

УДК 621.9.048.6

В.М. Тимошук, доцент

О.В. Гуда, доцент

Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕБАЛАНСНИХ ВІБРОЗБУДНИКІВ НА ЇХ САМОСИНХРОНІЗАЦІЮ

**Тимошук В.М., Гуда О.В.** Дослідження впливу динамічних та конструктивних параметрів дебалансних віброзбудників на їх самосинхронізацію. Збудовано модель самосинхронізації довільного числа «майже однакових» дебалансних віброзбудників, що розміщені на тримкому тілі з одним «ступупальним» ступенем вільності; а також модель двократної самосинхронізації трьох дебалансних віброзбудників, встановлених на пружно-підвішеному тримкому тілі, яке може здійснювати малі плоскі коливання. Наведено результати комп'ютерного моделювання самосинхронізації дебалансних віброзбудників з використанням динамічної моделі асинхронного електродвигуна.

**Ключові слова:** вібраційна машина, дебалансний віброзбудник, самосинхронізація, асинхронний електродвигун. Форм. 2. Рис. 5. Літ. 9.

**Тимошук В.Н., Гуда О.В.** Исследование влияния динамических и конструктивных параметров дебалансных вибровозбудителей на их самосинхронизацию. Построена модель самосинхронизации произвольного числа «почти одинаковых» дебалансных вибровозбудителей расположенных на несущем теле с одной степенью свободы; а также модель двократной самосинхронизации трех дебалансных вибровозбудителей, установленных на на плоско колеблющемся несущем твердом теле, которое может совершать малые плоские движения. Приведены результаты компьютерного моделирования самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей с использованием динамической характеристики асинхронного электродвигателя.

**Ключевые слова:** вибрационная машина, дебалансный вибровозбудитель, самосинхронизация, асинхронный электродвигатель.

**Tymoshchuk V. N., Guda O.V.** The investigation of influence of dynamic and constructional parameters of unbalanced vibro-exciter on their self-synchronization. By building the model of self-synchronization of arbitrary number of "almost identical" unbalanced exciters placed on a trembling body with one translational degree of freedom is made, and also the model double self-synchronization of three unbalanced vibration exciters installed on elastic-suspended durable body that can make small plane oscillations. The investigation simulation of self-synchronization of unbalanced vibro-exciter.

**Keywords:** vibration machine unbalanced vibro-exiter, self-synchronization, asynchronous motor.

**Постановка проблеми.** Більшість вібраційних машин з самосинхронізуючими збудниками, що самосинхронізуються серійно випускаються й успішно працюють у самих різноманітних виробництвах. На даний час теорія синхронізації динамічних систем розроблена досить повно. Переважна більшість результатів отримана аналітичними методами [1-4]. Однак, для розширення можливості практичного застосування явища самосинхронізації досить важливим є питання про умови встановлення синхронних режимів. Теоретично отримані умови існування та стійкості (у малому) стаціонарних режимів руху ще не гарантують встановлення цих режимів при початкових умовах, що зустрічаються у реальних системах. Отже, слід вдаватися до постановки експерименту чи до комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** У роботах [5-7] для дослідження самосинхронізації дебалансних віброзбудників використовувалося чисельне моделювання. Проте, у цих та інших існуючих малочисельних працях, моделювання виконувалося з використанням лінійних характеристик електродвигунів. Однак, на теперішній час розроблено більш точні моделі двигунів.

**Мета роботи.** Більшість особливостей постановки та розв'язання задач про синхронізацію механічних віброзбудників можуть бути проілюстровані на найпростішому прикладі двох дебалансних збудників, що розміщені на пружно закріпленому несучому тілі, яке може здійснювати прямолінійні коливання (рис. 1). Система характеризується трьома узагальненими координатами – кутами повороту віброзбудників  $\varphi_k$  та переміщеннями тримкого тіла  $x$ .

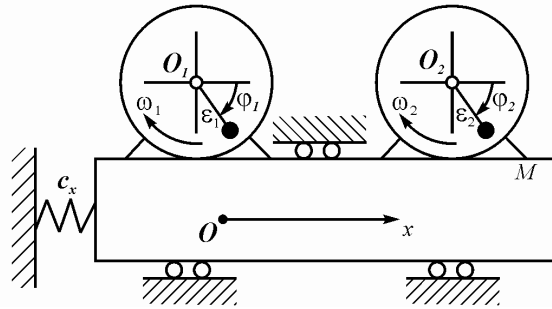


Рис. 1. Схема вібраційної машини

Рівняння руху розглядуваної коливної системи можуть бути записані у вигляді:

$$I_s \ddot{\varphi}_s = L_s - R_s + m_s e_s (\ddot{x} \sin j_s + g \cos j_s), \quad (s = 1, 2),$$

$$M \ddot{x} + b_x \dot{x} + c_x x = \sum_{s=1}^2 m_s e_s (\ddot{\varphi}_s \sin j_s + j_s \dot{\varphi}_s \cos j_s). \quad (1)$$

