

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ**  
**СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ПМ та

МСС

\_\_\_\_\_ проф. Лисенко О.В.

(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

спеціальність 113 «Прикладна математика»

освітньо-професійна програма «Прикладна математика»

тема роботи «**Моделювання аперіодичного режиму плавлення та**

**тверднення межового мастила»**

**Виконавець**

студент факультету ЕЛІТ

Стегній Борис Костянтинович

\_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

**Науковий керівник**

кан.фіз.-мат.наук, ст. викладач

(науковий ступінь, вчене звання)

Заскока Антон Миколайович

\_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається з 49 с., 8 рисунків, 18 джерел, 3 додатків.

### Мета і задачі дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження аперіодичного режиму тертя, що виникає в нанорозмірних трибологічних системах. Дослідження впливу швидкості зсуву зовнішнього приводу на режим тертя. А також дослідження поведінки мультиконтактної трибологічної системи. Для досягнення поставленої мети потрібно:

- розглянути основні феноменологічні моделі, що описують аперіодичне межове тертя;
- розробити алгоритм розрахунку поведінки мультиконтактної трибологічної системи ;
- розробити програму для опису межового тертя;
- на основі розробленої програми дослідити особливості межового режиму тертя при різних параметрах функціонування системи.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** НАНОТРИБОЛОГІЧНА СИСТЕМА, МЕЖОВИЙ РЕЖИМ ТЕРТЯ, ПРУЖНІ ТА В'ЯЗКІ НАПРУЖЕННЯ, ШВИДКІСТЬ ЗСУВУ, ПЕРЕРИВЧАСТИЙ РЕЖИМ РУХУ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ.....	5
1.1 Вільна енергія.....	5
1.2 Сила тертя.....	7
2 ТРИБОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ .....	8
2.1 Механічний аналог мультиконтактної трибологічної системи.....	8
2.3 Мультиконтактна трибологічна система з різними значеннями площі блоків.....	14
Висновок .....	19
ДОДАТОК А.....	22
ДОДАТОК Б .....	24
ДОДАТОК В.....	37

## Вступ

Тертя відіграє важливу роль у науці та техніці, тому проблема управління процесами тертя має особливе значення у галузі інженерії.

Розвиток електроніки, мініатюризація деталей, які труться, зокрема в пристроях позиціонування в космосі, жорстких накопичувальних дисках тощо, створюють проблему повноцінного змащування вузлів. У таких системах часто не можливо використовувати об'ємні мастила, тому доводиться використовувати тонкі плівки мастила, товщина яких кілька атомарних шарів [1]. Властивості таких мастил сильно відрізняються від об'ємних [2,3,4].

У таких механізмах можлива реалізація переривчастого режиму тертя для якого характерне чергування плавлення/тверднення мастила і який є основною причиною зношування поверхонь, що труться [5]. Для подолання руйнівного впливу stick-slip режиму тертя проводять численні дослідження, зокрема на основі феноменологічних моделей [2, 6, 7, ,8].

Для дослідження межового тертя використаємо модель Попова, яка детально описана в роботі [5], але запишемо інший термодинамічний потенціал [9], та на відміну від робіт [10, 11] дослідимо мультиконтактну трибологічну систему, яка більш наближена до реальних вузлів тертя. Варто відмітити, що модель Попова дозволяє врахувати як термодинамічне плавлення мастила, так і зсувне плавлення, коли напруження, які виникають в мастилі, перевищують критичне значення.

# 1 ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ

## 1.1 Вільна енергія

Запишемо розкладання термодинамічного потенціалу для ультратонкого шару мастила у вигляді [9]:

$$f = -a * \varphi + \alpha * (T - T_c) * \varphi^2 + \left(\frac{b}{2}\right) * \varphi^2 * \varepsilon_{el}^2 - \left(\frac{c}{3}\right) * \varphi^3 + \left(\frac{d}{4}\right) * \varphi^4, (1.1)$$

де  $T$  — температура мастила,  $T_c$  — критична температура,  $\varepsilon_{el}$  — зсувна компонента пружної деформації,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — додатні сталі,  $\varphi$  — параметр порядку, що представляє амплітуду періодичної складової мікроскопічної функції густини середовища. Даний вигляд розкладання дозволяє нам описувати статичну компоненту тертя, для якої мастило плавиться частковою, тому навіть після плавлення сила тертя  $F$  генерується за рахунок пружних та в'язких напружень.

За температури  $T$  меншою критичного значення  $T_{c0}$  реалізується твердоподібна структура мастила для якої характерний близький порядок чергування молекул. Дана ситуація відповідає кривій 3 на рисунку 1.1. (лістинг програми наведено в додатку А. Зі зростанням температури потенціал змінює профіль: два мінімуми розділені локальним максимумом, як зображено на кривій 2 рисунка 1.1. Відмітимо, що обидва мінімуми реалізуються при ненульових значеннях  $\varphi$ . Менше значення  $\varphi$  залишається більше від нуля, що відповідає «частковому» плавленню мастила. Дану особливість дозволяє описати термодинамічний потенціал  $f(\varphi)$ (1.1), який має лінійний додатак, на відміну від робіт [10, 12, 13, 14]. При даній температурі мастило може бути і частково розплавленим, і твердоподібним, залежно від початкових умов.

При подальшому зростанні температури  $T$  профіль потенціалу змінюється і він має один мінімум при значенні  $\varphi$  близькому до нуля. Критичне значення температури плавлення/тверднення мастила  $T_{c0}$  визначимо з умови  $\partial f / \partial \varphi = 0$  [9].

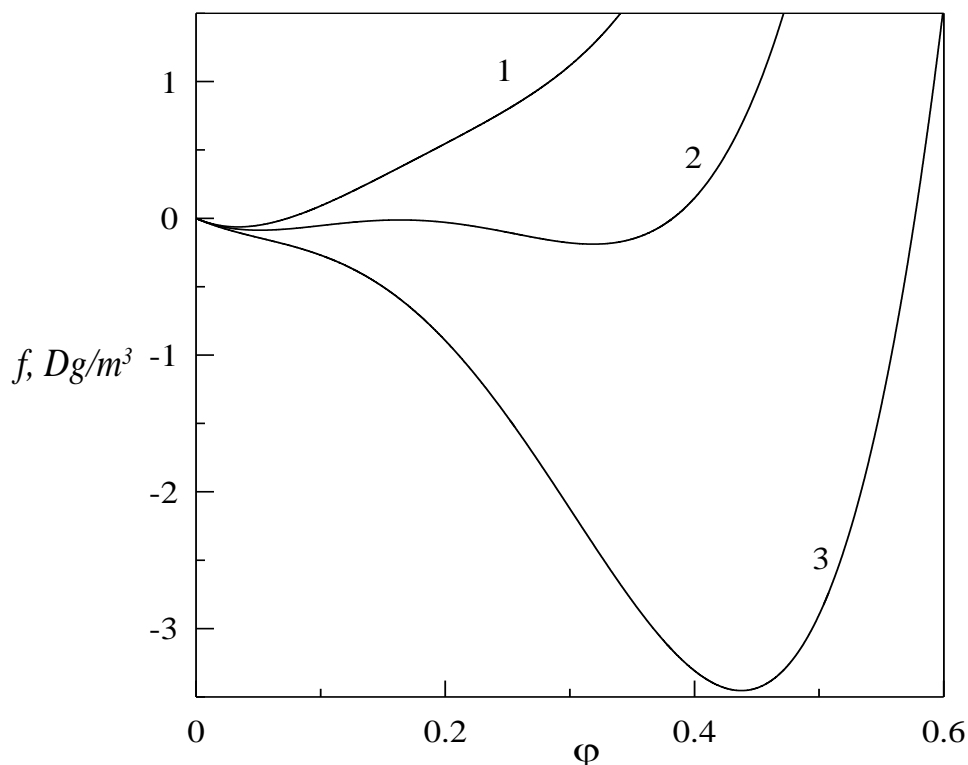


Рисунок 1.1 – Залежність густини вільної енергії  $f$  (1.1) від параметра порядку  $\varphi$  при параметрах  $\alpha = 0.95 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} / \text{м}^3$ ,  $T_c = 290 \text{ К}$ ,  $b = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $a = 4 \text{ Дж} / \text{м}^3$ ,  $c = 800 \text{ Дж} / \text{м}^3$ ,  $d = 1500 \text{ Дж} / \text{м}^3$  та пружних деформаціях  $\varepsilon_{el} = 2.1 \cdot 10^{-6}$ . Криві 1, 2 і 3 відповідають температурам  $T = 350 \text{ К}$  і  $338 \text{ К}$  та  $320 \text{ К}$ .

Критичне значення швидкості плавлення/тверднення мастило  $V_{c0}$  виразимо з рівняння (1.2),

$$T(\varphi_0) = T_c + \left( \frac{a}{\varphi_0} - b\varepsilon_{el}^2 + c\varphi_0 - d\varphi_0^2 \right) / (2\alpha). \quad (1.2)$$

Напруження, що виникає у мастила плівці, складається з еластичної  $\sigma_{el}$  та в'язкої  $\sigma_v$  компонентів. Визначимо пружне напруження з умови  $\partial f / \partial \varepsilon_{el} = 0$ .

$$\sigma_{el} = b * \varphi^2 * \varepsilon_{el} \quad (1.3)$$

Для визначення в'язких напружень використовуємо емпіричне рівняння [15]

$$\sigma_v = k \left( \frac{V}{h} \right)^{\gamma+1}, \quad (1.4)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності,  $\gamma$  – безрозмірний показник (для псевдопластичних рідин  $\gamma < 0$ ; ділатантна рідина характеризується при показнику  $\gamma > 0$ ;  $\gamma = 0$  у випадку ньютонівих рідин) .

В шарі мастила виникає пружна деформація  $\varepsilon_{el}^0$  при взаємному зсуві контактуючих поверхонь, що залежить від товщини мастила  $h$  та часу релаксації внутрішніх напружень [15 ]

$$\varepsilon_{el,c}^0 = \frac{V\tau_\varepsilon}{h}, \quad (1.5)$$

Таким чином  $V_{c0}$  має вигляд:

$$V_{c0} = \left(\frac{h}{\tau_\varepsilon}\right) * \sqrt{\frac{a}{\varphi_0 * b} - \frac{2 * \alpha * (T - T_c)}{b} + \frac{a * \varphi_0}{b} - \frac{d * \varphi_0^2}{b}}, \quad (1.6)$$

Підставляючи (1.6) в рівняння (1.2), виразимо критичне значення температури  $T_{c0}$  через швидкість зсуву

$$T_{c0} = T_c + \left(\frac{a}{\varphi_0} - b \left(\frac{V * h}{\tau_\varepsilon}\right)^2 + c * \varphi_0 - d * \varphi_0^2\right) / (2 * \alpha), \quad (1.7)$$

## 1.2 Сила тертя

У процесі зсуву між поверхнями виникає сила тертя, яку визначимо як добуток повних напружень та площі контакту поверхонь тертя  $A$  [16, 17]

$$F = \left[ \sigma_{el} + k * \operatorname{sgn}(V) * \left(\frac{|V|}{h}\right)^{\gamma+1} \right] * A. \quad (1.8)$$

Тут введено знакову функцію  $\operatorname{sgn}$ , яка визначається

$$\operatorname{sgn}(V) = \begin{cases} 1, & V > 0; \\ -1, & V < 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

для врахування напрямку переміщення блоку.

## 2 ТРИБОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ

### 2.1 Механічний аналог мультиконтактної трибологічної системи

Дослідимо поведінку трибологічної системи, простий механічний аналог якої зображено на рис. 2.1 [9].

