е. 10

Оцінка впливу факторів на функцію необхідної подачі нитки

φ	a_1	a_2	a_{12}	$ \partial y / \partial x_1 $	$ \partial y / \partial x_2 $	Домінуючий фактор	$ \nabla y $ з a_{12}	$ \nabla y $ без a_{12}	Зміна ∇y (%)	$ a_{12} $ (dx_1)	$ a_{12} $ (dx_2)	Сер. внесок a_{12}
0	0	0	0	0	0	x_2	0	0		0	0	0
10	0.027	-0.013	-0.001	0.027	0.013	x_1	0.0295	0.0300	-1.4583	0.001	0.001	0.001
20	0.051	0.045	0.01	0.051	0.045	x_1	0.0821	0.0680	20.7592	0.01	0.01	0.01
30	0.166	0.032	0.013	0.166	0.032	x_1	0.1846	0.1691	9.1766	0.013	0.013	0.013
40	0.253	-0.054	-0.01	0.253	0.054	x_1	0.2513	0.2587	-2.8651	0.01	0.01	0.01
50	0.27	-0.073	-0.002	0.27	0.073	x_1	0.2783	0.2797	-0.4998	0.002	0.002	0.002
60	0.348	-0.084	-0.008	0.348	0.084	x_1	0.3522	0.3580	-1.6110	0.008	0.008	0.008
70	0.453	-0.013	-0.008	0.453	0.013	x_1	0.4455	0.4532	-1.6972	0.008	0.008	0.008
80	0.639	0.106	0.019	0.639	0.106	x_1	0.6698	0.6477	3.4020	0.019	0.019	0.019
90	0.659	0.287	0.031	0.659	0.287	x_1	0.7598	0.7188	5.6998	0.031	0.031	0.031
100	0.723	0.457	0.026	0.723	0.457	x_1	0.8912	0.8553	4.1980	0.026	0.026	0.026
110	0.733	0.481	0.026	0.733	0.481	x_1	0.9128	0.8767	4.1099	0.026	0.026	0.026
120	0.73	0.539	0.007	0.73	0.539	x_1	0.9172	0.9074	1.0789	0.007	0.007	0.007
130	0.645	0.61	0.032	0.645	0.61	x_1	0.9330	0.8878	5.0957	0.032	0.032	0.032
140	0.578	0.713	0.015	0.578	0.713	x_2	0.9390	0.9179	2.2989	0.015	0.015	0.015
150	0.51	0.8	-0.002	0.51	0.8	x_2	0.9460	0.9487	-0.2911	0.002	0.002	0.002
160	0.5	0.879	-0.015	0.5	0.879	x_2	0.9908	1.0113	-2.0211	0.015	0.015	0.015
170	0.5	0.879	-0.015	0.5	0.879	x_2	0.9908	1.0113	-2.0211	0.015	0.015	0.015
170	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
180	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
190	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
200	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
210	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
220	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
230	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
240	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
250	0.557	0.571	-0.068	0.557	0.571	x_2	0.7015	0.7977	-12.0548	0.068	0.068	0.068
260	0.304	0.724	-0.044	0.304	0.724	x_2	0.7280	0.7852	-7.2874	0.044	0.044	0.044
270	0.399	0.69	-0.038	0.399	0.69	x_2	0.7453	0.7971	-6.4976	0.038	0.038	0.038
280	0.443	0.597	-0.037	0.443	0.597	x_2	0.6917	0.7434	-6.9570	0.037	0.037	0.037
290	0.449	0.575	-0.039	0.449	0.575	x_2	0.6748	0.7295	-7.4990	0.039	0.039	0.039
300	0.446	0.556	-0.041	0.446	0.556	x_2	0.6552	0.7128	-8.0819	0.041	0.041	0.041
310	0.52	0.53	-0.041	0.52	0.53	x_2	0.6845	0.7425	-7.8088	0.041	0.041	0.041
320	0.507	0.496	-0.043	0.507	0.496	x_1	0.6485	0.7093	-8.5732	0.043	0.043	0.043
330	0.564	0.476	-0.061	0.564	0.476	x_1	0.6521	0.7380	-11.6419	0.061	0.061	0.061
340	0.655	0.513	-0.035	0.655	0.513	x_1	0.7829	0.8320	-5.9031	0.035	0.035	0.035
350	0.574	0.496	-0.055	0.574	0.496	x_1	0.6811	0.7586	-10.2229	0.055	0.055	0.055
360	0.588	0.53	-0.061	0.588	0.53	x_1	0.7055	0.7916	-10.8813	0.061	0.061	0.061

