



Білоус Б. Д.
Мандзюк М. Ф.
Пістун І. П.

Національний
університет
„Львівська
політехніка”

УДК 621.921 (088.8)

ПРОГРАМА ДЛЯ ПРОЕКТНОГО РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІБРАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА РУХУ З МЕХАНІЗМОМ ВІЛЬНОГО ХОДУ

В работе на основе математической модели разработан алгоритм определения максимальных и средних значений механических характеристик вибрационных одно- и двухмаятниковых преобразователей движения с механизмом свободного хода (МСХ) на произвольном интервале времени его работы. Реализован математический эксперимент с помощью алгоритмического языка программирования Fortran.

In this paper on the basis of mathematical model is worked out the algorithm of maximum and mean value determination of mechanical characteristics of vibrational one- and two-pendulum motion transformers with free-wheel clutch mechanism at arbitrary time slice of its running. By the instrumentality of algorithmic programming language "Fortran" was implemented mathematical experiment.

Постановка задачі.

Метою роботи є створення програми на алгоритмічній мові програмування Fortran для визначення кінематичних та динамічних параметрів ведучих та веденої систем вібраційних двигунів, проектного розрахунку вихідних механічних характеристик.

В основі роботи маятникових вібраційних двигунів з МВХ покладено ефект коливань фізичного маятника під дією коливань його осі (кінетичного збудження). Принципова схема найпростішого вібраційного двигуна показана на рис. 1. Він складається з ведучої і веденої систем.

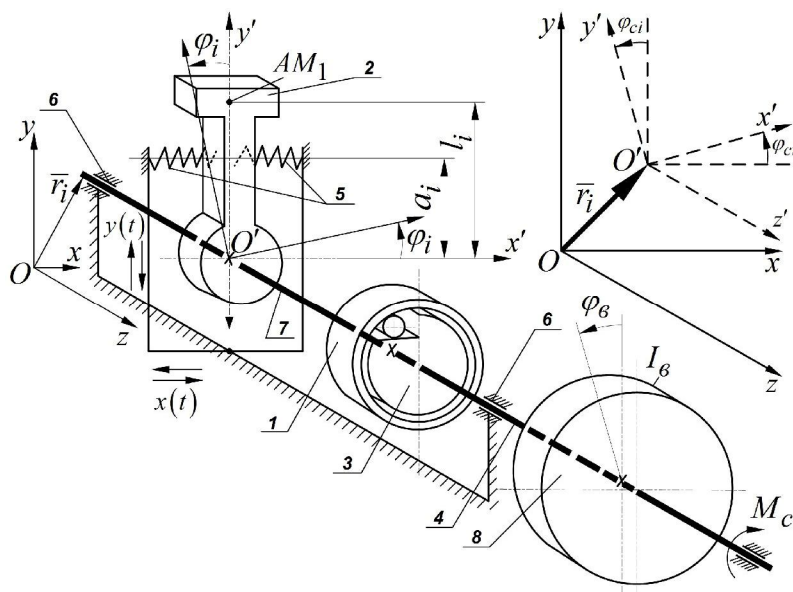
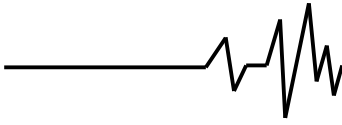


Рис. 1. Принципова схема вібраційного двигуна з n однамаятниковими вібраторами і МВХ



Основний матеріал.

Ведуча система складається з ексцентричної маси 2, яка підпружинена пружними елементами 5. Маса 2 жорстко з'єднана з ведучим елементом 1 MBX.

Ведена система складається з веденого елемента 3 MBX і жорстко з'єданого з ним вихідного вала 4, який встановлено в підшипниках на віброуючій основі 6 (робочому органі машини). Вихідний вал 4 з'єднується з виконуючим механізмом.