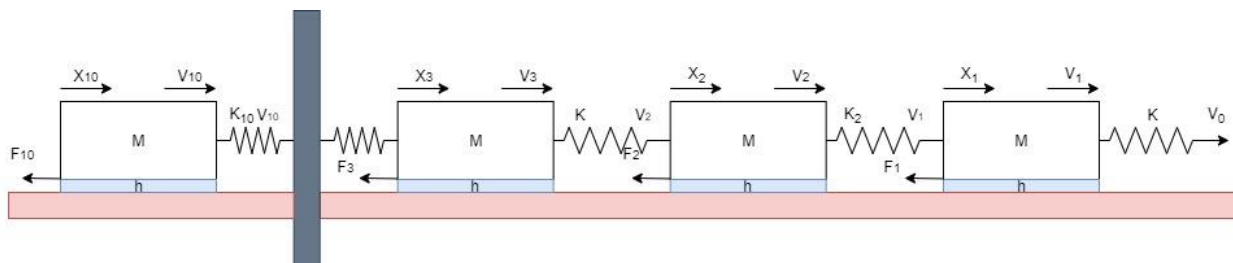


Рисунок 2.1 – Схема мультиконтактної трибологічної системи з десяти блоків.

Система складається з 10 блоків, які лінійно зв'язані між собою за допомогою пружин та розташовані на підкладці і відділені від неї ультратонким шаром мастила. Усі контактуючі поверхні є твердими, атомарно-гладкими та такими, що не зношуються в процесі тертя.

Позначимо координату  $i$ -го блока  $X_i$ , його маса  $M_i$ , до нього кріпиться пружина з жорсткістю  $K_i$ . При функціонуванні трибологічної системи він буде зміщуватися зі швидкістю  $V_i$ , а рух іншого кінця пружини буде визначатися швидкістю зсуву попереднього блока  $V_{i-1}$ . При цьому вільний кінець пружини першого блока  $K_1$  буде задаватися швидкістю зовнішнього приводу  $V_0$ .

Між блоками та підкладкою генерується сила тертя  $F_i$ . Запишемо з другого закону Ньютона рівняння руху  $i$ -го блока для  $i=1, \dots, 10$ .

$$M_i \cdot X_i = K_i \cdot \Delta X_i - F_i - K_{i-1} \cdot \Delta X_{i-1} \quad (2.1)$$

Величина розтягнення пружини  $\Delta X_i$  визначається виразом

$$\Delta X_i = \int_0^t V_i \cdot dt' - X_i \quad (2.2)$$

де  $t$  – час руху другого кінця пружини.

Для вивчення кінетики використаємо відповідне рівняння Ланжевена [18]:



$$\left(\frac{1}{\delta}\right) * \varphi' = - \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right), \quad (2.3)$$

де  $\delta$  – кінетичний коефіцієнт, який характеризує інерційні властивості системи.

Підставляючи до рівняння Ланжевена густину вільної енергії, отримаємо рівняння в явному вигляді

$$\left(\frac{1}{\delta}\right) * \varphi' = -a + 2\alpha(T - T_c)\varphi + b * \varphi * \varepsilon_{el}^2 + c * \varphi^2 - d * \varphi^3. \quad (2.4)$$

Враховуючи, що система мультиконтактна, загальна сила тертя позначається виразом:

$$F_{sum} = \sum_{i=1}^{10} F_i. \quad (2.5)$$

Аналогічно розраховується загальні значення пружних  $\sigma_{el}$  та в'язких  $\sigma_v$  напруження. При цьому мастило між різними блоками та підкладкою може бути в різних агрегатних станах.

Розглянемо поведінку механічного аналога трибологічної системи у якому всі блоки однакові (мають однакові масу та площу контакту  $M_1 = \dots = M_{10} = 0,4$  кг;  $A_1 = \dots = A_{10} = 5$  нм<sup>2</sup>) та поєднані однаковими пружинами ( $K_1 = \dots = K_{10} = 2000$  Н/м). Дана поведінка показана на рисунку 2.2.

На панелі а цього рисунка зображена загальна сила тертя в системі. Як бачимо з рисунка реалізується аперіодичний режим тертя з поступовим зростанням максимального значення висоти піка, та подальшим переходом в режим ковзання. Дана ситуація спостерігалась експериментально та детально описана у роботі [4].

Розглянемо більш детально поведінку кожного блоку. Спочатку блоки нерухомі, пружини не розтягнуті, а мастила твердоподібні. У момент часу  $t > 0$  вільний кінець першої пружини  $K_1$  починає рух зі сталою швидкістю  $V_0 = 800$  нм/с. Пружина розтягується, і блок починає рухатися, при цьому поступово зростає сила тертя та швидкість цього блоку. Друга пружина також розтягується, що призводить до переміщення другого блоку, зі швидкістю меншою, ніж у першого. Поступово швидкість першого блоку зростає, перевищує критичне значення  $V_{c0}$  (1.6) при цьому відбувається

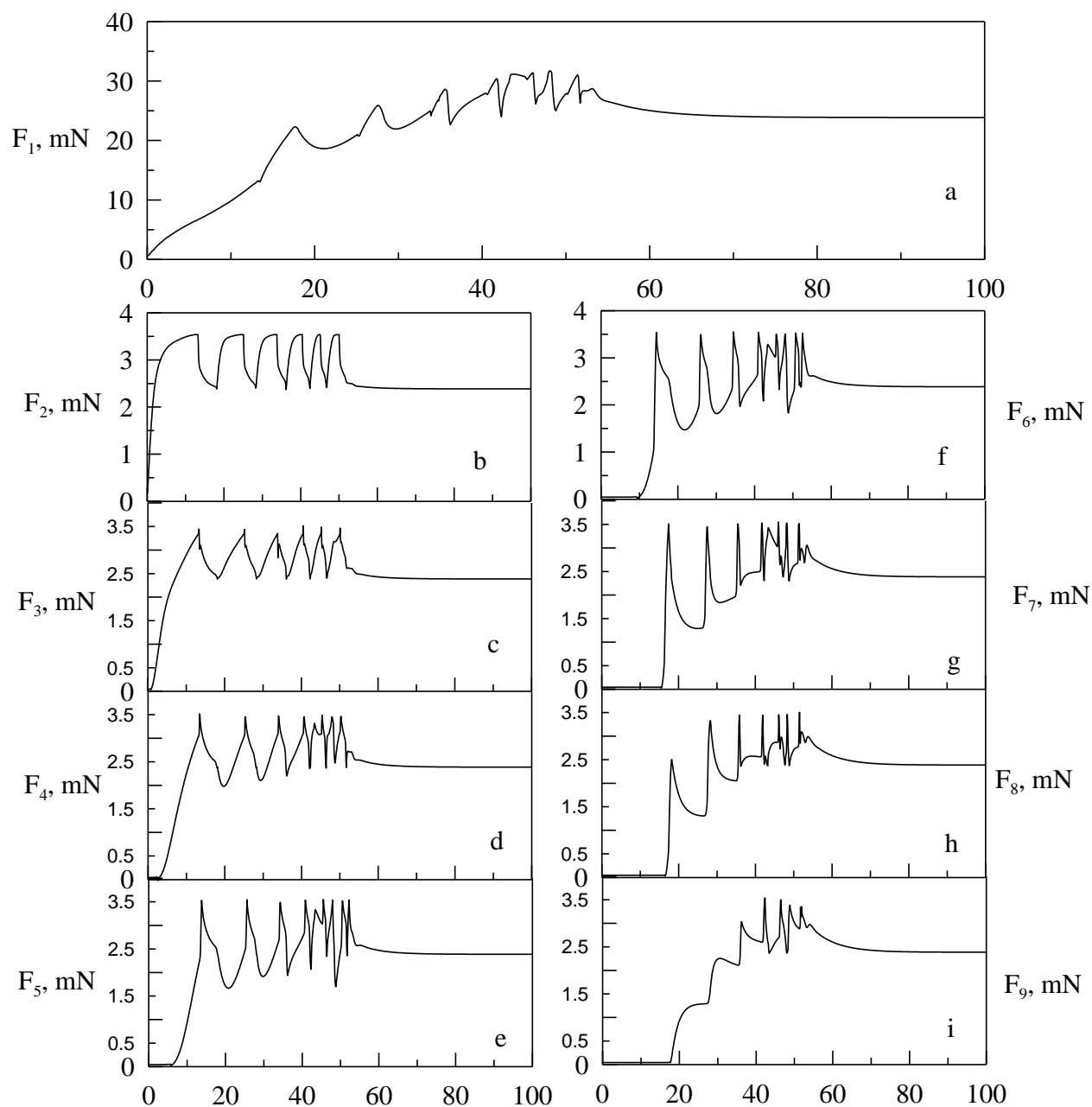


Рисунок 2.2 – Залежність сили тертя  $F$  від часу  $t$  при параметрах як на рис 1.1 та  $V = 800$  нм/с,  $T = 280$  К,  $\gamma = -2/3$ ,  $A = 0.6 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>,  $k = 5 \cdot 10^4$  Па\*с<sup>1/3</sup>,  $\tau_\varepsilon = 10^8$ с,  $h = 10^{-9}$ м.

плавлення мастила між першим блоком та підкладкою. Швидкість блоку стрімко зростає, друга пружина сильніше розтягується, що призводить до зростання швидкості другого блоку з подальшим плавленням мастила. При цьому також зростає швидкість третього блоку і мастило плавиться також. У цей час решта блоків переміщуюються, але їхня швидкість менша за критичну, тому плавлення не відбувається.

Після зростання швидкості першого блоку пружина  $K_1$  стискується, що призводить до зменшення швидкості блоку і при перевищенні критичного значення  $V_{c0}$  мастило твердне. Далі пружина  $K_1$  знову починає розтягуватися і цей процес повторюється в часі. Як видно з панелі b рисунка 2.2 частота циклів плавлення-тверднення першого блоку зростає з плином часу. Це обумовлено тим, що з часом stick-slip режим реалізується для більшої кількості блоків як це можна помітити на інших панелях на рисунку 2.2. Візуально залежність сили тертя  $F(t)$  для шостого та сьомого блоків подібні до п'ятого блоку, тому тут вони не наведені.

Оскільки швидкість зовнішнього приводу  $V_{c0}$  вища за критичне значення плавлення, яке для температури  $T = 280$  К складає приблизно  $V_{c0} \approx 694.1$  нм/с, то настає момент коли швидкість першого блоку не спадає нижче критичної і мастило не твердне. Аналогічним чином швидкості решти блоків 2-10 залишаються вище критичного і в системі реалізується режим ковзання (sliding friction), при цьому мастило між всіма блоками та підкладкою частково розплавлене.

На рисунку 2.3 зображена зміна загальних значень пружних  $\sigma_{el}$  та в'язких  $\sigma_v$  напруження. Спочатку пружні та в'язкі напруження зростають однаково до моменту, коли значення перевищує критичне значення  $V_{c0}$  і  $V_1$ ,  $V_2$  і  $V_3$  мастило плавиться. Значення пружних напружень спадає. Так як мастило розплавилось зросла швидкість, а отже зростають в'язкі напруження  $\sigma_v$ . Коли пружини стискаються, а мастило твердне, значення пружних напружень зростає, а в'язких же навпаки спадає. Даний процес повторюється аперіодично до встановлення в системі стаціонарного режиму ковзання для якого значення пружних напружень ненульові, оскільки як вже згадувалось вище повного плавлення мастила не відбувається.

