

О.М. Моргун, к.т.н., доц.  
І.П. Частоколенко, к.ф.-м.н.

Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобіля

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Обговорюються основні складові математичної моделі технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій методом намотки. Представлено найважливіші розрахункові співвідношення, методи обчислень та критерії вибору оптимальних рішень. Отримані результати використовуються для розрахунку програм управління намотувальними верстатами, обладнаними системами ЧПУ.*

**Постановка проблеми.** Відомо, що технологічний процес намотки вже давно добре зарекомендував себе в авіаційній та суднобудівній галузях промисловості. На його базі вдається виготовляти надзвичайно легковагомні оболонкові конструкції, здатні надійно працювати в екстремальних умовах [1], [2]. Враховуючи, що технологія намотки придатна для створення із композиційних матеріалів досить складнопрофільних виробів, можна говорити про серйозні перспективи її використання для розробки пожежно-технічного озброєння, технічних засобів пожежогасіння та протипожежного захисту [3].

Технологічний процес намотки реалізують на намотувальних верстатах, переважно токарного типу, обладнаних системами числового програмного управління. Центральною ланкою системи програмного управління є програма намотки, яка, керуючи робочими органами верстата, веде неперервну укладку витків стрічки на поверхню оправки. Таким чином, від якості розрахунку програми намотки залежить і якість виробу, і продуктивність процесу його виготовлення.

Задача розрахунку програми намотки розв'язується на базі комплексної математичної моделі траєкторій укладки та поведінки стрічки на поверхні оправки, технологічних умов процесу протягування волокон через стрічкоформуєчий тракт, а також кінематичних та динамічних характеристик намотувального верстата. Все це визначає наявність надзвичайно складних обчислювальних проблем навіть у випадках найпростіших оболонок обертання з опуклою твірною [4].

**Мета і задачі роботи.** Метою роботи є визначення узагальнених складових математичної моделі технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій методом намотки. Все це має стати базою для створення комплексу спеціальних методів та розрахункових алгоритмів у складі автоматизованої системи підготовки програм намотки (АСППН).

Основні завдання досліджень пов'язуються з можливістю використання технологічного процесу намотки для виготовлення виробів нетрадиційної форми з підвищеними технологічними вимогами до точності та режиму укладки стрічки на поверхню оправки. До них належать розробка методів розрахунку стійких ліній укладки стрічки, вибору технологічно оптимальних траєкторій переміщення точки виходу стрічки, методів переходу від просторових траєкторій до координатних переміщень робочих органів верстата з урахуванням його динамічних характеристик та багато інших. Досить важливі питання треба вирішувати також і на шляху створення ефективних розрахункових алгоритмів.

**Виклад основної частини.** Розглянемо основні задачі процесу розрахунків програм намотки і дамо їм загальну характеристику з точки зору використовуваних критеріїв, забезпечення вимог технології намотки, застосованих методів розв'язування, від чого залежать витрати обчислювальних ресурсів, а також можливості досягнення належної точності.

Метою розрахунку траєкторії намотки є визначення деякої лінії на поверхні обертання, вздовж якої повинна виконуватись укладка стрічки. Ця лінія може бути задана поточними значеннями своїх циліндричних координат  $z$ ,  $r$ ,  $v$ , де  $r = r(z)$  – задана неперервно диференційована функція, що являє собою рівняння твірної поверхні обертання;  $z$  – координата вздовж осі обертання;  $v = v(z)$  – кут закручування траєкторії намотки. Задача розв'язується шляхом обчислення невласного інтеграла [5]:

$$v = v(z_n) + \int_{z_n}^z C \cdot \frac{\sqrt{(1+r'^2)/(r^2-C^2)}}{r} \cdot dz, \quad z_n \leq z \leq z_k, \quad (1)$$

© О.М. Моргун, І.П. Частоколенко, 2004  
де відрізок  $[z_n, z_k]$  – зона намотки;  $v(z_n)$  – початкове значення кута закручування, яке звичайно приймається рівним нулю. Необхідна при цьому функція Клеро траєкторії намотки:

$$C = C(z) = r \cdot \sin \alpha \tag{2}$$

визначається внаслідок попереднього інтегрування диференціального рівняння [6]:

$$C' = \mu \cdot \left[ C^2/r^2 - r \cdot r'' \cdot (1 - C^2/r^2) / (1 + r'^2) \right], \tag{3}$$