Під дією коливань основи 6 у ведучій системі виникають кутові коливання маятника відносно осі вала 4, які за допомогою MBX перетворюються в імпульси обертального руху вихідного вала. Конструкція та принцип дії вібраційного перетворювача дозволяють одній веденій системі працювати спільно з n

ведучими системами. Кожна i -а ведуча система може через свій MBX приєднуватись до веденої системи. Тому в передачі руху веденій системі може одночасно брати участь різна кількість ведучих систем. Різною може бути і черговість приєднання ведучих систем до веденої, а також час кожного приєднання. Ця особливість n маятникового вібраційного перетворювача з MBX визначає його як механічну систему змінної структури. Тому єдиним методом при дослідженні їх динаміки є метод математичного моделювання з створенням Fortran-програми на основі розробленої математичної моделі.

В роботах [5, 6, 7] розроблена математична модель вібраційного n маятникового перетворювача руху з MBX, яка описується системою диференціальних рівнянь виду:

$$\begin{cases} J_i \ddot{\varphi}_i + \lambda_i \dot{\varphi}_i = M_i g l_i \sin \varphi_i - c_i a_i^2 \varphi_i + M_i l_i (\ddot{x} \cos \varphi_i + \ddot{y} \sin \varphi_i) - \sigma_i (\xi_i - \delta_i) \sum_{k=1}^p c_k (\xi_i - \delta_i)^{k-1}; \\ J_e \ddot{\varphi}_e = \sum_{i=1}^n \left[\sigma_i (\xi_i - \delta_i) \sum_{k=1}^p c_k (\xi_i - \delta_i)^{k-1} \right] - \sigma'(\dot{\varphi}_e); \quad i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (1)$$

де J_i — приведений момент інерції; M_i — маса i -ої ведучої системи; l_i — відстань від осі обертання до центра ваги i -ої ведучої системи; a_i — відстань від осі обертання до точки кріплення пружних елементів i -ої ведучої системи; c_i — жорсткість пружних елементів i -ої ведучої системи; g — прискорення вільного падіння; J_e — приведений момент інерції веденої системи; φ_e — кут повороту ведучої системи; φ_e — кут повороту веденої системи;

$$\begin{cases} x(t) = d \cos(vt); \\ y(t) = b \sin(vt + \chi); \end{cases} \quad (2)$$

— закон вимушених коливань осі вібраційного двигуна; d — амплітуда вимушених коливань осі вібратора по горизонталі; b — амплітуда вимушених коливань осі вібратора по вертикалі; n — частота вимушених коливань осі вібраційного двигуна; $(\dot{}) = \frac{d}{dt}$; M_c — приведений момент корисного опору рухові веденої системи; l_i — приведений коефіцієнт внутрішнього опору в рухомих частинах двигуна; $\sigma'(\dot{\varphi}_e)$ — функція Хевісайда (враховує реактивність моменту M_c);

$$M_{ni}^* = \sigma_i (\xi_i - \delta_i) \sum_{k=1}^p c_k (\xi_i - \delta_i)^{k-1} \quad (3)$$

— передавальна функція, яка описує взаємодію i -ої ведучої та веденої систем. Зазвичай ця функція визначається експериментально і характеризує MBX, що використовується.

Результати експериментального визначення функції M_{ni} аналітично описуються залежністю виду (3). Причому σ_i — кут повороту між i -ою ведучою та веденою систем, що визначається виразом:

$$\xi_i = \int_{t_{ni}}^t (\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_e) dt \quad (4)$$

де t_{ni} — момент початку взаємодії, який визначається наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i = \dot{\varphi}_e; \\ \ddot{\varphi}_i - \ddot{\varphi}_e > 0; \quad i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (5)$$

δ_i — визначає кутовий люфт MBX. Цей кут залежить від конструктивних особливостей MBX, що використовується.