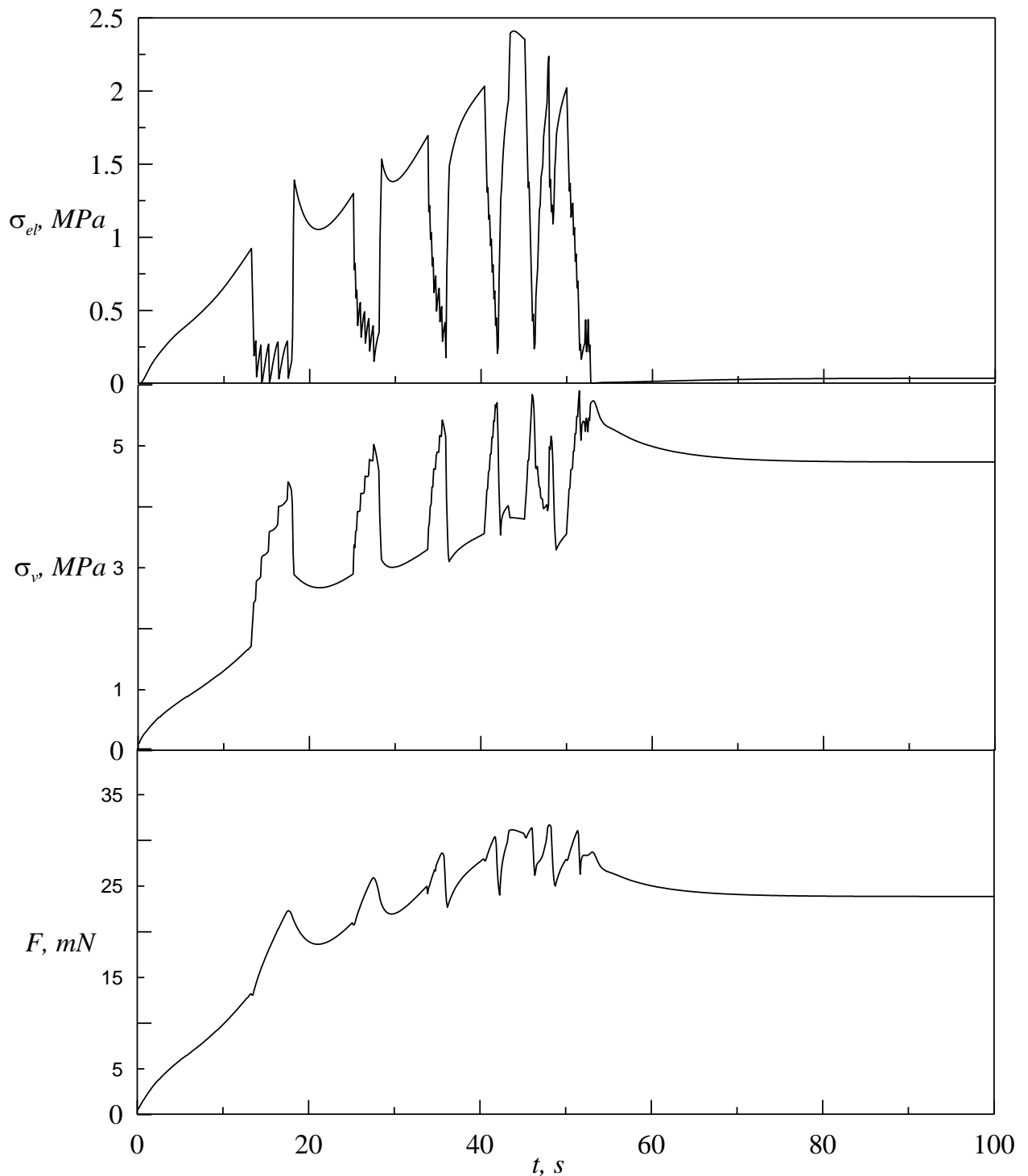


Рисунок 2.3 – Залежність загальної сили тертя  $F$ , пружних  $\sigma_{el}$  та в'язких  $\sigma_v$  напружень від часу  $t$  при параметрах як на рисунку 2.2.

Дослідимо вплив зростання швидкості на поведінку системи (рисунок 2.6) На панелі а рисунку 2.4 зображено загальну силу тертя в системі при швидкості зовнішнього приводу  $V_0 = 900$  нм/с. Як бачимо поведінка трибо системи подібна до описаної на рисунку 2.2. але з більшою кількістю фазових переходів плавлення/тверднення.

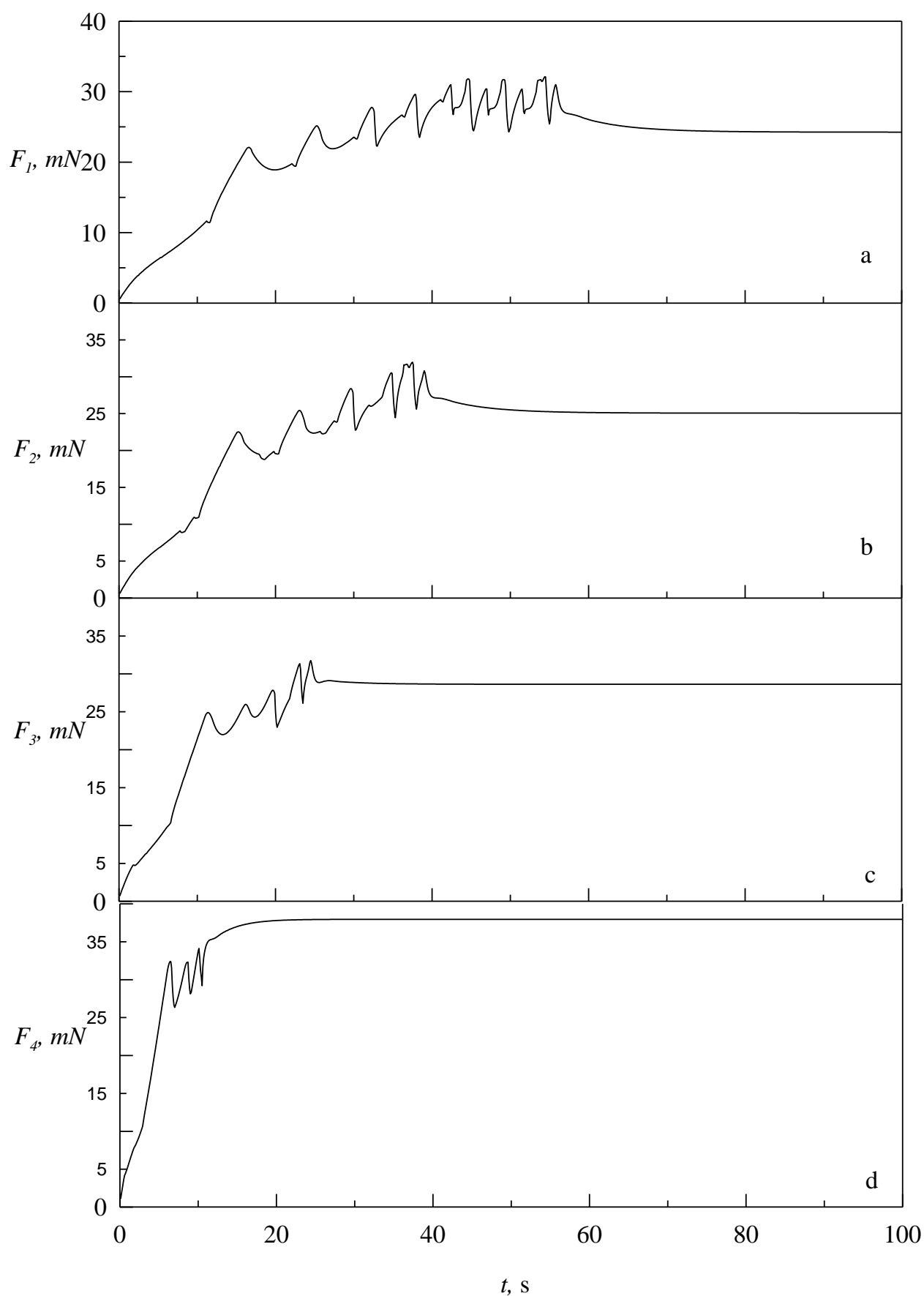


Рисунок 2.4 – Залежність загальної сили тертя  $F$ , від часу  $t$  при параметрах як на рисунку 2.2 та швидкостях зсуву  $V_{a-c} = 900, 1000, 1500$  нм/с,  $T = 280$  К.

З подальшим збільшенням швидкості приводу до  $V_0 = 1000$  нм/с зменшується кількість піків, момент плавлення мастила настає раніше (панель b, рис 2.5).

Аналогічно при збільшенні швидкості до  $V_0 = 1500$  нм/с кількість піків зменшується, а ковзання настає раніше (панель c, рис. 2.5). Зі збільшенням швидкості у системі бачимо зменшення кількості фазових переходів та швидше плавлення мастила і проковзування системи.

Варто відмітити, що для подолання (stick-slip) режиму на початковому стані функціонування трибосистеми, швидкість зсуву зовнішнього приводу варто підвищити. Зокрема, при  $V_0 = 3500$  нм/с стаціонарний режим ковзання встановлюється після кількох циклів плавлення/тверднення (панель d, рис. 2.5).

### **2.3 Мультиконтактна трибологічна система з різними значеннями площі блоків.**

Для моделювання контактуючої поверхні яка більш наближена до реальної розглянемо поведінку для якої площини контактів та жорсткості пружин різні та мають значення :  $A_1 = 5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_2 = 1.92 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_3 = 2.36 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_4 = 3.24 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_5 = 4.12 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_6 = 4.56 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_7 = 1.48 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_8 = 3.68 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_9 = 2.8 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>,  $A_{10} = 0.6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup> пружини для цих блоків будуть відповідно  $K_1 = 4000$  Н/м,  $K_2 = 1550$  Н/м,  $K_3 = 1900$  Н/м,  $K_4 = 2600$  Н/м,  $K_5 = 3300$  Н/м,  $K_6 = 3650$  Н/м,  $K_7 = 1200$  Н/м,  $K_8 = 2950$  Н/м,  $K_9 = 2250$  Н/м,  $K_{10} = 500$  Н/м. До більших блоків кріпляться більш жорсткі пружини, для менших менші, це обумовлено фізичними властивостями жорсткостей (нано-, мікровиступів) Наочне порівняння відносних площ контактів поверхонь блоків та їх жорсткостей наведено на рис. 2.5

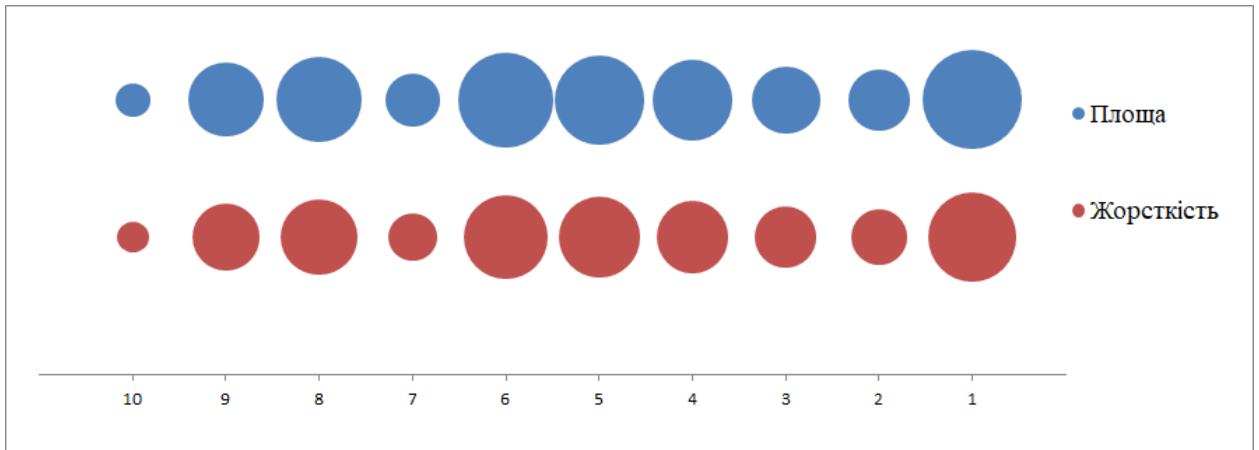


Рисунок 2.5 – Візуалізація відносної величини площ блоків  $A_1-A_{10}$  та жорсткостей пружин  $K_1-K_{10}$ .

Залежність сили тертя від часу показана на рисунку 2.6. Вільний кінець першої пружини приводиться в рух зовнішнім приводом зі сталою швидкістю  $V_0 = 800$  нм/с. Пружина розтягується, і блок починає рухатися. Між блоком і підкладкою виникає сила тертя  $F_1$  (панель b на рис. 2.6). Коли швидкість  $V_1$  збільшується, пружина  $K_2$  також розтягується, що в свою чергу, викликає рух другого блоку. Рух другого блоку спричиняє зсув третього блоку і так далі до десятого блоку.