що містить невідомий параметр  $\mu$ , з граничними умовами:

$$C(z_n) = r(z_n), C(z_k) = r(z_k), \tag{4}$$

де  $\alpha = \alpha(z)$  – кут між кривою намотки і меридіаном поверхні обертання;  $r(z_n)$  і  $r(z_k)$  – радіуси полюсних отворів оболонки;  $\mu = \mu(z)$  – тангенс кута геодезичного відхилення лінії намотки, який характеризує рівень стійкості утримування стрічки на поверхні.

Для максимально стійких траєкторій намотки оболонок з опуклою твірною ( $r'' \leq 0$ ) функція Клеро може бути отримана внаслідок безпосереднього інтегрування диференціального рівняння (3). При цьому, в залежності від радіусів полюсних отворів та потрібних значень кутів намотки на заданих паралелях оболонки, на поверхні може бути отримана геодезична лінія ( $\mu = 0$ ), лінія сталого відхилення від геодезичної ( $\mu = \text{const}$ ) або лінія, закон зміни  $\mu(z)$  для якої має кусково-сталий характер [7]. Інтегрування (3) виконується одним із відомих чисельних методів, причому визначення невідомого параметра  $\mu = \text{const}$  базується на використанні способу пристрілювання та зшивання розв'язків [8].

Значно складніші проблеми виникають для оболонок з ввігнутою твірною ( $r'' > 0$ ). У таких випадках при визначенні максимально стійких траєкторій намотки може застосовуватись критерій оптимізації:

$$\max_{[z_n, z_k]} |\mu(z)| \rightarrow \min, \tag{5}$$

при обмеженнях

$$0 \leq C \leq r, C^2 \geq r^3 \cdot r'' / (1 + r'^2 + r \cdot r''), \tag{6}$$

і граничних умовах (4).

Перше із обмежень (6), з одного боку ( $C \geq 0$ ), забезпечує неспадання кута закручування ( $0 \leq \alpha \leq \pi$ ), а з другого боку ( $C \leq r$ ), враховує вираз (2). Друге із обмежень (6) використовується при  $r'' > 0$  і забезпечує прилягання стрічки до поверхні оболонки. Його зміст полягає в тому, що стрічка прилягає до поверхні обертання з ввігнутою твірною тільки в тому випадку, коли кут її намотки не менший деякого граничного.

Якісний аналіз результатів розв'язування оптимізаційної задачі (5) показав, що відповідність оптимальної функції Клеро мінімаксному критерію досягається у разі, якщо вона являє собою неперервну послідовність ділянок границі області допустимих розв'язків, а також ділянок функції Клеро зі сталими значеннями параметра  $\mu$ . При цьому взаємне положення оптимальної функції Клеро та границі області допустимих розв'язків має характер дотику в усіх тих точках, де вони співпадають. Указаних умов достатньо для формування алгоритму прямого пошуку оптимальної функції Клеро, який є значно ефективнішим за обсягом розрахунків у порівнянні зі стандартними чисельними методами оптимізації.

Отримані на етапі розрахунку траєкторії намотки поточні значення її циліндричних координат  $z(x)$ ,  $r(x)$ ,  $v(x)$  дозволяють поставити у відповідність кожній точці траєкторії намотки на поверхні оболонки деяку точку у просторі за допомогою векторного співвідношення:

$$\bar{R} = \bar{r} + l \cdot \bar{\tau}, \tag{7}$$

де  $\bar{r}$  – радіус-вектор поверхні обертання в циліндричній жорстко зв'язаній з оправкою системі координат з правим ортонормованим базисом  $\bar{e} = \bar{e}(v)$ ,  $\bar{e}' = \bar{e}(v + \pi/2)$ ,  $\bar{k}$ , який має вигляд:

$$\bar{r} = r \cdot \bar{e} + z \cdot \bar{k}, \tag{8}$$

де  $\bar{\tau}$  – одиничний вектор дотичної до траєкторії намотки, який визначається виразом:

$$\bar{\tau} = (r' \cdot \bar{e} + \bar{k}) \cdot \cos \alpha / \sqrt{1 + r_z'^2} + \bar{e}' \cdot \sin \alpha, \tag{9}$$

де  $l = l(x)$  – довжина ділянки вільної стрічки між точкою її виходу і точкою контакту з оправкою;  $x$  – деякий монотонно зростаючий геометричний параметр процесу намотки [9].