Функція $\sigma_i(\xi_i - \delta_i)$ — одинична функція Хевісайда, яка враховує односторонність взаємодії між i -ою ведучою та веденою системами. c_k — постійний коефіцієнт, який визначається з умови мінімуму середньоквадратичної помилки

$$S = \sum_{j=1}^Q (M_{ni}(\xi_j) - M_{ni}^*(\xi_j))^2 \quad (6)$$

На множині Q значення аргументу $\xi_j = (j = 1, \dots, Q)$, з системи p лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\frac{dS}{dc_k} = 0; \quad k = 1, \dots, p \quad (7)$$



або $\sum_{k=1}^p A_{ik} c_k = B_k; \quad i=1, \dots, p$, де $A_{ik} = \sum_{j=1}^q \xi_j^{k+j-2}$;
 $B_k = \sum_{j=1}^q \xi_j^{i-1} M_{ni}(\xi_j)$;

двохмаятникових вібраційних двигунів з МВХ. Понижуючи порядок рівнянь системи (1) і підставляючи вирази (3), (4), (5), отримаємо формалізовану систему інтегро-диференціальних рівнянь виду:

Розроблена Fortran-програма призначена для динамічного аналізу одно- і

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i = \varphi_{q+i}; \\ \dot{\varphi}_o = \varphi_{o2}; \\ \dot{\varphi}_{q+i} = \frac{1}{J_i} (-\lambda_i \varphi_{q+i} + M_i g l_i \sin \varphi_i - c_i a_i^2 \varphi_i + M_i l_i (\ddot{x} \cos \varphi_i + \ddot{y} \sin \varphi_i) - \\ - \sigma_i \left[\int_{t_{ni}}^t (\varphi_{q+i} - \varphi_{o2}) dt - \delta_i \right] \sum_{k=1}^p c_k \left(\int_{t_{ni}}^t (\varphi_{q+i} - \varphi_{o2}) dt - \delta_i \right)^{k-1}); \\ \dot{\varphi}_{o2} = \frac{1}{J_o} \sum_{i=1}^2 \left[\sigma_i \left(\int_{t_{ni}}^t (\varphi_{q+i} - \varphi_{o2}) dt - \delta_i \right) \sum_{k=1}^p c_k \left(\int_{t_{ni}}^t (\varphi_{q+i} - \varphi_{o2}) dt - \delta_i \right)^{k-1} \right] - \sigma'(\varphi_{o2}) \frac{M_c}{J_o} \\ i = 1, 2 \end{cases} \quad (8)$$

яка в сукупності з рівняннями (6) та (7) є основою для створення алгоритму.

Система Fortran-програм складається з головної програми MAINPGM і семи підпрограм FORMA, KOEF1, MISGJ, OSNPR, HPCG, FCT і OUTP. Логічна структура підпрограм наведена на рис.2. Послідовність роботи програми наступна:

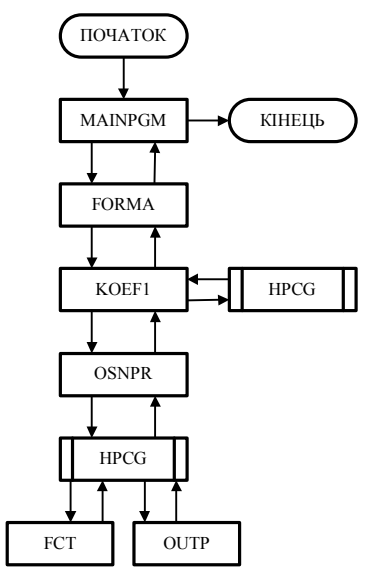


Рис. 2. Логічна структура підпрограм

1. Апроксимація експериментальної залежності передавального моменту від відносного кута повороту обойм МВХ

поліномом за методом мінімуму середньоквадратичного відхилення.

2. Розв'язання системи нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь другого порядку.

3. Визначення миттєвих значень вихідних механічних характеристик вібраційного двигуна з МВХ.

4. Визначення інтегральних значень вихідних механічних характеристик вібраційного двигуна з МВХ.

Підпрограма MAINPGM — головна підпрограма системи. Функціональне призначення програми:

1. Введення кількості рядків M матриці експериментальних значень залежності передавального моменту M_{ni} МВХ від кута σ_i відносного повороту його обойм і необхідної точності апроксимації поліномом виду (3) експериментальної залежності передавального моменту від відносного кута повороту обойм.

2. Виклик підпрограми FORMA.