Тут  $M$  – сумарна маса тримкого тіла разом з масами збудників;  $m_s, e_s, I_s$  – відповідно, маса  $s$ -го ротора збудника, його ексцентриситет і момент інерції відносно осі обертання;  $c_x$  – жорсткість, пов'язана з переміщенням тримкого тіла у напрямку осі  $x$ ;  $b_x$  – коефіцієнт опору лінійного демпфуючого елемента;  $L_s, R_s$  – електромагнітний момент  $s$ -го двигуна та момент сили опору обертання;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Для аналізу впливу електромагнітних перехідних процесів в асинхронному двигуні на динаміку руху роторів збудників застосовано лінеаризовану динамічну характеристику, використану в роботах [8, 9]. Електромагнітний момент асинхронного двигуна для цієї моделі описується диференціальними рівняннями

$$T_D^2 \xi \ddot{L}(t) + T_D \xi \left( 2 - \frac{T_D}{s} \right) \dot{L}(t) + \left( 1 - \frac{T_D \xi}{s} \right) L(t) = 2 \xi L_{\max} s_a, \quad (2)$$

де  $L(t)$  – електромагнітний момент, що розвивається двигуном;  $T_D = \frac{1}{100\pi s_{\dot{\delta}}}$  – електромагнітна

стала часу;  $\xi = \frac{1}{1 + s_a}$ ;  $s_a = \frac{\omega_c - \varphi}{\omega_c}$  – відносне ковзання;  $s = \omega_c - \varphi$  – поточне ковзання;  $\omega_i$  –

номінальна кутова швидкість двигуна;  $s_{\dot{\delta}} = \frac{s_i + \sqrt{\Delta s_i}}{1 + \sqrt{\Delta s_i}}$  – критичне ковзання;  $s_i = \frac{\omega_c - \omega_i}{\omega_c}$  –

номінальне ковзання;  $\Delta = \frac{\lambda_i (\lambda_{\max} - 1)}{\lambda_{\max} - \lambda_i}$ ;  $\lambda_i = \frac{L_i}{L_i}$ ;  $\lambda_{\max} = \frac{L_{\max}}{L_i}$ ;  $L_i, L_{\max}, L_i$  – пусковий,

максимальний (критичний) та номінальний моменти двигуна.

Момент сил опору обертанню ротора збудника обчислюється за формулою  $R_s = 0,5 f m_s \varepsilon_s \varphi_s^2 d$ . Зазначимо, що в порівнянні з цим моментом, втрати від тертя в підшипниках електродвигуна є незначними внаслідок зрівноваженості його ротора.

Чисельне інтегрування рівнянь електромеханічної системи (1), (2) здійснювалося за допомогою програмного пакета Maple 10 за таких значень параметрів:  $m_1 = 0,95 \text{ êã}$ ;  $m_2 = 1,05 \text{ êã}$ ;  $\varepsilon_1 = 0,032 \text{ ì}$ ;  $\varepsilon_2 = 0,037 \text{ ì}$ ;  $I_1 = 0,0028 \text{ êãì}^2$ ;  $I_2 = 0,003 \text{ êãì}^2$ ;  $\dot{I} = 27 \text{ êã}$ ;  $\tilde{n}_x = 1 \cdot 10^5 \text{ Í / ì}$ ;  $d = 0,02 \text{ ì}$ ;  $f_1 = 0,004$ ;  $f_2 = 0,007$ . Передбачається, що у вібраційній машині використані трифазні асинхронні електродвигуни серії 4А з короткозамкнутим ротором, потужністю 0,09-0,25 кВт та частотою обертання 1500 об/хв.