Із (7) видно, що при завданні тим чи іншим способом закону зміни  $l(x)$  однозначно визначається просторова траєкторія  $\bar{R}$  джерела стрічки (траєкторія точки її виходу), яка належить лінійчастій поверхні, що є геометричним місцем дотичних до розрахованої траєкторії намотки [5]. При цьому переміщення джерела стрічки вздовж траєкторії її виходу забезпечує реалізацію потрібної траєкторії намотки на поверхні оболонки.

Із (7) можна отримати вирази [9] для циліндричних координат  $Z(x)$ ,  $R(x)$ ,  $V(x)$  точки виходу стрічки:

$$\begin{aligned} Z &= z + l \cdot \cos \alpha / \sqrt{1 + r_z'^2}, \\ R &= \sqrt{d^2 + l^2 \cdot \sin^2 \alpha}, \\ V &= v + \arccos(d/R), \end{aligned} \quad (10)$$

де  $d = r + l \cdot r_z' \cdot \cos \alpha / \sqrt{1 + r_z'^2}$ .

Отже, метою чергового етапу розрахунку програми намотки є визначення просторової траєкторії точки виходу стрічки, і ця задача може бути зведена до вибору певного закону зміни довжини ділянки вільної стрічки  $l(x)$ . При цьому, як видно із (10), від виду  $l(x)$  залежить форма траєкторії точки виходу стрічки на площині  $Z \times R$ .

Оскільки задана траєкторія намотки може бути реалізована множиною законів  $l(x)$ , то вводяться додаткові умови геометричного або технологічного характеру, які дозволяють визначити єдину траєкторію точки виходу стрічки.

За допомогою умови геометричного характеру, яка у загальному випадку описується виразом виду [4]:

$$f(Z, R) = 0, \quad (11)$$

може бути задана та чи інша форма траєкторії точки виходу стрічки на площині  $Z \times R$ . Найбільш відомими з них є рівноточна траєкторія, траєкторія, паралельна осі обертання оправки [10], сквідистантна траєкторія [11] та інші.

Шуканий закон зміни довжини ділянки вільної стрічки може бути отриманий при цьому шляхом розв'язування системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (10) і (11).

Як недолік такого методу слід відмітити довільний характер завдання рівняння (11), який не враховує вимог технології намотки. Зокрема, при використанні (11) довільного вигляду можливі порушення деяких із обмежень на закон  $l(x)$ , що забезпечують можливість реалізації процесу намотки. До складу таких обмежень входять [12]: умова циклічності, належність траєкторії точки виходу стрічки досягнутому простору намотувального верстата, непровисання стрічки між точкою виходу та точкою контакту з оправкою, а також умова відсутності зворотніх обертів оправки.

Від вказаних недоліків вільні критерії технологічного характеру. Крім того, вони дозволяють мінімізувати вплив швидкості протягування стрічки через просочувальний вузол стрічкоформуєного тракту, яка є основним збурюючим фактором процесу регулювання натягу та вмісту зв'язуючого матеріалу в стрічці. За рахунок цього можна суттєво покращити якість виробів.

Розглянемо задачу розрахунку просторових траєкторій точки виходу стрічки з мінімальним діапазоном зміни швидкості протягування стрічки через просочувальний вузол стрічкоформуєного тракту.

Нехай  $l_i = l_i(x)$ ,  $i \in [1: M]$  – множина допустимих законів зміни довжини ділянки вільної стрічки при реалізації заданої траєкторії намотки, для кожного з яких може бути побудований відповідний закон зміни довжини протягнутої через просочувальний вузол стрічки:

$$\lambda_i = l_i + s - k \cdot R, \quad (12)$$

де  $s = s(x)$  – поточна довжина укладеної стрічки, а значення  $k$  залежить від типу стрічкоформуєного тракту (при  $k = 0$  просочувальний вузол переміщується, а при  $k = 1$  – не переміщується вздовж

координати  $R$ ). Функції  $l_i$  задано в замкненій області на площині  $x \times l$ , яка визначається співвідношеннями  $x_n \leq x \leq x_k$  і  $l_{\min}(x) \leq l(x) \leq l_{\max}(x)$ .