3. Керування роботою всієї програми.

Логічна структура підпрограми MAINPGM наведена на рис.3.

Функціональним призначенням програми FORMA є:

1. Введення значень елементів матриці експериментальної залежності передавального моменту M_{ni} і кута σ_i .

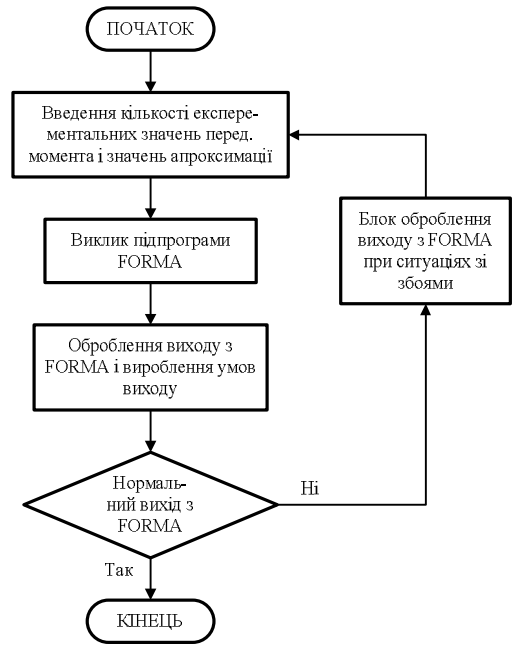
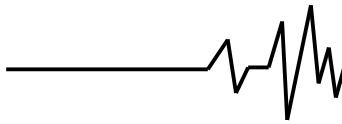


Рис. 3. Логічна структура підпрограми MAINPGM

2. Підготовка робочих параметрів для роботи програми KOEF1. Виклик підпрограми KOEF1.
3. Оброблення ситуацій виходу зі збоями з підпрограми KOEF1.
4. Організація виведення основних результатів роботи підпрограми KOEF1.

Логічна структура підпрограми FORMA наведена на рис.4.

Функціональним призначенням програми KOEF1 є:

1. Формування двохвимірної матриці коефіцієнтів лівих частин системи алгебраїчних рівнянь (7), з яких за методом мінімуму середньоквадратичного відхилення визначаються коефіцієнти полінома;
2. Формування матриці стовпця правих частин системи алгебраїчних рівнянь (7).
3. Виклик стандартної підпрограми MISGJ, яка входить в файл стандартних підпрограм SSP з математичного забезпечення.
4. Оброблення ситуацій збою при неможливості досягнення необхідної точності апроксимації.
5. Виклик підпрограми OSNPR при нормальному закінченні роботи підпрограми MISGJ.

Підпрограма MISGJ призначена для розв'язання системи лінійних рівнянь (7) методом Краута і визначення власних значень і власних чисел матриці коефіцієнтів системи (7).

Логічна структура підпрограми KOEF1 наведена на рис.5.

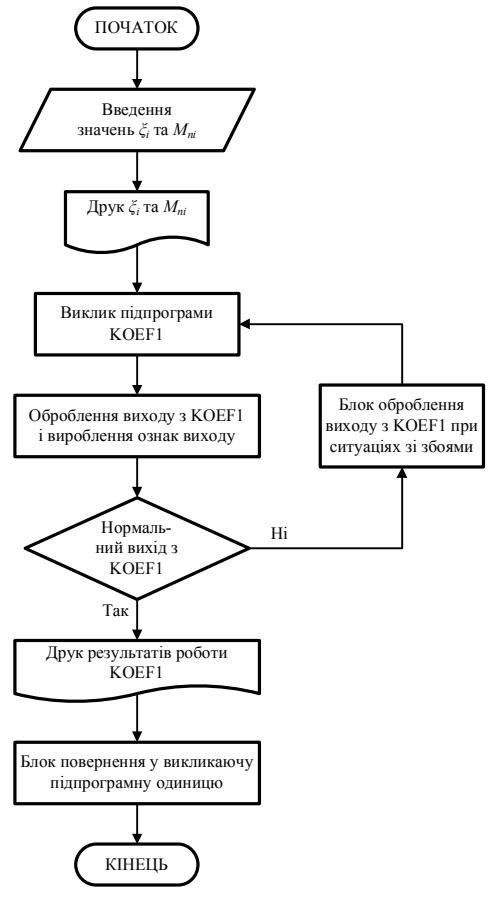


Рис. 4. Логічна структура підпрограми FORMA

Функціональним призначенням програми OSNPR є:

