

КОМП'ЮТЕРНЕ СИМУЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ СТРІЧКОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ

Проведено огляд і порівняльний аналіз існуючих моделей ділянки стрічки і досліджено адекватність їх застосування при комп'ютерному симулюванні моделі стрічкоживильної секції аркушерізальної ротаційної машини.

This article presents a review and comparative analysis of existing type area models and investigated the adequacy of their use in computer simulation of type feeding section model of roll sheeting machine.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Як відомо, поліграфічний папір зазвичай постачається на поліграфічні підприємства у вигляді рулонів. Після акліматизації рулон може безпосередньо використовуватися для задруковування на рулонній друкарській машині. Та далеко не завжди це є економічно вигідно. Перш за все це стосується невеликих тиражів, та тиражів з нестандартними форматами видань. Для таких випадків доцільніше використовувати аркушеві друкарські машини. Тому постає проблема розрізки рулону на окремі аркуші заданої довжини. Така операція виконується безпосередньо на самому підприємстві, якщо є необхідне обладнання (аркушерізальна ротаційна машина), або постачальником паперу. До якості розрізуваних аркушів висуваються дві основні вимоги: стабільність лінійних розмірів та правильність геометричної форми. Остання вимога виконується, якщо аркушерізальна машина вдало налагоджена перед запуском (тобто ніж на барабані різку добре заточений і встановлений під правильним кутом), а тому у процесі роботи геометрична форма аркушів не повинна змінюватись. Натомість при розрізуванні може виникати похибка, яка залежить від впливу багатьох факторів, основними з яких є коливання натягу паперової стрічки та нестабільність співвідношення швидкостей мірного циліндра та барабану різку, якщо вони між собою механічно не з'єднані.

Оцінити вплив технологічних факторів на зміну натягу (або відносного видовження) стрічки у аркушерізальній ротаційній машині експериментальним шляхом практично не можливо. Тому таку задачу доцільно вирішувати шляхом моделювання. При побудові моделей

⁵ Українська академія друкарства

стрічкоживильних та стрічкопровідних систем базовою є модель ділянки стрічки. Разом з тим ділянка стрічки є непростим об'єктом. Стала часу ділянки стрічки залежить прямо пропорційно від її довжини і обернено пропорційно від лінійної швидкості її переміщення. Зрозуміло, що ці параметри можуть мінятися у процесі роботи аркушерізальної машини, а отже буде змінюватись і стала часу. Крім того модель ділянки стрічки володіє значним коефіцієнтом передачі, тобто невелика зміна швидкості провокує суттєву зміну величини її натягу.

На даний час не існує єдиної загально узгодженої математичної моделі ділянки стрічки. А тому вибір оптимального варіанту математичного опису поведінки ділянки стрічки серед існуючих або розробка більш досконалої її моделі є актуальною задачею.

2. АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ТЕМОЮ

Питаннями визначення нових та уточнення існуючих моделей ділянки стрічки займалась значна кількість дослідників [1-5]. Велика увага приділяється аналізу процесу видовження ділянки стрічки та впливу на його перебіг різних збуджуючих факторів.

Деякі дослідники [1, 2] стверджують, що найбільш повно і коректно ділянка паперової стрічки описується за допомогою диференціального рівняння:

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} = (\varepsilon + 1)[V_2 - V_1(1 + \varepsilon)], \quad (1)$$

де ε – відносне видовження стрічки на обмеженій ділянці; L – довжина цієї ділянки; V_1, V_2 – лінійні швидкості початку і кінця цієї ділянки відповідно.

Але рівність (1) не зовсім придатна для аналітичних досліджень та розрахунків, оскільки після математичних перетворень отримуємо квадрат видовження ε^2 . Враховуючи, що для паперової стрічки типове значення відносного видовження перебуває у діапазоні $[0,0005 \div 0,03]$, то з рівності (1) можна отримати спрощену залежність:

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} = V_2 - V_1(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

Рівність (2) – класичне диференціальне рівняння видовження, відоме давно. Воно є актуальним для стрічок з матеріалів, що слабо розтягуються. До таких матеріалів можна віднести і папір.