Необхідно визначити закон зміни  $l(x)$ , для якого відносна швидкість протягування стрічки  $u(x) = d\lambda/dx$  задовольняє таким вимогам:

1) досягається максимум нижньої межі відносної швидкості протягування стрічки:

$$u_{\min} = \max_{i \in [1:M]} \min_{x_n \leq x \leq x_k} d\lambda_i/dx \quad (13)$$

при умові циклічності траєкторії точки виходу стрічки  $l(x_n) = l(x_k)$  і при непровисанні стрічки на своїй вільній ділянці  $d(l + s)/dx \geq 0$ ;

2) досягається мінімум верхньої межі відносної швидкості протягування стрічки:

$$u_{\max} = \min_{i \in [1:M]} \max_{x_n \leq x \leq x_k} d\lambda_i/dx \quad (14)$$

при умовах циклічності та непровисання, а також при  $d\lambda/dx \geq u_{\min}$ ;

3) досягає мінімуму функціонал:

$$\Phi(l) = \int_{x_n}^{x_k} (d\lambda/dx - U)^2 \cdot dx \quad (15)$$

при умовах циклічності та непровисання, а також при  $u_{\min} \leq d\lambda/dx \leq u_{\max}$ , де  $U$  – середнє значення швидкості протягування.

В такій постановці задачі досягається мінімальне значення діапазону зміни швидкості протягування стрічки та максимально можливе усунення її ривків при максимальній нижній межі швидкості, що гарантує найменше прослаблення стрічки в просочувальному вузлі стрічкоформуєчого тракту. Додаткові позитивні характеристики таких траєкторій точки виходу стрічки пов'язані із підвищенням якості регулювання технологічних параметрів, з покращенням умов експлуатації намотувальних верстатів, зниженням обірваності ниток у складі стрічки, зниженням витрат матеріалів тощо.

Наступний етап розрахунку програми намотки — перехід від просторової траєкторії точки виходу стрічки до координатних переміщень робочих органів намотувального верстата. Для його реалізації доцільно скористуватись відповідною формалізованою процедурою [13].

Формалізована процедура використовує апарат матричної алгебри, а в її основу покладена узагальнена кінематична схема намотувального верстата для виготовлення оболонок обертання. До складу узагальненої кінематичної схеми намотувального верстата включено оправку та укладчик стрічки у вигляді взаємозв'язаної системи двох ланок (плеча та вихідного спрямовуючого пристрою циліндричної форми). Така схема має більше як шість ступенів волі, що дозволяє використовувати формалізовану процедуру для всіх відомих типів намотувальних верстатів.

Відоображуючи кожне можливе переміщення елементів кінематичної схеми намотувального верстата окремою матрицею у відповідній системі координат, можна записати наступне матричне рівняння кінематики намотувального верстата:

$$L'_4 + M'_4 \cdot [L'_3 + M'_2 \cdot (L'_1 + M'_1 \cdot X'_1)] = L_5 + M_5 \cdot [L_4 + M_3 \cdot M_2 \cdot (L_1 + M_1 \cdot X_1)], \quad (16)$$

де  $X'_1$  і  $X_1$  – стовпчикові матриці координат деякої точки,  $L'_i$  і  $L_i$  – стовпчикові матриці поступальних, а  $M'_i$  і  $M_i$  – квадратні матриці обертальних переміщень в системах координат, пов'язаних з оправкою та укладчиком відповідно. При цьому індекси в матрицях у загальному випадку відносяться до перетворень координат  $X'_{i+1} = L'_i + M'_i \cdot X'_i$  і  $X_{i+1} = L_i + M_i \cdot X_i$  із  $i$ -ї координатної системи в  $i + 1$ -у.