1. Введення геометричних, інерційних та пружних параметрів ведучої та веденої систем двигуна.
2. Введення даних, необхідних для розв'язання задачі Коші, точності, початкового кроку інтегрування і часового інтервалу інтегрування (часу роботи механізму).
3. Виклик стандартної підпрограми HPCG, яка входить в файл стандартних програм SSP з математичного забезпечення.
4. Обробка логічних нестандартних ситуацій, що виникають при роботі підпрограми HPCG.
5. Визначення інтегральних значень кінематичних і динамічних параметрів ведучих та веденої систем вібраційних двигунів, проводить розрахунок вихідних механічних характеристик цих двигунів.



Рис. 5. Логічна структура підпрограми KOEF1

Підпрограма HPCG призначена для розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку із заданими початковими умовами. Для цього в підпрограмі HPCG використовується модифікований предиктор- коректор метод Хемінга.

Це стійкий метод четвертого порядку і потребує він тільки двох розрахунків правих частин системи на кожному кроці інтегрування, що є великою перевагою в порівнянні з іншими методами того ж порядку точності, особливо з методом Рунге- Кутта, яких потребує чотирьох розрахунків правих частин на кожному кроці інтегрування. Друга перевага цього методу, що на кожному кроці інтегрування проводиться оцінка локальної похибки методу, а це дозволяє змінити і вибрати значення кроку без значних затрат часу на розрахунок. З другого боку, для визначення значення функції в наступній точці метод Хемінга потребує наявності значень функції в чотирьох попередніх точках. Ці початкові значення розраховуються спеціальною процедурою Рунге- Кутта.

Логічна структура підпрограми OSNPR наведена на рис.6.

Функціональним призначенням програми FCT є:

1. Визначення правих частин рівняння системи (8).
2. Визначення значень виразів (4), (5), функції $\sigma(\xi_i - \delta_i)$ і $\sigma'(\phi_e)$.

3. Формування масиву, необхідного для роботи підпрограми HPCG.

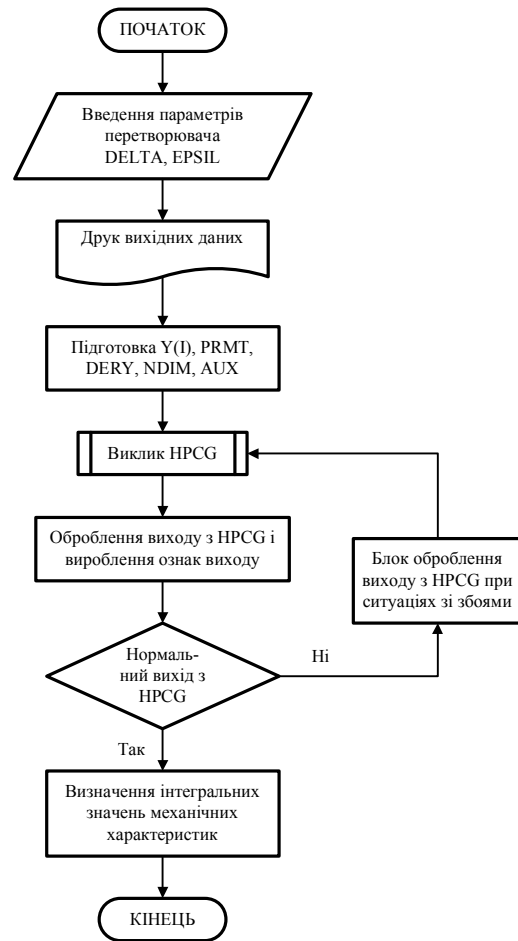


Рис. 6. Логічна структура підпрограми OSNPR

Логічна структура підпрограми FCT наведена на рис.7.