При розтягуванні першої пружини підвищується швидкість першого блоку  $V_1$ . При цьому плівка мастила починає плавитися. Коли швидкість  $V_1$  перевищує критичне значення  $V_{c0}$ , мастило між першим блоком і підкладкою плавиться. Збільшується швидкість першого блоку, а сила тертя зменшується. Це показано на рис. 2.6. b. Збільшення швидкості  $V_1$  призводить до більшого розтягування другої пружини  $K_2$ . Вона спричиняє різке зростання швидкості зсуву другого блоку, що призводить до плавлення мастила між другим блоком і підкладкою. При цьому другий блок проковзує на значну відстань, пружина  $K_2$  стискується, а  $K_3$  – розтягується. Залежність  $F_2(t)$  представлена на рис. 2.6. c. Як можемо візуально бачити залежності  $F_1(t)$  та  $F_2(t)$  мають різний профіль. Зазначимо, що мастило під першим та другим блоком почало плавитись, в момент часу  $t$  коли швидкість останніх трьох блоків є незначною.

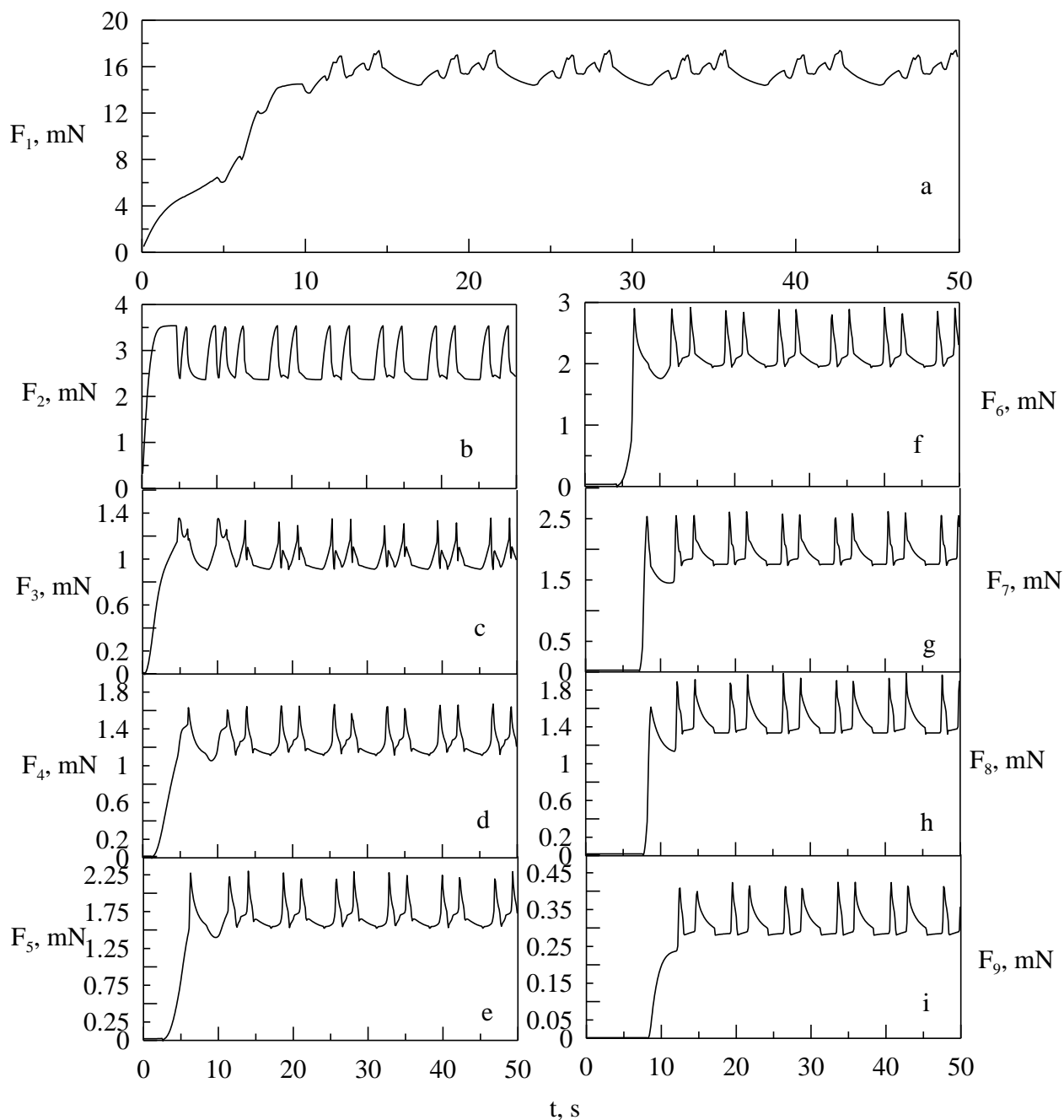


Рисунок 2.6 – Залежність сили тертя  $F$  від часу  $t$  при параметрах рис 2.6 та  $V = 800$  нм/с,  $T = 280$  К.

Блоки з п'ятого по дев'ятий за короткий момент часу збільшують силу тертя, а не повільно як перші чотири. У момент коли всі блоки почали рух, система переходить до періодичного режиму плавлення/тверднення.

Подальше збільшення швидкості зовнішнього приводу до величини 900 нм/с призводить до зміни характеру ковзання. Відмітимо, що для



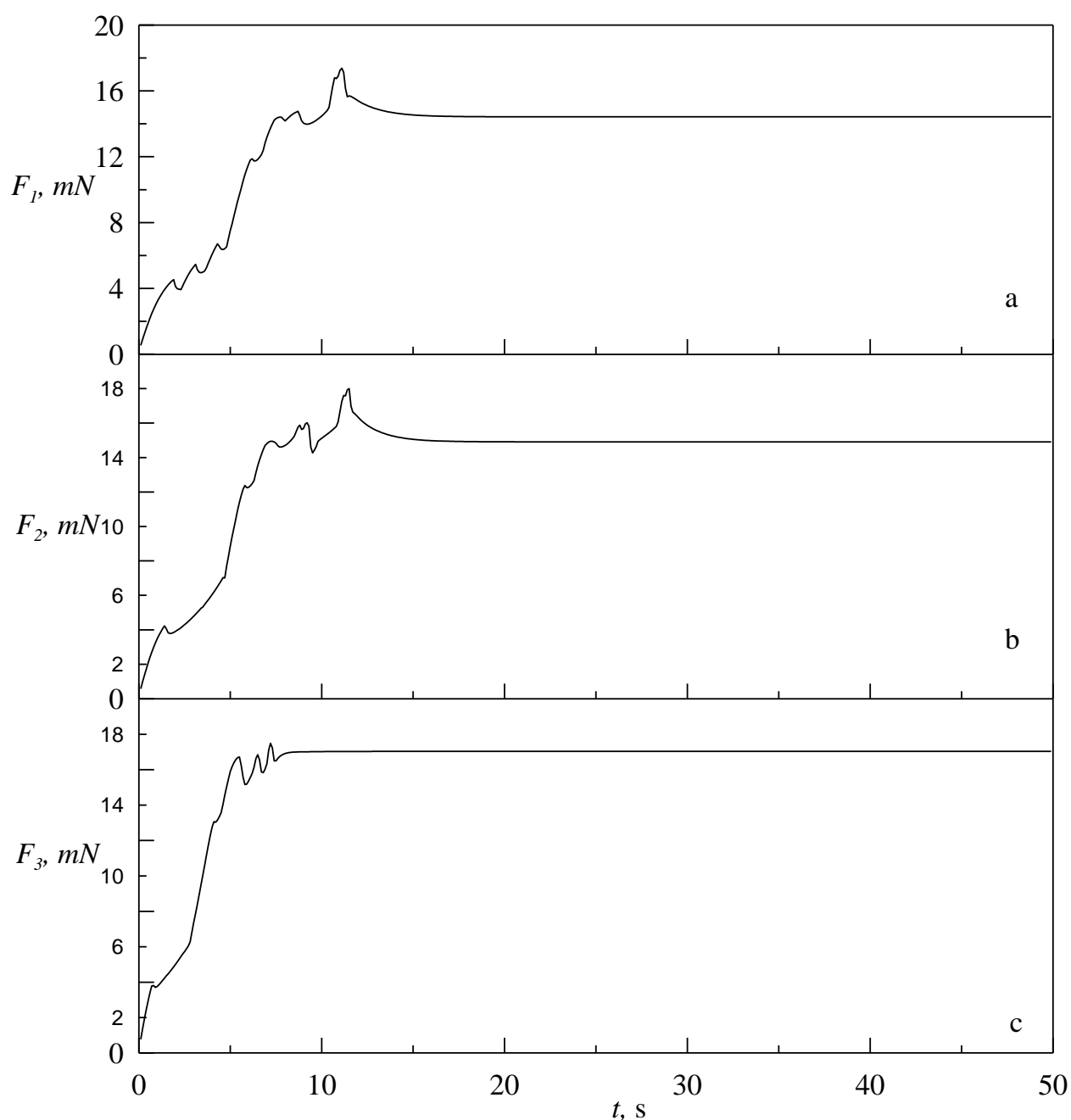


Рисунок 2.7 – Залежність сили тертя  $F$  від часу  $t$  при різних площах контакту при параметрах рис 2.8 та  $a$  -  $V = 900$  нм/с;  $b$  -  $V = 1000$  нм/с;  $c$  -  $V = 1500$  нм/с;

$T = 280$  К критична швидкість складає  $V_{c0} \approx 694,1$  нм/с.

На рис. 2.7 а зображена залежність сили тертя при швидкості 900 нм/с. Тут реалізується чотири цикли плавлення/тверднення для першого блоку після чого мастило плавиться і цей блок переміщується в режимі ковзання. Для другого блоку відбувається при проковзування після чого

встановлюється режим рідинного тертя.

Поведінка третього і четвертого блоків подібна: для них реалізується два піки після чого встановлюється стаціонарний режим ковзання. Швидкість решти блоків протягом приблизно 5 с на порядок нижча попередніх чотирьох. Далі швидкість мастила зростає, практично синхронно відбуваються два цикли плавлення і тверднення мастила, далі встановлюється режим ковзання. За виключенням останнього десятого блока для якого реалізується лише одне тверднення мастила з його подальшим плавленням. Таким чином, перший і другий блоки спричиняють stick-slip переміщення за менше ніж 5 сек., блоки 4 – 9 створюють переривчастий режим у проміжку 5 – 10 сек. І в останній пік додатковий вклад «робить» десятий блок.

Зростання швидкості зсуву зовнішнього приводу до 1000 нм/с представлено на рис. 2.7, в. Тут преший блок рухається за сценарієм плавлення – тверднення – плавлення. Блоки два і три мають два тверднення. Блоки з четвертого по дев'ятий реалізують три тверднення мастила. Для десятого мастило твердне двічі.

Зростання швидкості до 1500 нм/с призводить до того, що мастило плавиться – твердне –плавиться для блоків з першого до шостого. Мастило під сьомим, восьмим та дев'ятим блоками піддається трикратному твердненню, а під десятим – двократному.

## Висновок

На основі термодинамічного моделювання плавлення ультра тонкої плівки мастила Попова проведено дослідження поведінки мультиконтактної трибо логічної системи в режимі межового тертя для якої контактна поверхня є атомарно-гладкими, твердими.

Встановлено, що в такій системі можлива реалізація аперіодичного режиму тертя при якому зростає максимальне значення висоти піків з подальшим переходом в режим ковзання. Дана залежність спостерігалась експериментально.