Таким чином, формалізована процедура проектування просторових траєкторій точки виходу стрічки на координати намотувального верстата полягає в наступному:

1) конкретні координатні переміщення даного намотувального верстата зіставляються тим координатним переміщенням, які є елементами матриць рівняння (16), внаслідок чого отримується матричне рівняння кінематики даного намотувального верстата, яке має більш простий вигляд;

2) в отримане матричне рівняння підставляються вирази для координат точки виходу стрічки і точки контакту стрічки з оправкою, внаслідок чого отримується система нелінійних рівнянь, використовуваних для розрахунку координатних переміщень робочих органів намотувального верстата.

Завершальний етап розрахунку програми намотки пов'язаний із лінійною апроксимацією траєкторій робочих органів намотувального верстата та із визначенням часу відпрацювання кожного із отриманих кадрів. На даному етапі доцільно мінімізувати термін відпрацювання програми намотки з метою підвищення продуктивності процесу.

Дослідження показали, що найкращого результату можна досягти шляхом попарної мінімізації сумарного часу відпрацювання кожних двох сусідніх кадрів програми намотки. При цьому розв'язок може бути отриманий аналітичними методами.

Припустимо, що попередньо розрахований час відпрацювання кожного кадру програми намотки визначається величиною:

$$t_i^* = \max \left\{ \max_{k \in [1:m]} \left( |\Delta_i^k| / f_{\max}^k \right), \tau \right\}, \quad i \in [1:n], \quad (17)$$

де  $\Delta_i^k$  – величина переміщення по  $k$ -й координаті в  $i$ -му кадрі програми намотки;  $f_{\max}^k$  – максимально допустима швидкість переміщення по  $k$ -й координаті;  $\tau$  – мінімально допустимий час відпрацювання кадру.

Якщо ввести нові змінні  $\mu_i$  за формулою  $t_i = t_i^* / \mu_i$ , де  $\mu_i$  на підставі (17) задовольняє умові  $0 \leq \mu_i \leq 1$ , то для розв'язування задачі достатньо буде мінімізувати всі пари:

$$T_i(\mu_i, \mu_j) = t_i^* / \mu_i + t_j^* / \mu_j \quad (18)$$

при обмеженнях  $0 \leq \mu_i \leq 1$ ,  $0 \leq \mu_j \leq 1$  і  $|\Delta_i^k \cdot \mu_i / t_i^* - \Delta_j^k \cdot \mu_j / t_j^*| \leq \rho_i^k$ , де  $\rho_i^k$  – допустимий перепад швидкостей по  $k$ -й координаті між сусідніми кадрами, тобто  $j = i + 1$  при  $1 \leq i \leq n - 1$  і  $j = 1$  при  $i = n$ .

**Висновки.** Дослідження характеру області допустимих рішень та цільової функції показали, що область допустимих рішень являє собою опуклий багатокутник. При цьому оптимальне рішення знаходиться на межі області, тобто в кутовій її точці або на одній із її сторін. У першому випадку оптимум може бути знайдений простим перебором кутових точок, а в другому — із застосуванням методу невизначених множників Лагранжа.

Оптимізація програми намотки в цілому здійснюється послідовною мінімізацією (18) для кожної пари сусідніх кадрів. Можна показати, що отриманий результат є оптимальним також і в глобальному плані для певного класу програм намотки. Ознакою цього класу є відсутність у програмі намотки сусідніх кадрів, знаки переміщень в яких по будь-якій із координат протилежні.

Розглянуті складові математичної моделі технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій методом намотки далеко не вичерпують комплекс задач, які вимагають свого розв'язування при виконанні розрахунків конкретних програм намотки. Можна стверджувати, що рівень складності наведених матеріалів є достатнім обґрунтуванням необхідності глобальної комп'ютеризації розглянутого напрямку і представлення його у вигляді автоматизованої системи підготовки програм намотки.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Цыплаков О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек. – Л.: Машиностроение, 1968. – 176 с.
2. Водовозов В.М., Мядзель В.Н., Рассудов Л.Н. Работы в судокорпусных производствах. – Л.: Судостроение, 1986. – 248 с.
3. Морзун О.М., Іллічова Т.Ю., Кривель І.А. Возможности використання технологій намотки у розробці пожежно-технічних засобів // В кн.: Пожарная безопасность – 2003// Материалы VI научно-практической конференции. – Харьков: АПБУ, 2003. – С. 282–284.
4. Рассудов Л.Н., Мядзель В.Н., Мамаев С.Г. Алгоритмизация управления рабочими органами намоточных станков для производства стеклопластиковых оболочек // Механика полимеров. – 1977. – № 1. – С. 30–34.
5. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. – М.: Гостехиздат, 1956. – 420 с.
6. Минаков А.П. Основы теории наматывания и сматывания нити // Текстильная промышленность. – 1944. – № 10. – С. 11–16; 1944. – № 11–12. – С. 10–18.
7. Миткевич А.Б., Протасов В.Д. Равновесные стеклопластиковые баллоны давления минимальной массы при негеодезической намотке // Механика полимеров. – 1975. – № 6. – С. 983–987.
8. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Редакторы Дж. Холл и Дж. Уатт. – М.: Мир, 1979. – 312 с.