Функціональним призначенням програми OUP є:

1. Визначення миттєвих значень кінематичних і динамічних характеристик ведучих і веденої систем перетворювача за результатами роботи підпрограми HPCG.
2. Визначення миттєвих значень вихідних механічних характеристик перетворювача на кожному кроці інтегрування.
3. Забезпечення виведення результатів роботи підпрограм OSNPR, HPCG, FCT і OUP.
4. Слідкує за закінченням роботи програми, яке відповідає t_k — часу кінця дослідження роботи двигуна.
5. Вироблення ознаки закінчення розрахунку.

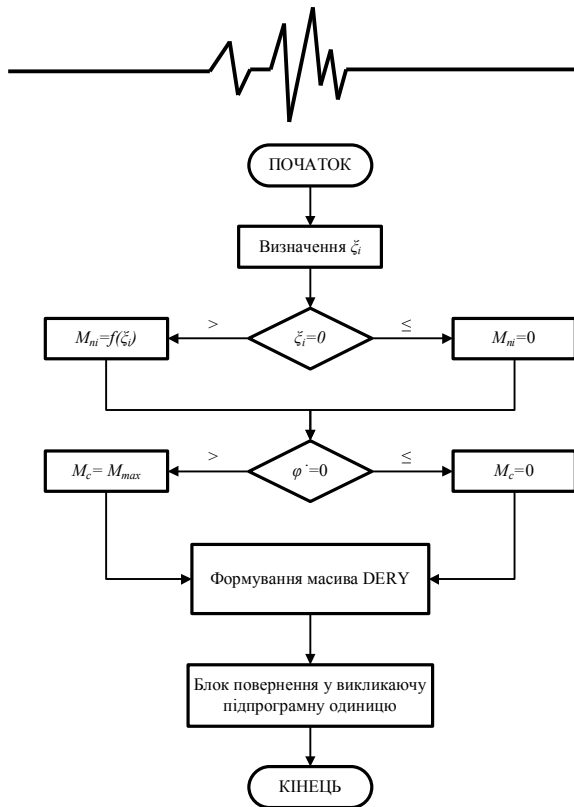


Рис. 7. Логічна структура підпрограми FCT

Логічна структура підпрограми OUPR наведена на рис.8, де PA — масив початкових умов для наступного звернення до HPCG, PAR3 — загальна область.

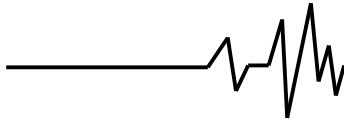


Рис. 8. Логічна структура підпрограми OUPR

Таблиця 1

Приклад результатів розрахунку механічних характеристик вібраційного двигуна за допомогою розробленої системи FORTRAN - програм

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ
 ВІБРАЦІЙНОГО ДВИГУНА З НЕМИТТЄВО ЗАКЛИНЮВАНИМ МВХ
 ЗАДАНО: 11 – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ МОМЕНТА;
 0.10000E 01 – НЕОБХІДНА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФ. РЯДУ.
 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗНАЧЕННЯ МОМЕНТА МВХ
 КУТ МОМЕНТ
 0.0 0.0
 0.14361E-01 0.45406E 01
 0.21940E-01 0.70632E 01
 0.29321E-01 0.98100E 01
 0.33908E-01 0.12108E 02
 0.41887E-01 0.14295E 02
 0.45876E-01 0.17153E 02
 0.48868E-01 0.19620E 02
 0.53854E-01 0.21862E 02
 0.57843E-01 0.24385E 02
 0.60835E-01 0.26907E 02
 РЯД МАЄ 5 ЧЛЕНІВ. ПОХИБКА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО КОЕФІЦІЄНТІВ
 НЕ ПЕРЕВИЩУЄ 0.10000E 01 ПРОЦЕНТІВ. ВОНИ РІВНІ:
 C(1)=-0.96257E-02
 C(2)= 0.31922E 03
 C(3)=-0.35185E 03
 C(4)= 0.21483E 05
 C(5)= 0.28362E 06