Залежності (1) і (2) не враховують видовження стрічки на попередній ділянці стрічкопровідної системи, тобто приймається, що стрічка надхо-

дять у досліджувану ділянку не натягнутою, але і також такою, що не провисає. Насправді ж на усіх етапах обробки стрічка паперу повинна перебувати у натягнутому стані. Тому не можна говорити про її не натягнений стан на вході ділянки – вона вже буде мати деяке видовження, величина якого залежить від параметрів попередньої ділянки. Таким чином відносне видовження накопичується на кожній наступній ділянці стрічкопровідної системи. Якщо розглядати багатосекційну друкарську машину, то це може призвести до несуміщення фарб [2, 4]. До аркушерізальних машин висуваються дещо нижчі вимоги щодо стабільності натягу стрічки ніж у друкарських машинах. Але потрібно зазначити, що початковий натяг при розмотуванні стрічки з рулону також буде присутній. Вплив величини відносного видовження стрічки попередньої ділянки на досліджувану розглядається як збурююча дія. У нашому випадку, коли ділянка стрічки є першою після рулону, величина відносного видовження попередньої ділянки буде мати лише постійну складову, залежну від параметрів рулону.

Існує також залежність [3], котра безпосередньо враховує вплив видовження на попередній ділянці ε_0 стрічкопровідної системи:

$$L \frac{d\varepsilon_1}{dt} = V_2(1 - \varepsilon_0) - V_1(1 - \varepsilon_1). \quad (3)$$

У працях [2, 4] автори роблять логічно доведені припущення про те, що для стрічки, як елемента стрічкопровідної системи, характерне також запізнення.

У статті [4] акцентується увага на виявленій логічній закономірності: оскільки стала часу стрічки та час проходження ділянкою стрічки відстані між двома стрічковедучими парами є практично однаковими величинами, то і перехідний процес встановлення видовження не досягне усталеного значення, а зупиниться на певному рівні, що залежить від характеру перехідного процесу. У процесі переміщення стрічка на ділянці планомірно заміщається менш натягнутою. Тому, враховуючи квазіусталений характер перехідного процесу, а також наявність затримки, отримано ще одну диференціальну залежність для обчислення відносного видовження стрічки [4]:

$$T_0 \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon = \varepsilon_0 + \int_0^{T_0} \frac{V_2 - V_1}{L_0} dt, \quad (4)$$

де $T_0 = L / V_2$ – час проходження стрічкою шляху між двома стрічко ведучими парами.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ СТРІЧКОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ

Для зручності аналізу застосуємо до кожного з виразів (1-4) операторне перетворення Лапласа. З виразу (2) отримуємо наступну найпростішу математичну модель ділянки стрічки:

$$\varepsilon(s) = (V_2 - V_1) \frac{1/V_1}{(L/V_1)s + 1}.$$

Цей же вираз, з урахуванням відносного видовження на попередній стрічко провідній ділянці, переписується так:

$$\varepsilon(s) = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} + \varepsilon_0 \right) \frac{1}{(L/V_1)s + 1}. \quad (5)$$

В аналогічній формі подамо вираз (1). Розкриємо дужки у правій частині рівняння (1):

$$L \frac{d\varepsilon}{dt} = V_2 \varepsilon - V_1 \varepsilon - V_1 \varepsilon^2 + V_2 - V_1 - V_1 \varepsilon.$$

Як бачимо, у правій частині отриманого рівняння присутній доданок з квадратом відносного видовження. Проте, як згадувалось вище, для паперу величина відносного видовження є досить малою. А тому цим доданком можна знехтувати, бо його вплив на результат не таким суттєвим. Похибка у результаті цього спрощення не повинна перевищувати 3% при максимальному реально можливому відносному видовженні. Отож за аналогією до виразу (4), враховуючи відносне видовження на попередній ділянці, отримаємо:

$$\varepsilon(s) = \left(\frac{V_2 - V_1}{2V_1 - V_2} + \varepsilon_0 \right) \frac{1}{(L/(2V_1 - V_2))s + 1}. \quad (6)$$

Після нескладних математичних перетворень виразу (3), отримаємо ще один варіант математичного опису ділянки стрічки:

$$\varepsilon(s) = \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \varepsilon_0 \right) \frac{1}{(L/V_1)s - 1} \quad (7)$$

У роботі [4] отримано з рівняння (4) математичну модель ділянки стрічки із запізненням:

$$\varepsilon(s) = \left[(V_2 - V_1) \frac{1 - e^{-T_0 s}}{Ls} + \varepsilon_0 \right] \frac{1}{T_0 s + 1}. \quad (8)$$

Проведення аналізу моделей ділянки стрічки аналітичним шляхом є складним і недоцільним через значні затрати часу на виконання об-