ДОДАТОК Є

Розрахунок власної частоти коливання балочки

Власну частоту ν коливань балочки визначається за формулою:

$$\nu = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (\text{Є.1})$$

де λ - безрозмірна величина в залежності від способу кріплення балочки; для випадку, що розглядається

$$\lambda^2 = 3,516;$$

де l -довжина балочки, см;

E - модуль пружності першого роду, для сталі

J - момент інерції перетину балки, см³

m - лінійна вага балки, кг/см.

Величина J визначається з рівняння

$$J = \frac{hb^3}{12}, \quad (\text{Є.2})$$

де h - висота балочки, см;

b - товщина балочки, см.

Лінійну масу балочки знаходимо з рівняння

$$m = \rho hb, \quad (\text{Є.3})$$

де ρ - питома щільність матеріалу балки; для сталі

$$\rho = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3.$$

Розраховуючи систему рівнянь (1-3) при відомих $l=4,9$ см та $b=0.25$ см, отримуємо: $\nu=850$ Гц.

Порівняємо цю величину з найбільшою частотою в коливаннях досліджуваного процесу. Як показує аналіз процесу формування одониткового ланцюгового стібка, збільшення натягу верхньої нитки спостерігається один раз за один оберт основного валу /в періоди затягування стібка.

Таким чином, при частоті обертання машини 1000 об / хв значення ν дорівнює 166 Гц, тобто в 5 разів менше значення ν .

ДОДАТОК Ж

Програмний скетч код Arduino для обробки даних визначення зусилля натягу нитки

```
#include <HX711.h>
#include <Arduino.h>
// Піни підключення
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2; // DT з HX711
const int LOADCELL_SCK_PIN = 3; // SCK з HX711
const int HALL_SENSOR_PIN = 4; // Датчик Холла
HX711 scale;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(HALL_SENSOR_PIN, INPUT);
  // Ініціалізація тензодатчика
  scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
  // КАЛІБРУВАННЯ: за потреби змінити 200.0 на своє значення
  scale.set_scale(200.0); // ← Твій коефіцієнт (після вимірювання)
  scale.tare(); // Обнулення
  Serial.println("Готово. Serial Plotter → графік ваги та магніта:");
  Serial.println("Формат: натяг, Магніт_0або1");
}
void loop() {
  float weight = scale.get_units(5); // усереднення 5 вимірів
  int hallState = digitalRead(HALL_SENSOR_PIN); // HIGH = магніт присутній
  // Вивід у форматі для графіку:
  Serial.print(weight); // показник натягу
  Serial.print(", ");
  Serial.println(hallState); // показник обертів
  delay(300); // оновлення
}
```

ДОДАТОК 3

Впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
діяльності (освітня діяльність)
Київського національного
університету технологій та дизайну

«29» Травня 2025 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну Безуглого Дмитра Миколайовича па тему «Удосконалення швейних машин для виготовлення армуючих елементів композитних виробів» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

Комісія у складі:

Голова:

Воляник Олексій Юрійович, к.т.н., доцент, завідувач кафедри механічної інженерії:

Члени комісії:

Манойленко Олександр Петрович, к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії:

Дворжак Володимир Миколайович, к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії:

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Безуглого Дмитра Миколайовича використовуються у освітньому процесі кафедри механічної інженерії Київського національного університету технологій та дизайну при підготовці та викладанні лекційного курсу і проведенні лабораторних занять з дисципліни «Проектування машин легкої промисловості», тематиках магістерських кваліфікаційних робіт.

Голова комісії:

Завідувач кафедри МІ,
к.т.н., доцент

Олексій ВОЛЯНИК

Члени комісії

Доцент кафедри МІ,
к.т.н., доцент

Олександр МАНОЙЛЕНКО

Доцент кафедри МІ,
к.т.н., доцент

Володимир ДВОРЖАК

«29» Травня 2025 р.