Продовження табл. 1

Приклад результатів розрахунку механічних характеристик вібраційного двигуна за допомогою розробленої системи FORTRAN - програм

ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ДВИГУНА:
MOMIN1= 0.94009E-01, MOMIN2= 0.40004E-01, LAMBDA=0.0, MASSA= 0.27161E 01,
MOMS=0.30000E 02, L= 0.16280E 00
C= 0.20627E 06, A= 0.13000E 00, D= 0.20000E-02, B=0.20000E-02, NY= 0.15708E 03, KAPA= 0.0
DELTA1=0.0, C2=0.20627E 06
ПОЧАТКОВІ УМОВИ ПРОЦЕСУ:
FI= 0.0, FI1= 0.0, FI2= 0.0, SKFI= 0.0, SKFI1= 0.0, SKFI2= 0.0
TN= 0.0, TKON= 0.11000E 01
ПАРАМЕТРИ ІНТЕГРУВАННЯ РІВНЯНЬ:
КРОК ІНТ..= 0.16000E-02, ТОЧН. ІНТ= 0.50000E-01
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ
МАКС. ВІДХ. МАЯТНИКА = 0.20784E-01 МІН.=-0.24793E-01
МАКС. ПРИСК МАЯТНИКА= 0.69465E 03 МІН. УСКОР=-0.71438E 03
МАКС. ВІДХ. 2 МАЯТНИКА = 0.20784E-01 МІН.=-0.24793E-01
МАКС. ПРИСК 2 МАЯТНИКА= 0.69465E 03 МІН. УСКОР=-0.71438E 03
МАКС. ШВ. ВАЛА= 0.41111E 00 МАКС. ПЕР. МОМ.=0.32498E 02
СЕРЕДНІЙ ПЕР. МОМ.= 0.12739E 02 ІНТ.ОБ= 0.69997E 00
КУТ ПОВ. ВАЛА= 0.20503E-01 СЕРЕД. ШВ. ВАЛА= 0.29420E-01
СЕРЕД. ПОТУЖН.= 0.37478E 00 МАКС. ПОТУЖН.= 0.13360E 02
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВІБРАЦІЙНОГО ДВИГУНА З НЕМИТТЄВО ЗАКЛИНЮВАНИМ МВХ
ЗАКІНЧЕНО

Висновки. Створена система Fortran-програм дозволяє дослідити механічні властивості вібраційного двигуна на етапі проектування, а також отримати оптимальні значення масо-габаритних показників та механічних характеристик. Таким чином дана система програм значно скорочує трудомісткість передпроектних та проектних робіт.

Література

1. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. М., Машиностроение, 1969, 296 с.
2. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М. Наука, 1971, 894 с.
3. Рагульскис К.М., Бансевичус Р.Ю. О новых разработках в области вибропривода и его применениях. В кн. Вибрационная техника в машиностроении и приборостроении. (Тез. Докладов Всесоюзн. Науч. Конференции 10–12 октября 1973 г.) Львов, 1973, с. 9–13.

4. А.С. 541654 (СССР). Вибрационная машина для обработки деталей. Повидайло И.С., Уфимцев В.Д., Чайка В.П.

5. Лозовой И.С., Белоус Б.Д. Уточненная математическая модель вибронного преобразователя движения с механизмом свободного хода. Вибротехника. Научные труды вузов Лит. СССР Вильнюс: Минтис, 1980, вып. 2 (40).

6. Лозовой И.С., Белоус Б.Д. Анализ полноты отображения различными математическими моделями вибронного преобразователя движения с механизмом свободного хода. В сб. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Львов: Изд-во Львов. Ун-та, 1981, вып. 21.

7. Белоус Б.Д., Лозовой И.С. Исследование вибронного преобразователя с механизмом свободного хода. На ЭВМ. В сб. Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. Львов: Изд-во Львов. Ун-та. 1981, вып. 21.