числень. На сьогодні існує ряд програмних пакетів для комп'ютерного математичного та імітаційного моделювання, котрі автоматизують, спрощують та значно прискорюють процеси побудови математичних моделей різного роду систем, виконання обчислень, одержання результатів та їх аналіз. Найвідоміші серед таких програмних пакетів: MATLAB, MathCad, Maple. Крім того перший з наведених, MATLAB, володіє також потужним програмним підпакетом Simulink для побудови імітаційних моделей на базі функціональних схем та математичних моделей досліджуваних систем. Simulink дозволяє проводити симулювання побудованих імітаційних моделей систем та отримувати результати моделювання у будь-якій зручній для подальшого застосування формі (графічній, чисельній, з виводом у зовнішній файл). Завдяки своїй універсальності та зручності програмний підпакет Simulink користується великою популярністю серед дослідників. Тому, враховуючи вище наведені аргументи скористаємось середовищем MATLAB Simulink для побудови імітаційних моделей ділянок стрічки.

На рис. 1 приведено симулятор чотирьох розглянутих математичних моделей ділянки стрічки, що описуються рівностями (5)-(8), у робочому вікні MATLAB Simulink. При цьому для параметрів блоків побудованого симулятора використовуємо змінні (або вирази на їх основі), попередньо описані у вікні Model Explorer середовища Simulink, а не конкретні числові значення. Це дозволяє легко змінювати параметри моделі не звертаючись до кожного з блоків симулятора зокрема. Крім того модель у такому випадку буде мати більш інформативний характер.

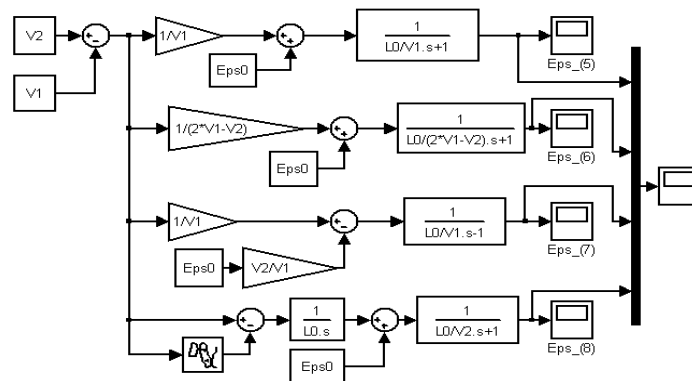


Рис. 1. Симулятор складений на основі чотирьох математичних моделей ділянки стрічки у середовищі Matlab Simulink

Для усіх чотирьох моделей ділянки стрічки параметри (довжина ділянки, відносне видовження на попередній ділянці, лінійні швидкості стрічки на вході та виході ділянки) є однаковими. Значення швидкостей на вході та виході ділянки стрічки V_1 та V_2 повинні відповідати реальним умовам роботи машини, а отже викликати відносне видовження стрічки, характерне для паперу. Прийmemo, що $V_1 = 4,985$ м/с, $V_2 = 5$ м/с. Задаємо також довжину ділянки стрічки $L = 2$ м та відносне видовження на попередній ділянці $\varepsilon_0 = 0,001$. Варто зауважити, що у випадку стрічкоживильної секції аркушерізальної ротаційної машини V_1 – лінійна швидкість стрічки, що розмотується з рулона. Ця швидкість насправді не є постійною, тому що рулон не має окремого приводу, а розкручується під дією сили натягу, яка у свою чергу створюється наступною стрічко ведучою парою (мірний циліндр та притискні ролики) з лінійною швидкістю V_2 . Але для спрощення аналізу результатів комп'ютерного симулювання прийmemo, що $V_1 = const$.

Результати комп'ютерного симулювання моделей ділянки стрічки представлені графіками перехідних процесів відносного видовження ділянки стрічки на рис. 2. Виразу (5) відповідає графік на рис. 2.а, виразу (6) – рис. 2.б, виразу (7) – рис. 2.в і, відповідно, виразу (8) – рис. 2.г.