Також встановлено, що зростання швидкості зовнішнього приводу приводить до зменшення кількості та частоти фазових переходів та зменшення часу виходу на стаціонарний режим функціонування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Persson B. N. J. Sliding friction. Physical principles and applications / B. N. J. Persson. – Berlin: Springer-Verlag, 2000. – 515 p.
2. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours/J.Israelachvili//SurfaceScienceReports.–1992.–Vol.14,№3.– P. 109-159.
3. Yamada S. Nanotribology of symmetric and assymmetric liquid lubricants / S. Yamada // Symmetry. – 2010. – P. 320-345.
4. Yamada S. Layering transitions and tribology of molecularly thin films of poly (dimethylsiloxane) / S. Yamada // Langmuir. – 2003. – Vol. 19. – P. 7399-7405.
5. Попов В. Л. Термодинамика и кинетика плавления сдвигом тонкого слоя смазки, заключенного между твердыми телами / В. Л. Попов // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 5. – С. 100-110.
6. . Granik S. Motions and relaxations of confined liquids / S. Granik // Science. – 1991. – Vol. 253. – P. 1374-1379.
7. . Robbins M. O. Computer simulations of friction, lubrication and wear / M. O. Robbins, M. H. Muser; edited by B. Bhushan // Modern Tribology Handbook. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. – P. 717-765.
8. Filippov A.E. Origin of friction anisotropy on a quasicrystal surface / A. E. Filippov, A. Vanossi, M. Urbakh // Physical Review Letters. – 2010. – Vol. 104. – P. 074302 (4 p.).
9. Zaskoka A. M. Interrupted Mode of Boundary Friction in Multicontact Tribological System / A. M. Zaskoka // Department of Applied Mathematics and Complex. -2018- Т. 17, № 1. – С. 1002 (7 с.).
- 10.Ляшенко Я. А. Фазовый переход первого рода между жидкоподобной и твердоподобной структурами граничной смазки / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 2. – С. 19-28.
- 11.Ляшенко Я. А. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 6. – С. 125-132.
- 12.Ляшенко Я. А. Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями / А.В.Хоменко,Я.А.Ляшенко,Л.С.Метлов//Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 120-126
- 13.Ляшенко Я. О. Плавления ультратонкої плівки мастила між атомарногладкими твердими поверхнями як фазовий перехід другого роду / Я. О. Ляшенко, А. М. Заскока // Журнал фізичних досліджень. — 2013. — Т. 17, № 1. — С. 1002 (7 с.).
- 14.Ляшенко Я. А. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 6. – С. 125-132.

15. Velocity dependence of atomic friction / [E. Gnecco, R. Bennewitz, T. Gyalog et al.] // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 84. – P. 1172-1175.
16. Suppression of friction by mechanical vibrations / [R. Capozza, A. Vanossi, A. Vezzani, S. Zapperi] // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 103, № 8. – P. 085502 (4 p.).
17. Berman A. D. Origin and characterization of different stick-slip friction mechanisms / A. D. Berman, W. A. Ducker, J. N. Israelachvili // *Langmuir*. – 1996. – Vol. 12, № 19. – P. 4559–4563.
18. Aichele M. Kinetic friction and atomistic instabilities in boundary-lubricated systems / M. Aichele, M.H. Müser // *Physical Review E*. – 2003. – Vol. 68. – P. 016125 (14 p.).

## ДОДАТОК А

Програмна реалізація залежності вільної енергії від значення параметра  
порядку

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.IO;

namespace ConsoleApp1
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            double T_1 = 320;
            double T_2 = 338;
            double T_3 = 350;
            double T_c = 290;
            double fi_1_1 = 0;
            double fi_max = 1;
            double E_el = 1 * Math.Pow(10, -6);
            double a = 4;
            double alfa = 1.2;
            double b = 2 * Math.Pow(10, 10);
            double c = 800;
            double d = 1500;
            double f_1 = 0;
            double f_2 = 0;
            double f_3 = 0;
            StreamWriter sw = new
StreamWriter(@"D:\Пары\ДИПЛОМ_М\ТХТ_с_решениями\V_T\fi_10.txt");
            while (fi_1_1 < fi_max)
            {
                f_1 = -a * fi_1_1 + alfa * (T_1 - T_c) * fi_1_1 * fi_1_1 - b * fi_1_1 *
fi_1_1 * E_el * E_el / 2 - c * fi_1_1 * fi_1_1 * fi_1_1 / 3 + d * fi_1_1 * fi_1_1 *
fi_1_1 * fi_1_1 / 4;
                f_2 = -a * fi_1_1 + alfa * (T_2 - T_c) * fi_1_1 * fi_1_1 - b * fi_1_1 *
fi_1_1 * E_el * E_el / 2 - c * fi_1_1 * fi_1_1 * fi_1_1 / 3 + d * fi_1_1 * fi_1_1 *
fi_1_1 * fi_1_1 / 4;
            }
        }
    }
}

```

```

        f_3 = -a * fi_1_1 + alfa * (T_3 - T_c) * fi_1_1 * fi_1_1 - b * fi_1_1 *
fi_1_1 * E_el * E_el / 2 - c * fi_1_1 * fi_1_1 * fi_1_1 / 3 + d * fi_1_1 * fi_1_1 *
fi_1_1 * fi_1_1 / 4;

```

```

        //Console.Write(fi_1_1 + " " + f_1 + " " + f_2 + " " + f_3);
        sw.WriteLine(fi_1_1 + " " + f_1 + " " + f_2 + " " + f_3);
        //Console.WriteLine();
        fi_1_1 = fi_1_1 + 0.0001;

```

```

    }
    sw.Close();
    //Console.ReadKey();
}
}
}

```

## ДОДАТОК Б

Програмна реалізація залежності повної сили тертя, швидкості руху, координати верхнього блока, довжини розтягування пружини та пружних напружень від часу для системи з десяти блоків

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.IO;

namespace F_10blok_PLrav
{
    class Program
    {
        static double sign(double V)
        {
            if (V > 0)
            {
                V = 1;
            }
            else V = -1;
            return V;
        }

        static void Main(string[] args)
        { //Блок 1

            double V_1_0 = 850 * Math.Pow(10, -9);
            double V_1_1 = 0;
            double V_1_2 = 0;
            double X_1 = 45 * Math.Pow(10, -6);
            double X_1_2 = 45 * Math.Pow(10, -6);
            double del_X_1 = 0;
            double sig_el_1 = 0;
            double sig_v_1 = 0;
            double fi_1_1 = 0.5;
            double fi_1_2 = 0;
            double K_1 = 2000;
            double E_el_1 = 0;
            double F_1 = 0;
```



```
//Блок 2
double V_2_0 = 0;
double V_2_1 = 0;
double V_2_2 = 0;
double X_2 = 40 * Math.Pow(10, -6);
double X_2_2 = 40 * Math.Pow(10, -6);
double del_X_2 = 0;
double sig_el_2 = 0;
double sig_v_2 = 0;
double fi_2_1 = 0.5;
double fi_2_2 = 0;
double K_2 = 2000;
double E_el_2 = 0;
double F_2 = 0;
double Q_2 = 0;

//Блок 3
double V_3_0 = 0;
double V_3_1 = 0;
double V_3_2 = 0;
double X_3 = 35 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_3_2 = 35 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_3 = 0;
double sig_el_3 = 0;
double sig_v_3 = 0;
double fi_3_1 = 0.3;
double fi_3_2 = 0;
double K_3 = 2000;
double E_el_3 = 0;
double F_3 = 0;
double Q_3 = 0;

//Блок 4
double V_4_0 = 0;
double V_4_1 = 0;
double V_4_2 = 0;
double X_4 = 30 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_4_2 = 30 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_4 = 0;
double sig_el_4 = 0;
double sig_v_4 = 0;
double fi_4_1 = 0.3;
double fi_4_2 = 0;
double K_4 = 2000;
double E_el_4 = 0;
```

```
double F_4 = 0;
double Q_4 = 0;
//Блок 5
double V_5_0 = 0;
double V_5_1 = 0;
double V_5_2 = 0;
double X_5 = 25 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_5_2 = 25 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_5 = 0;
double sig_el_5 = 0;
double sig_v_5 = 0;
double fi_5_1 = 0.4;
double fi_5_2 = 0;
double K_5 = 2000;
double E_el_5 = 0;
double F_5 = 0;
double Q_5 = 0;
//Блок 6
double V_6_0 = 0;
double V_6_1 = 0;
double V_6_2 = 0;
double X_6 = 20 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_6_2 = 20 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_6 = 0;
double sig_el_6 = 0;
double sig_v_6 = 0;
double fi_6_1 = 0.5;
double fi_6_2 = 0;
double K_6 = 2000;
double E_el_6 = 0;
double F_6 = 0;
double Q_6 = 0;
//Блок 7
double V_7_0 = 0;
double V_7_1 = 0;
double V_7_2 = 0;
double X_7 = 15 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_7_2 = 15 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_7 = 0;
double sig_el_7 = 0;
double sig_v_7 = 0;
double fi_7_1 = 0.5;
double fi_7_2 = 0;
double K_7 = 2000;
```

```
double E_el_7 = 0;
double F_7 = 0;
double Q_7 = 0;
//Блок 8
double V_8_0 = 0;
double V_8_1 = 0;
double V_8_2 = 0;
double X_8 = 10 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_8_2 = 10 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_8 = 0;
```

```
double sig_el_8 = 0;
double sig_v_8 = 0;
double fi_8_1 = 0.5;
double fi_8_2 = 0;
double K_8 = 2000;
double E_el_8 = 0;
double F_8 = 0;
double Q_8 = 0;
//Блок 9
double V_9_0 = 0;
double V_9_1 = 0;
double V_9_2 = 0;
double X_9 = 5 * Math.Pow(10, -6);
double X_9_2 = 5 * Math.Pow(10, -6);
double del_X_9 = 0;
double sig_el_9 = 0;
double sig_v_9 = 0;
double fi_9_1 = 0.5;
double fi_9_2 = 0;
double K_9 = 2000;
double E_el_9 = 0;
double F_9 = 0;
double Q_9 = 0;
//Блок 10
double V_10_0 = 0;
double V_10_1 = 0;
double V_10_2 = 0;
double X_10 = 0;
double X_10_2 = 0;
double del_X_10 = 0;
double sig_el_10 = 0;
double sig_v_10 = 0;
```

```

double fi_10_1 = 0.5;
double fi_10_2 = 0;
double K_10 = 2000;
double E_el_10 = 0;
double F_10 = 0;
double Q_10 = 0;
// Общие переменные

```

```

double T = 280;
double T_c = 290;
double tau_E = 1 * Math.Pow(10, -7);
double del = 100;
double del_t = 10 * Math.Pow(10, -8); //
double t = 0;
double t_max = 50;
double h = 1 * Math.Pow(10, -9);
double M = 0.4;
double gam = -(0.6666666666666666);
double k = 50000;
double V = 0;

```

```

double a = 4;
double alfa = 1.2;
double b = 2 * Math.Pow(10, 10); ;
double c = 800;
double d = 1500;

```

```

double A = 5 * Math.Pow(10, -9);
double F_summ;
double sprin_length = 5 * Math.Pow(10, -6);
int i = 0;

```

```

double sig_el_summ = 0;
double sig_v_summ = 0;

```

```

StreamWriter sw = new
StreamWriter(@"D:\Пары\ДИПЛОМ_М\TXT_с_решениями\V_T\blok10_T280
_V850_t100_sig.txt");
    StreamWriter sw_1 = new
StreamWriter(@"D:\Пары\ДИПЛОМ_М\TXT_с_решениями\V_T\blok10_T280
_V850_t100_sig.txt");
    StreamWriter sw_2 = new

```

```

StreamWriter(@"D:\Пары\ДИПЛОМ_М\ТХТ_с_решениями\V_T\blok10_T280
_V850_t100_delX_X_V.txt");
while (t<t_max)
{
//Блок 1_____

E_el_1 = (V_1_1* tau_E) / h;
sig_el_1 = b* fi_1_1 * fi_1_1* E_el_1;
sig_v_1 = sign(V_1_1) * k* Math.Pow((Math.Abs(V_1_1 / h)), gam +
1);

F_1 = A* (sig_el_1 + sig_v_1);

del_X_1 = del_X_1 + (V_1_0 - V_1_1) * del_t;
del_X_2 = X_1_2 - X_2_2 - sprin_length;

V_1_2 = V_1_1 + ((del_t) / M) * (K_1* del_X_1 - F_1 - K_2*
del_X_2);
X_1_2 = X_1 + V_1_1* del_t;

fi_1_2 = fi_1_1 - del* (- a + 2.0 * alfa* (T - T_c) * fi_1_1 + b* fi_1_1 *
E_el_1* E_el_1 - c* fi_1_1 * fi_1_1 + d* fi_1_1 * fi_1_1* fi_1_1)*del_t;

//Блок 2_____

V_2_0 = V_1_2;

E_el_2 = (V_2_1* tau_E) / h;
sig_el_2 = b* fi_2_1 * fi_2_1* E_el_2;
sig_v_2 = sign(V_2_1) * k* Math.Pow((Math.Abs(V_2_1 / h)), gam +
1);

F_2 = A* (sig_el_2 + sig_v_2);

del_X_2 = del_X_2 + (V_2_0 - V_2_1) * del_t;
del_X_3 = X_2_2 - X_3_2 - sprin_length;
//del_X_2 = X_1_2 - X_2_2 - sprin_length;

Q_2 = (K_2* del_X_2 - F_2 - K_3* del_X_3);
V_2_2 = V_2_1 + ((del_t) / M) * Q_2;
X_2_2 = X_2 + V_2_1* del_t;
fi_2_2 = fi_2_1 - del* (-a + 2.0 * alfa* (T - T_c) * fi_2_1 - b* fi_2_1 *
E_el_2* E_el_2 - c* fi_2_1 * fi_2_1 + d* fi_2_1 * fi_2_1* fi_2_1) * del_t;