9. Душенко А.Г., Моргун А.Н., Боляев В.И. Расчёт технологических координат траектории движения укладчика // В кн.: Системы управления. Вып. 2: Труды Новочеркасского политехнического института. Новочеркасск, 1975. – Т. 310. – С. 18–24.
10. Добровольский А.К., Костров В.И. К вопросу о методике расчёта характеристик геодезической намотки стеклопластиковых оболочек вращения // Механика полимеров. – 1970. – № 6. – С. 1020–1025.
11. Парнес М.Г. Расчёт и конструирование намоточных станков. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
12. Маринин В.И., Городецкий Г.Б. Задача расчёта оптимальных по быстродействию траекторий и законов движения исполнительных органов намоточных станков с программным управлением // В межвуз. сб.: Системы управления технологическими процессами. – Новочеркасск, 1976. – С. 46–51.
13. Моргун А.Н. Проецирование пространственных траекторий точки схода нити на координаты намоточного станка // В кн.: Системы управления технологическими процессами. – Новочеркасск, 1983. – С. 117–126.

МОРГУН Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформатики та обчислювальної техніки Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України.

Наукові інтереси:

- математика, інформатика та комп'ютерна техніка;
- математичне та комп'ютерне моделювання;
- методика викладання інформатики;
- комп'ютерно-інформаційні технології.

Тел.: (0472)-32-15-88.

E-mail: [a\\_n\\_m@rambler.ru](mailto:a_n_m@rambler.ru)

ЧАСТОКОЛЕНКО Ігор Павлович – кандидат фізико-математичних наук, начальник кафедри інформатики та обчислювальної техніки Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України.

Наукові інтереси:

- математика, математичне моделювання.

Тел.: (0472)-32-06-83.

E-mail: [a\\_n\\_m@rambler.ru](mailto:a_n_m@rambler.ru)

Подано 11.11.2004

**Моргун О.М., Частоколєнко І.П.** Математична модель технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій.

**Моргун А.Н., Частоколєнко І.П.** Математическая модель технологического процесса изготовления оболочечных конструкций.

**Morgun A., Chastokolenko I.** Mathematical model of technological process shell constructions producing.

УДК 519.68:677.022.93

**Математична модель технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій / О.М. Моргун, І.П. Частоколєнко**

Обговорюються основні складові математичної моделі технологічного процесу виготовлення оболонкових конструкцій методом намотки. Представлено найважливіші розрахункові співвідношення, методи обчислень та критерії вибору оптимальних рішень. Отримані результати використовуються для розрахунку програм управління намотувальними верстатами, обладнаними системами ЧПУ.

УДК 519.68:677.022.93

**Математическая модель технологического процесса изготовления оболочечных конструкций / А.Н. Моргун, И.П. Частоколєнко**

Обсуждаются основные составляющие математической модели технологического процесса изготовления оболочечных конструкций методом намотки. Представлены наиболее важные расчётные соотношения, методы вычислений и критерии выбора оптимальных решений. Полученные результаты используются для расчёта программ управления намоточными станками, оборудованными системами ЧПУ.

УДК 519.68:677.022.93

**Mathematical model of technological process shell constructions producing / A.N. Morgun, I.N. Chastokolenko**

The main part of mathematical model of technological process shell constructions producing using the winding around method is discussed. The most important calculations' correlations, methods of calculations and criteria choosing of optimal decisions are represented. Received results are used for the calculation of programs control winding metalcutter equipping by systems of digital programming control.