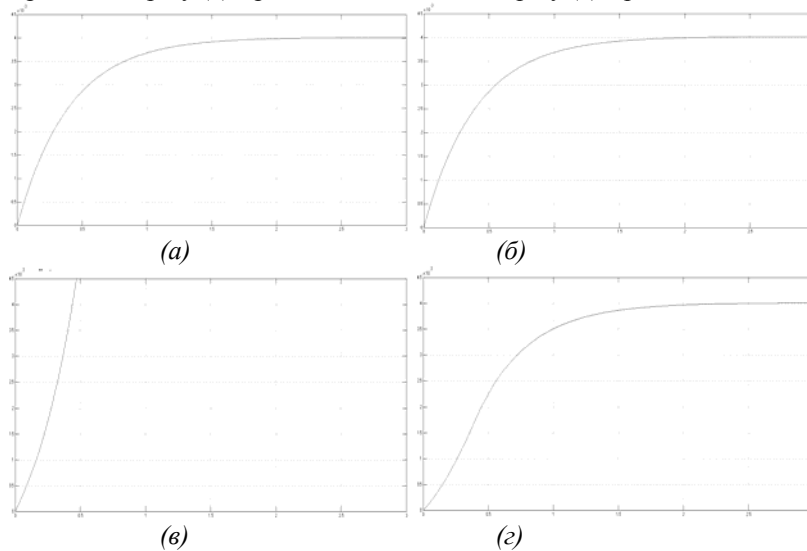


Рис. 2. Перехідні характеристики відносного видовження для чотирьох різних математичних моделей ділянки стрічки

Для порівняння перехідних характеристик відносного видовження представлених чотирма моделями ділянки стрічки відобразимо їх у одній системі координат, застосувавши блок "MUX". Виявлено, що різниця між одержаними кривими відносного видовження, котрі відповідають залежностям (5) і (6), суттєво не відрізняються між собою. Зокрема вони мають ідентичну експоненціальну форму, досягають однакового значення через інтервал часу T_0 (прибл. $2,5 \cdot 10^{-3}$) і різниця між усталеними значеннями складає лише $1,2 \cdot 10^{-5}$. Отже така несуттєва різниця демонструє перевагу у використанні математичної моделі ділянки стрічки (5) у порівнянні з (6), бо остання має складніший вираз для обрахунку сталої часу стрічки. Тому перевага у точності (6) сумнівна, коли матеріалом стрічки виступає папір. Використання цієї математичної моделі є доцільним для матеріалів, що допускають значні відносні видовження. Перехідна характеристика одержана у результаті симулювання математичної моделі (7) ділянки стрічки має гіперболічну форму, за час T_0 досягає рівня $3,5 \cdot 10^{-3}$ та не має усталеного значення. Отже можна зробити висновок, що дана математична модель не враховує заміщення стрічки на ділянці стрічкою з меншим відносним видовженням. Цю особливість додатково треба враховувати при побудові моделей стрічко провідних систем на базі математичної моделі (7) ділянки стрічки. Перехідна характеристика відносного видовження для моделі ділянки стрічки (8) має s-подібну форму, що пояснюється наявністю запізнення. Вона досягає відносного видовження $2,5 \cdot 10^{-3}$ за час симулювання T_0 , а усталене значення відносного видовження не суттєво відрізняється від усталених значень моделей ділянки стрічки (5), (6) і складає $4,006 \cdot 10^{-3}$. Тому динаміка моделей стрічкопровідних систем на базі (8) буде відмінною від аналогічних моделей, але побудованих з використанням математичних моделей ділянки стрічки (5) чи (6). А оскільки для ділянки стрічки між рулоном та стрічковедучою парою аркушерізальної ротаційної машини характерні значні коливання відносного видовження, спричинені неідеальністю розмотуваних рулонів, то математична модель ділянки стрічки (8) буде найкраще відтворювати динаміку стрічкопровідної системи.

4. ВИСНОВКИ

1. На даний час не існує єдиної загально узгодженої математичної моделі ділянки стрічки. А тому вибір оптимального варіанту математичного опису поведінки ділянки стрічки серед існуючих або розробка більш досконалої її моделі є актуальною задачею.

2. На основі приведених у роботі математичних моделей ділянки стрічки побудовано структурну імітаційну модель у середовищі Matlab Simulink.

3. На підставі результатів симулювання проведено порівняльний аналіз існуючих моделей елементарної ділянки стрічкопровідної системи.

4. У результаті моделювання обґрунтовано вибір математичного опису ділянки стрічки стрічкопровідної системи аркушерізальної ротаційної машини.

1. Дурняк Б.В. Стрічкопровідні системи рулонних ротаційних машин. – К.: Атіка, 2002. – 292 с. 2. Избицкий Э.И. Импульсное регулирование движения лент точного материала. – М.: Энергия, 1970 – 340 с. 3. Митрофанов В.П. Печатное оборудование. /Митрофанов В.П., Тюрин А.А., Бирбраер Е.Г., Штоляков В.И.// – М.: Издательство МГУП, 1999.– 442 с. 4. Луцків І.М. Моделювання стрічкопровідної ділянки методом інтегрування приросту швидкості стрічки на інтервалі часу // Науково-технічний збірник «Наукові записки». №7 – Л.: УАД, 2004. с. 76-82. 5. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 Simulink 4.5. Основы применения: Полное руководство пользователя. – М.: Солон-Пресс, 2002.