```

//Блок 3

---

$$V_{3_0} = V_{2_2};$$

$$E_{el_3} = (V_{3_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_3} = b * fi_{3_1} * fi_{3_1} * E_{el_3};$$

$$\text{sig}_{v_3} = \text{sign}(V_{3_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{3_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_3 = A * (\text{sig}_{el_3} + \text{sig}_{v_3});$$

$$\text{del}_{X_3} = \text{del}_{X_3} + (V_{3_0} - V_{3_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_4} = X_{3_2} - X_{4_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_3} = X_{2_2} - X_{3_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_3 = (K_3 * \text{del}_{X_3} - F_3 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{3_2} = V_{3_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_3;$$

$$X_{3_2} = X_3 + V_{3_1} * \text{del}_t;$$

$$fi_{3_2} = fi_{3_1} - \text{del} * (-a + 2.0 * \text{alfa} * (T - T_c) * fi_{3_1} - b * fi_{3_1} * E_{el_3} * E_{el_3} - c * fi_{3_1} * fi_{3_1} + d * fi_{3_1} * fi_{3_1} * fi_{3_1}) * \text{del}_t;$$

$$E_{el_3} * E_{el_3} - c * fi_{3_1} * fi_{3_1} + d * fi_{3_1} * fi_{3_1} * fi_{3_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 4

---

$$V_{4_0} = V_{3_2};$$

$$E_{el_4} = (V_{4_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_4} = b * fi_{4_1} * fi_{4_1} * E_{el_4};$$

$$\text{sig}_{v_4} = \text{sign}(V_{4_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{4_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_4 = A * (\text{sig}_{el_4} + \text{sig}_{v_4});$$

$$\text{del}_{X_4} = \text{del}_{X_4} + (V_{4_0} - V_{4_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_5} = X_{4_2} - X_{5_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_4} = X_{3_2} - X_{4_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_4 = (K_4 * \text{del}_{X_4} - F_4 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{4_2} = V_{4_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_4;$$

$$X_{4_2} = X_4 + V_{4_1} * \text{del}_t;$$

$$fi_{4_2} = fi_{4_1} - \text{del} * (-a + 2.0 * \text{alfa} * (T - T_c) * fi_{4_1} - b * fi_{4_1} * E_{el_4} * E_{el_4} - c * fi_{4_1} * fi_{4_1} + d * fi_{4_1} * fi_{4_1} * fi_{4_1}) * \text{del}_t;$$

$$E_{el_4} * E_{el_4} - c * fi_{4_1} * fi_{4_1} + d * fi_{4_1} * fi_{4_1} * fi_{4_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 5

---

$$V_{5_0} = V_{4_2};$$

$$E_{el_5} = (V_{5_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_5} = b * fi_{5_1} * fi_{5_1} * E_{el_5};$$

$$\text{sig}_{v_5} = \text{sign}(V_{5_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{5_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_5 = A * (\text{sig}_{el_5} + \text{sig}_{v_5});$$

$$\text{del}_{X_5} = \text{del}_{X_5} + (V_{5_0} - V_{5_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_6} = X_{5_2} - X_{6_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_5} = X_{4_2} - X_{5_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_5 = (K_5 * \text{del}_{X_5} - F_5 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{5_2} = V_{5_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_5;$$

$$X_{5_2} = X_5 + V_{5_1} * \text{del}_t;$$

$$E_{el_5} * E_{el_5} - c * fi_{5_1} * fi_{5_1} + d * fi_{5_1} * fi_{5_1} * fi_{5_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 6

---

$$V_{6_0} = V_{5_2};$$

$$E_{el_6} = (V_{6_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_6} = b * fi_{6_1} * fi_{6_1} * E_{el_6};$$

$$\text{sig}_{v_6} = \text{sign}(V_{6_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{6_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_6 = A * (\text{sig}_{el_6} + \text{sig}_{v_6});$$

$$\text{del}_{X_6} = \text{del}_{X_6} + (V_{6_0} - V_{6_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_7} = X_{6_2} - X_{7_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_6} = X_{5_2} - X_{6_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_6 = (K_6 * \text{del}_{X_6} - F_6 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{6_2} = V_{6_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_6;$$

$$X_{6_2} = X_6 + V_{6_1} * \text{del}_t;$$

$$E_{el_6} * E_{el_6} - c * fi_{6_1} * fi_{6_1} + d * fi_{6_1} * fi_{6_1} * fi_{6_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 7

---

$$V_{7_0} = V_{6_2};$$

$$E_{el_7} = (V_{7_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_7} = b * fi_{7_1} * fi_{7_1} * E_{el_7};$$

$$\text{sig}_{v_7} = \text{sign}(V_{7_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{7_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_7 = A * (\text{sig}_{el_7} + \text{sig}_{v_7});$$

$$\text{del}_{X_7} = \text{del}_{X_7} + (V_{7_0} - V_{7_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_8} = X_{7_2} - X_{8_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_7} = X_{6_2} - X_{7_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_7 = (K_7 * \text{del}_{X_7} - F_7 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{7_2} = V_{7_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_7;$$

$$X_{7_2} = X_7 + V_{7_1} * \text{del}_t;$$

$$E_{el_7} * E_{el_7} - c * fi_{7_1} * fi_{7_1} + d * fi_{7_1} * fi_{7_1} * fi_{7_1} * \text{del}_t;$$

//Блок 8 \_\_\_\_\_

$$V_{8_0} = V_{7_2};$$

$$E_{el_8} = (V_{8_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_8} = b * fi_{8_1} * fi_{8_1} * E_{el_8};$$

$$\text{sig}_{v_8} = \text{sign}(V_{8_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{8_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_8 = A * (\text{sig}_{el_8} + \text{sig}_{v_8});$$

$$\text{del}_{X_8} = \text{del}_{X_8} + (V_{8_0} - V_{8_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_9} = X_{8_2} - X_{9_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_8} = X_{7_2} - X_{8_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_8 = (K_8 * \text{del}_{X_8} - F_8 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{8_2} = V_{8_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_8;$$

$$X_{8_2} = X_8 + V_{8_1} * \text{del}_t;$$

$$E_{el_8} * E_{el_8} - c * fi_{8_1} * fi_{8_1} + d * fi_{8_1} * fi_{8_1} * fi_{8_1} * \text{del}_t;$$

//Блок 9 \_\_\_\_\_

$$V_{9_0} = V_{8_2};$$



```

E_el_9 = (V_9_1* tau_E) / h;
sig_el_9 = b* fi_9_1 * fi_9_1* E_el_9;
sig_v_9 = sign(V_9_1) * k* Math.Pow((Math.Abs(V_9_1 / h)), gam +
1);
F_9 = A* (sig_el_9 + sig_v_9);

del_X_9 = del_X_9 + (V_9_0 - V_9_1) * del_t;
del_X_10 = X_9_2 - X_10_2 - sprin_length;
//del_X_9 = X_8_2 - X_9_2 - sprin_length;

Q_9 = (K_9* del_X_9 - F_9 - K_10* del_X_10);
V_9_2 = V_9_1 + ((del_t) / M) * Q_9;
X_9_2 = X_9 + V_9_1* del_t;
fi_9_2 = fi_9_1 - del* (-a + 2.0 * alfa* (T - T_c) * fi_9_1 - b* fi_9_1 *
E_el_9* E_el_9 - c* fi_9_1 * fi_9_1 + d* fi_9_1 * fi_9_1* fi_9_1) * del_t;

//Блок 10_____

V_10_0 = V_9_2;

E_el_10 = (V_10_1* tau_E) / h;
sig_el_10 = b* fi_10_1 * fi_10_1* E_el_10;
sig_v_10 = sign(V_10_1) * k* Math.Pow((Math.Abs(V_10_1 / h)), gam
+ 1);
F_10 = A* (sig_el_10 + sig_v_10);

//del_X_10 = del_X_10 + (V_10_0 - V_10_1) * del_t;
//del_X_10 = X_9_2 - X_10_2 - sprin_length;

Q_10 = (K_10* del_X_10 - F_10);
V_10_2 = V_10_1 + ((del_t) / M) * Q_10;
X_10_2 = X_10 + V_10_1* del_t;
fi_10_2 = fi_10_1 - del* (-a + 2.0 * alfa* (T - T_c) * fi_10_1 - b*
fi_10_1 * E_el_10* E_el_10 - c* fi_10_1 * fi_10_1 + d* fi_10_1 * fi_10_1*
fi_10_1) * del_t;

sig_el_summ = sig_el_1 + sig_el_2 + sig_el_3 + sig_el_4 + sig_el_5 +
sig_el_6 + sig_el_7 + sig_el_8 + sig_el_9 + sig_el_10;
sig_v_summ = sig_v_1 + sig_v_2 + sig_v_3 + sig_v_4 + sig_v_5 +
sig_v_6 + sig_v_7 + sig_v_8 + sig_v_9 + sig_v_10;
F_summ = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + F_9 +

```

```

F_10;
    i++;
    if (i == 1000000)
    {
        //Console.WriteLine(" t = " + t + " F_1 = " + F_1 + " F_2 = " + F_2 +
" F_3 = " + F_3 + " F_10 = " + F_10 + " F_summ " + F_summ);
        sw.WriteLine(t + " " + F_1* Math.Pow(10, 3) + " " + F_2*
Math.Pow(10, 3) + " " + F_3* Math.Pow(10, 3) + " " + F_4* Math.Pow(10, 3) + "
" + F_5* Math.Pow(10, 3) + " " + F_6* Math.Pow(10, 3) + " " + F_7*
Math.Pow(10, 3) + " " + F_8* Math.Pow(10, 3) + " " + F_9* Math.Pow(10, 3) + "
" + F_10* Math.Pow(10, 3) + " " + F_summ* Math.Pow(10, 3));
        sw_1.WriteLine(t + " " + sig_el_summ*Math.Pow(10, -6) + " " +
sig_v_summ* Math.Pow(10, -6) + " " + F_summ* Math.Pow(10, 3));
        sw_2.WriteLine(t + " " + del_X_1 + " " + del_X_2 + " " + del_X_3
+ " " + del_X_4 + " " + del_X_5 + " " + del_X_6 + " " + del_X_7 + " " +
del_X_8 + " " + del_X_9 + " " + del_X_10 + " " + V_1_2 + " " + V_2_2 + " "
+ V_3_2 + " " + V_4_2 + " " + V_5_2 + " " + V_6_2 + " " + V_7_2 + " " +
V_8_2 + " " + V_9_2 + " " + V_10_2);

        // Console.WriteLine();

        i = 0;
    }
    t = t + del_t;
    //Блок 1
    X_1 = X_1_2;
    V_1_1 = V_1_2;
    fi_1_1 = Math.Abs(fi_1_2);
    if (fi_1_1 < Math.Pow(10, -25))
    {

        fi_1_1 = Math.Pow(10, -25);
    }
    //Блок 2
    X_2 = X_2_2;
    V_2_1 = V_2_2;
    fi_2_1 = Math.Abs(fi_2_2);
    if (fi_2_1 < Math.Pow(10, -25))
    {

        fi_2_1 = Math.Pow(10, -25);
    }

```

```
//Блок 3
X_3 = X_3_2;
V_3_1 = V_3_2;
fi_3_1 = Math.Abs(fi_3_2);
if (fi_3_1 < Math.Pow(3, -25))
{

    fi_3_1 = Math.Pow(3, -25);
}
//Блок 4
X_4 = X_4_2;
V_4_1 = V_4_2;
fi_4_1 = Math.Abs(fi_4_2);
if (fi_4_1 < Math.Pow(4, -25))
{

    fi_4_1 = Math.Pow(4, -25);
}
//Блок 5
X_5 = X_5_2;
V_5_1 = V_5_2;
fi_5_1 = Math.Abs(fi_5_2);
if (fi_5_1 < Math.Pow(5, -25))
{

    fi_5_1 = Math.Pow(5, -25);
}
//Блок 6
X_6 = X_6_2;
V_6_1 = V_6_2;
fi_6_1 = Math.Abs(fi_6_2);
if (fi_6_1 < Math.Pow(6, -25))
{

    fi_6_1 = Math.Pow(6, -25);
}
//Блок 7
X_7 = X_7_2;
V_7_1 = V_7_2;
fi_7_1 = Math.Abs(fi_7_2);
if (fi_7_1 < Math.Pow(7, -25))
{

    fi_7_1 = Math.Pow(7, -25);
}
```

```
    }  
    //Блок 8  
    X_8 = X_8_2;  
    V_8_1 = V_8_2;  
    fi_8_1 = Math.Abs(fi_8_2);  
    if (fi_8_1 < Math.Pow(8, -25))  
    {  
        fi_8_1 = Math.Pow(8, -25);  
    }  
    //Блок 9  
    X_9 = X_9_2;  
    V_9_1 = V_9_2;  
    fi_9_1 = Math.Abs(fi_9_2);  
    if (fi_9_1 < Math.Pow(8, -25))  
    {  
        fi_9_1 = Math.Pow(8, -25);  
    }  
    //Блок 10  
    X_10 = X_10_2;  
    V_10_1 = V_10_2;  
    fi_10_1 = Math.Abs(fi_10_2);  
    if (fi_10_1 < Math.Pow(10, -25))  
    {  
        fi_10_1 = Math.Pow(10, -25);  
    }  
    }  
    sw_1.Close();  
    sw.Close();  
    sw_2.Close();  
    //Console.ReadKey();  
    }  
    }  
}
```

## ДОДАТОК В

Програмна реалізація залежності повної сили тертя, швидкості руху, координати верхнього блока, довжини розтягування пружини та пружних напружень від часу для системи з десяти блоків з різною площею блоків та жорсткістю пружин

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.IO;

namespace F_10blok
{
    class Program
    {
        static double sign(double V)
        {
            if (V > 0)
            {
                V = 1;
            }
            else V = -1;
            return V;
        }

        static void Main(string[] args)
        {
            //Блок 1

            double V_1_0 = 1000 * Math.Pow(10, -9);
            double V_1_1 = 0;
            double V_1_2 = 0;
            double X_1 = 45 * Math.Pow(10, -6);
            double X_1_2 = 45 * Math.Pow(10, -6);
            double del_X_1 = 0;
            double sig_el_1 = 0;
            double sig_v_1 = 0;
            double fi_1_1 = 0.5;
            double fi_1_2 = 0;
            double K_1 = 4000;
            double E_el_1 = 0;
        }
    }
}
```

```
double F_1 = 0;
//Блок 2
double V_2_0 = 0;
double V_2_1 = 0;
double V_2_2 = 0;
double X_2 = 40 * Math.Pow(10, -6);
double X_2_2 = 40 * Math.Pow(10, -6);
double del_X_2 = 0;
double sig_el_2 = 0;
double sig_v_2 = 0;
double fi_2_1 = 0.5;
double fi_2_2 = 0;
double K_2 = 1550;
double E_el_2 = 0;
double F_2 = 0;
double Q_2 = 0;

//Блок 3
double V_3_0 = 0;
double V_3_1 = 0;
double V_3_2 = 0;
double X_3 = 35 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_3_2 = 35 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_3 = 0;
double sig_el_3 = 0;
double sig_v_3 = 0;
double fi_3_1 = 0.3;
double fi_3_2 = 0;
double K_3 = 1900;
double E_el_3 = 0;
double F_3 = 0;
double Q_3 = 0;
//Блок 4
double V_4_0 = 0;
double V_4_1 = 0;
double V_4_2 = 0;
double X_4 = 30 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_4_2 = 30 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_4 = 0;
double sig_el_4 = 0;
double sig_v_4 = 0;
double fi_4_1 = 0.3;
double fi_4_2 = 0;
double K_4 = 2600;
```

```
double E_el_4 = 0;
double F_4 = 0;
double Q_4 = 0;
//Блок 5
double V_5_0 = 0;
double V_5_1 = 0;
double V_5_2 = 0;
double X_5 = 25 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_5_2 = 25 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_5 = 0;
double sig_el_5 = 0;
double sig_v_5 = 0;
double fi_5_1 = 0.4;
double fi_5_2 = 0;
double K_5 = 3300;
double E_el_5 = 0;
double F_5 = 0;
double Q_5 = 0;
//Блок 6
double V_6_0 = 0;
double V_6_1 = 0;
double V_6_2 = 0;
double X_6 = 20 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_6_2 = 20 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_6 = 0;
double sig_el_6 = 0;
double sig_v_6 = 0;
double fi_6_1 = 0.5;
double fi_6_2 = 0;
double K_6 = 3650;
double E_el_6 = 0;
double F_6 = 0;
double Q_6 = 0;
//Блок 7
double V_7_0 = 0;
double V_7_1 = 0;
double V_7_2 = 0;
double X_7 = 15 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_7_2 = 15 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_7 = 0;
double sig_el_7 = 0;
double sig_v_7 = 0;
double fi_7_1 = 0.5;
double fi_7_2 = 0;
```

```
double K_7 = 1200;
double E_el_7 = 0;
double F_7 = 0;
double Q_7 = 0;
//Блок 8
double V_8_0 = 0;
double V_8_1 = 0;
double V_8_2 = 0;
double X_8 = 10 * Math.Pow(10, -6); ;
double X_8_2 = 10 * Math.Pow(10, -6); ;
double del_X_8 = 0;
double sig_el_8 = 0;
double sig_v_8 = 0;
double fi_8_1 = 0.5;
double fi_8_2 = 0;
double K_8 = 2950;
double E_el_8 = 0;
double F_8 = 0;
double Q_8 = 0;
//Блок 9
double V_9_0 = 0;
double V_9_1 = 0;
double V_9_2 = 0;
double X_9 = 5 * Math.Pow(10, -6);
double X_9_2 = 5 * Math.Pow(10, -6);
double del_X_9 = 0;
double sig_el_9 = 0;
double sig_v_9 = 0;
double fi_9_1 = 0.5;
double fi_9_2 = 0;
double K_9 = 2250;
double E_el_9 = 0;
double F_9 = 0;
double Q_9 = 0;
//Блок 10
double V_10_0 = 0;
double V_10_1 = 0;
double V_10_2 = 0;
double X_10 = 0;
double X_10_2 = 0;
double del_X_10 = 0;
double sig_el_10 = 0;
double sig_v_10 = 0;
double fi_10_1 = 0.5;
```



```

double fi_10_2 = 0;
double K_10 = 500;
double E_el_10 = 0;
double F_10 = 0;
double Q_10 = 0;
// A _____
double A_1 = 5 * Math.Pow(10, -9);
double A_2 = 1.92 * Math.Pow(10, -9);
double A_3 = 2.36 * Math.Pow(10, -9);
double A_4 = 3.24 * Math.Pow(10, -9);
double A_5 = 4.12 * Math.Pow(10, -9);
double A_6 = 4.54 * Math.Pow(10, -9);
double A_7 = 1.48 * Math.Pow(10, -9);
double A_8 = 3.68 * Math.Pow(10, -9);
double A_9 = 2.8 * Math.Pow(10, -9);
double A_10 = 0.6 * Math.Pow(10, -9);
// Общие переменные
double T = 280;
double T_c = 290;
double tau_E = 1 * Math.Pow(10, -7);
double del = 100;
double del_t = 10 * Math.Pow(10, -8); //
double t = 0;
double t_max = 50;
double h = 1 * Math.Pow(10, -9);
double M = 0.4;
double gam = -(0.6666666666666666);
double k = 50000;
double V = 0;

double a = 4;
double alfa = 1.2;
double b = 2 * Math.Pow(10, 10); ;
double c = 800;
double d = 1500;

//double A = 5 * Math.Pow(10, -9);
double F_summ;
double sprin_length = 5 * Math.Pow(10, -6);
int i = 0;

```

```

    StreamWriter sw = new
StreamWriter(@"D:\Пары\ДИПЛОМ_М\ТХТ_с_решениями\V_T\blok10_T280
_V1000_t_50_разные_A_K.txt");
    while (t < t_max)
    {
        //Блок 1_____

        E_el_1 = (V_1_1 * tau_E) / h;
        sig_el_1 = b * fi_1_1 * fi_1_1 * E_el_1;
        sig_v_1 = sign(V_1_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_1_1 / h)), gam +
1);
        F_1 = A_1 * (sig_el_1 + sig_v_1);

        del_X_1 = del_X_1 + (V_1_0 - V_1_1) * del_t;
        del_X_2 = X_1_2 - X_2_2 - sprin_length;

        V_1_2 = V_1_1 + ((del_t) / M) * (K_1 * del_X_1 - F_1 - K_2 *
del_X_2);
        X_1_2 = X_1 + V_1_1 * del_t;

        fi_1_2 = fi_1_1 - del * (- a + 2.0 * alfa * (T - T_c) * fi_1_1 + b * fi_1_1
* E_el_1 * E_el_1 - c * fi_1_1 * fi_1_1 + d * fi_1_1 * fi_1_1 * fi_1_1)*del_t;

        //Блок 2_____

        V_2_0 = V_1_2;

        E_el_2 = (V_2_1 * tau_E) / h;
        sig_el_2 = b * fi_2_1 * fi_2_1 * E_el_2;
        sig_v_2 = sign(V_2_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_2_1 / h)), gam +
1);
        F_2 = A_2 * (sig_el_2 + sig_v_2);

        del_X_2 = del_X_2 + (V_2_0 - V_2_1) * del_t;
        del_X_3 = X_2_2 - X_3_2 - sprin_length;
        //del_X_2 = X_1_2 - X_2_2 - sprin_length;

        Q_2 = (K_2 * del_X_2 - F_2 - K_3 * del_X_3);
        V_2_2 = V_2_1 + ((del_t) / M) * Q_2;
        X_2_2 = X_2 + V_2_1 * del_t;

```

$$fi\_2\_2 = fi\_2\_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T\_c) * fi\_2\_1 + b * fi\_2\_1 * E\_el\_2 * E\_el\_2 - c * fi\_2\_1 * fi\_2\_1 + d * fi\_2\_1 * fi\_2\_1 * fi\_2\_1) * del\_t;$$

//Блок 3

---

$$V\_3\_0 = V\_2\_2;$$

$$E\_el\_3 = (V\_3\_1 * tau\_E) / h;$$

$$sig\_el\_3 = b * fi\_3\_1 * fi\_3\_1 * E\_el\_3;$$

$$sig\_v\_3 = sign(V\_3\_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V\_3\_1 / h)), gam +$$

1);

$$F\_3 = A\_3 * (sig\_el\_3 + sig\_v\_3);$$

$$del\_X\_3 = del\_X\_3 + (V\_3\_0 - V\_3\_1) * del\_t;$$

$$del\_X\_4 = X\_3\_2 - X\_4\_2 - sprin\_length;$$

$$//del\_X\_3 = X\_2\_2 - X\_3\_2 - sprin\_length;$$

$$Q\_3 = (K\_3 * del\_X\_3 - F\_3 - K\_10 * del\_X\_10);$$

$$V\_3\_2 = V\_3\_1 + ((del\_t) / M) * Q\_3;$$

$$X\_3\_2 = X\_3 + V\_3\_1 * del\_t;$$

$$fi\_3\_2 = fi\_3\_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T\_c) * fi\_3\_1 + b * fi\_3\_1 * E\_el\_3 * E\_el\_3 - c * fi\_3\_1 * fi\_3\_1 + d * fi\_3\_1 * fi\_3\_1 * fi\_3\_1) * del\_t;$$

//Блок 4

---

$$V\_4\_0 = V\_3\_2;$$

$$E\_el\_4 = (V\_4\_1 * tau\_E) / h;$$

$$sig\_el\_4 = b * fi\_4\_1 * fi\_4\_1 * E\_el\_4;$$

$$sig\_v\_4 = sign(V\_4\_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V\_4\_1 / h)), gam +$$

1);

$$F\_4 = A\_4 * (sig\_el\_4 + sig\_v\_4);$$

$$del\_X\_4 = del\_X\_4 + (V\_4\_0 - V\_4\_1) * del\_t;$$

$$del\_X\_5 = X\_4\_2 - X\_5\_2 - sprin\_length;$$

$$//del\_X\_4 = X\_3\_2 - X\_4\_2 - sprin\_length;$$

$$Q\_4 = (K\_4 * del\_X\_4 - F\_4 - K\_10 * del\_X\_10);$$

$$V\_4\_2 = V\_4\_1 + ((del\_t) / M) * Q\_4;$$

$$X\_4\_2 = X\_4 + V\_4\_1 * del\_t;$$

$$fi\_4\_2 = fi\_4\_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T\_c) * fi\_4\_1 + b * fi\_4\_1$$

```

* E_el_4 * E_el_4 - c * fi_4_1 * fi_4_1 + d * fi_4_1 * fi_4_1 * fi_4_1) * del_t;

//Блок 5 _____

V_5_0 = V_4_2;

E_el_5 = (V_5_1 * tau_E) / h;
sig_el_5 = b * fi_5_1 * fi_5_1 * E_el_5;
sig_v_5 = sign(V_5_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_5_1 / h)), gam +
1);

F_5 = A_5 * (sig_el_5 + sig_v_5);

del_X_5 = del_X_5 + (V_5_0 - V_5_1) * del_t;
del_X_6 = X_5_2 - X_6_2 - sprin_length;
//del_X_5 = X_4_2 - X_5_2 - sprin_length;

Q_5 = (K_5 * del_X_5 - F_5 - K_10 * del_X_10);
V_5_2 = V_5_1 + ((del_t) / M) * Q_5;
X_5_2 = X_5 + V_5_1 * del_t;
fi_5_2 = fi_5_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T_c) * fi_5_1 + b * fi_5_1
* E_el_5 * E_el_5 - c * fi_5_1 * fi_5_1 + d * fi_5_1 * fi_5_1 * fi_5_1) * del_t;

//Блок 6 _____

V_6_0 = V_5_2;

E_el_6 = (V_6_1 * tau_E) / h;
sig_el_6 = b * fi_6_1 * fi_6_1 * E_el_6;
sig_v_6 = sign(V_6_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_6_1 / h)), gam +
1);

F_6 = A_6 * (sig_el_6 + sig_v_6);

del_X_6 = del_X_6 + (V_6_0 - V_6_1) * del_t;
del_X_7 = X_6_2 - X_7_2 - sprin_length;
//del_X_6 = X_5_2 - X_6_2 - sprin_length;

Q_6 = (K_6 * del_X_6 - F_6 - K_10 * del_X_10);
V_6_2 = V_6_1 + ((del_t) / M) * Q_6;
X_6_2 = X_6 + V_6_1 * del_t;
fi_6_2 = fi_6_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T_c) * fi_6_1 + b * fi_6_1
* E_el_6 * E_el_6 - c * fi_6_1 * fi_6_1 + d * fi_6_1 * fi_6_1 * fi_6_1) * del_t;

//Блок 7 _____

```

$$V_{7_0} = V_{6_2};$$

$$E_{el_7} = (V_{7_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_7} = b * fi_{7_1} * fi_{7_1} * E_{el_7};$$

$$\text{sig}_{v_7} = \text{sign}(V_{7_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{7_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_7 = A_7 * (\text{sig}_{el_7} + \text{sig}_{v_7});$$

$$\text{del}_{X_7} = \text{del}_{X_7} + (V_{7_0} - V_{7_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_8} = X_{7_2} - X_{8_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_7} = X_{6_2} - X_{7_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_7 = (K_7 * \text{del}_{X_7} - F_7 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{7_2} = V_{7_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_7;$$

$$X_{7_2} = X_7 + V_{7_1} * \text{del}_t;$$

$$fi_{7_2} = fi_{7_1} - \text{del} * (-a + 2.0 * \text{alfa} * (T - T_c) * fi_{7_1} + b * fi_{7_1} * E_{el_7} * E_{el_7} - c * fi_{7_1} * fi_{7_1} + d * fi_{7_1} * fi_{7_1} * fi_{7_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 8 \_\_\_\_\_

$$V_{8_0} = V_{7_2};$$

$$E_{el_8} = (V_{8_1} * \tau_E) / h;$$

$$\text{sig}_{el_8} = b * fi_{8_1} * fi_{8_1} * E_{el_8};$$

$$\text{sig}_{v_8} = \text{sign}(V_{8_1}) * k * \text{Math.Pow}(\text{Math.Abs}(V_{8_1} / h), \text{gam} +$$

1);

$$F_8 = A_8 * (\text{sig}_{el_8} + \text{sig}_{v_8});$$

$$\text{del}_{X_8} = \text{del}_{X_8} + (V_{8_0} - V_{8_1}) * \text{del}_t;$$

$$\text{del}_{X_9} = X_{8_2} - X_{9_2} - \text{sprin\_length};$$

$$//\text{del}_{X_8} = X_{7_2} - X_{8_2} - \text{sprin\_length};$$

$$Q_8 = (K_8 * \text{del}_{X_8} - F_8 - K_{10} * \text{del}_{X_{10}});$$

$$V_{8_2} = V_{8_1} + ((\text{del}_t) / M) * Q_8;$$

$$X_{8_2} = X_8 + V_{8_1} * \text{del}_t;$$

$$fi_{8_2} = fi_{8_1} - \text{del} * (-a + 2.0 * \text{alfa} * (T - T_c) * fi_{8_1} + b * fi_{8_1} * E_{el_8} * E_{el_8} - c * fi_{8_1} * fi_{8_1} + d * fi_{8_1} * fi_{8_1} * fi_{8_1}) * \text{del}_t;$$

//Блок 9 \_\_\_\_\_

```

V_9_0 = V_8_2;

E_el_9 = (V_9_1 * tau_E) / h;
sig_el_9 = b * fi_9_1 * fi_9_1 * E_el_9;
sig_v_9 = sign(V_9_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_9_1 / h)), gam +
1);

F_9 = A_9 * (sig_el_9 + sig_v_9);

del_X_9 = del_X_9 + (V_9_0 - V_9_1) * del_t;
del_X_10 = X_9_2 - X_10_2 - sprin_length;
//del_X_9 = X_8_2 - X_9_2 - sprin_length;

Q_9 = (K_9 * del_X_9 - F_9 - K_10 * del_X_10);
V_9_2 = V_9_1 + ((del_t) / M) * Q_9;
X_9_2 = X_9 + V_9_1 * del_t;
fi_9_2 = fi_9_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T_c) * fi_9_1 + b * fi_9_1
* E_el_9 * E_el_9 - c * fi_9_1 * fi_9_1 + d * fi_9_1 * fi_9_1 * fi_9_1) * del_t;

//Блок 10
_____

V_10_0 = V_9_2;

E_el_10 = (V_10_1 * tau_E) / h;
sig_el_10 = b * fi_10_1 * fi_10_1 * E_el_10;
sig_v_10 = sign(V_10_1) * k * Math.Pow((Math.Abs(V_10_1 / h)), gam
+ 1);

F_10 = A_10 * (sig_el_10 + sig_v_10);

//del_X_10 = del_X_10 + (V_10_0 - V_10_1) * del_t;
//del_X_10 = X_9_2 - X_10_2 - sprin_length;

Q_10 = (K_10 * del_X_10 - F_10);
V_10_2 = V_10_1 + ((del_t) / M) * Q_10;
X_10_2 = X_10 + V_10_1 * del_t;
fi_10_2 = fi_10_1 - del * (-a + 2.0 * alfa * (T - T_c) * fi_10_1 + b *
fi_10_1 * E_el_10 * E_el_10 - c * fi_10_1 * fi_10_1 + d * fi_10_1 * fi_10_1 *
fi_10_1) * del_t;

F_summ = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8 + F_9 +
F_10;

```

```

i++;
if (i == 1000000)
{
    Console.WriteLine(" t = " + t + " F_1 = " + F_1 + " F_2 = " + F_2 +
" F_3 = " + F_3 + " F_10 = " + F_10 + " F_summ " + F_summ);
    sw.WriteLine(t + " " + F_1 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_2 *
Math.Pow(10, 3) + " " + F_3 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_4 * Math.Pow(10, 3) +
" " + F_5 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_6 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_7 *
Math.Pow(10, 3) + " " + F_8 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_9 * Math.Pow(10, 3) +
" " + F_10 * Math.Pow(10, 3) + " " + F_summ * Math.Pow(10, 3));
    Console.WriteLine();

    i = 0;
}
t = t + del_t;
//Блок 1


---


X_1 = X_1_2;
V_1_1 = V_1_2;
fi_1_1 = Math.Abs(fi_1_2);
if (fi_1_1 < Math.Pow(10, -25))
{

    fi_1_1 = Math.Pow(10, -25);
}
//Блок 2


---


X_2 = X_2_2;
V_2_1 = V_2_2;
fi_2_1 = Math.Abs(fi_2_2);
if (fi_2_1 < Math.Pow(10, -25))
{

    fi_2_1 = Math.Pow(10, -25);
}

//Блок 3


---


X_3 = X_3_2;
V_3_1 = V_3_2;
fi_3_1 = Math.Abs(fi_3_2);
if (fi_3_1 < Math.Pow(3, -25))
{

    fi_3_1 = Math.Pow(3, -25);
}
//Блок 4


---



```

```
X_4 = X_4_2;  
V_4_1 = V_4_2;  
fi_4_1 = Math.Abs(fi_4_2);  
if (fi_4_1 < Math.Pow(4, -25))  
{  
  
    fi_4_1 = Math.Pow(4, -25);  
}  
//Блок 5  
-----  
X_5 = X_5_2;  
V_5_1 = V_5_2;  
fi_5_1 = Math.Abs(fi_5_2);  
if (fi_5_1 < Math.Pow(5, -25))  
{  
  
    fi_5_1 = Math.Pow(5, -25);  
}  
//Блок 6  
-----  
X_6 = X_6_2;  
V_6_1 = V_6_2;  
fi_6_1 = Math.Abs(fi_6_2);  
if (fi_6_1 < Math.Pow(6, -25))  
{  
  
    fi_6_1 = Math.Pow(6, -25);  
}  
//Блок 7  
-----  
X_7 = X_7_2;  
V_7_1 = V_7_2;  
fi_7_1 = Math.Abs(fi_7_2);  
if (fi_7_1 < Math.Pow(7, -25))  
{  
  
    fi_7_1 = Math.Pow(7, -25);  
}  
//Блок 8  
-----  
X_8 = X_8_2;  
V_8_1 = V_8_2;  
fi_8_1 = Math.Abs(fi_8_2);  
if (fi_8_1 < Math.Pow(8, -25))  
{  
  
    fi_8_1 = Math.Pow(8, -25);  
}
```



```
//Блок 9
X_9 = X_9_2;
V_9_1 = V_9_2;
fi_9_1 = Math.Abs(fi_9_2);
if (fi_9_1 < Math.Pow(8, -25))
{
    fi_9_1 = Math.Pow(8, -25);
}
//Блок 10
X_10 = X_10_2;
V_10_1 = V_10_2;
fi_10_1 = Math.Abs(fi_10_2);
if (fi_10_1 < Math.Pow(10, -25))
{
    fi_10_1 = Math.Pow(10, -25);
}
}
sw.Close();
Console.ReadKey();
}
}
```