**Основний матеріал і результати.** Розглянемо більш важливий, з практичної точки зору, зарезонансний випадок ( $p_x < \omega$ ). З графіків (рис. 2, а, б) слідує: встановлені на спільній рухомій основі два дебалансні збудники, що приводяться в рух від незалежних електродвигунів, обертаються з однаковою середньою кутовою швидкістю – синхронною швидкістю (рис. 2, криві 1, 2;  $\omega_{\text{світ}} = 146,5 \text{ c}^{-1}$ ), тоді як ті ж самі збудники, встановлені на нерухомій основі, мають різні парціальні швидкості (рис. 2, а, криві 3, 4;  $\omega_1 = 148,6 \text{ c}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 144 \text{ c}^{-1}$ ). При цьому, кутова швидкість синхронного обертання наближено дорівнює середньому арифметичному парціальних швидкостей збудників. За графіком, побудованим для періоду усталеного руху (рис. 2, б) видно, що кутові швидкості збудників стають однаковими лише в середньому, що синхронна швидкість кожного із збудників не є сталою – вона увесь час коливається біля якогось певного значення  $\omega_{\text{синхр}}$ . Наведені результати свідчать, що збудники в усталеному русі обертаються з кутовою швидкістю, близькою до швидкості холостого ходу (різниця становить 2,2–2,9%).

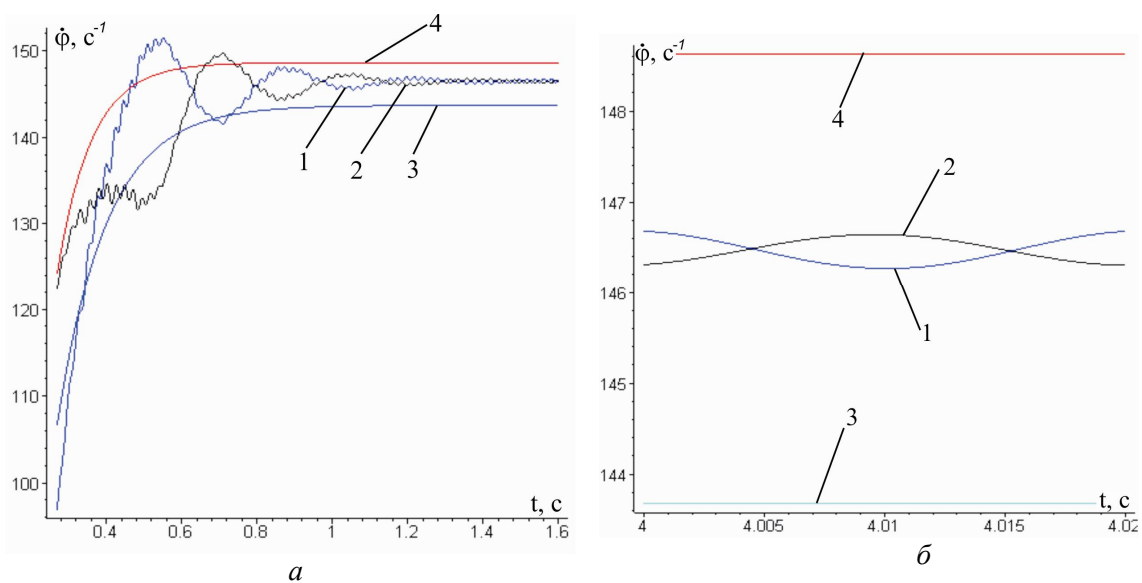


Рис. 2. Залежність від часу синхронних (1, 2) і парціальних (3, 4) швидкостей збудників: а) з моменту пуску; б) усталений рух

Звернемо увагу також на те, що встановлення ротора збудника на рухому основу призводить до того, що його кутова швидкість дещо зменшується (на 1,3–1,9%) у порівнянні з парціальною швидкістю (пов'язано з втратами енергії на коливання пружно підвішеного несучого тіла) та що виникають періодичні коливання швидкості. При цьому коливання швидкості незначні – максимальні величини відхилень малі порівняно з середнім значенням швидкості – 0,3...0,5%.

Різниця фаз між роторами збудниками при встановленні синхронного режиму стає сталою і наближено дорівнює  $180^\circ$  (рис. 3, а, крива 1). У той час, зсув фаз між цими ж збудниками, у випадку встановлення їх на нерухомій основі лінійно зростає з часом (рис. 3, а, крива 2). При цьому, у випадку самосинхронізації можна говорити лише про деякий середній зсув фаз, оскільки його величина може вважатися сталою лише при розгляді відносно тривалого періоду часу, а в межах одного циклу усталеного руху періодично коливається поблизу деякого середнього значення. За рис. 3, б можна оцінити величину цих коливань, яка є одним з основних параметрів оцінки стабільності синхронного режиму руху збудників [4]. У розглядуваному випадку за період усталених коливань зсув фаз змінюється у досить незначних межах:  $187,6^\circ - 187,8^\circ$ .

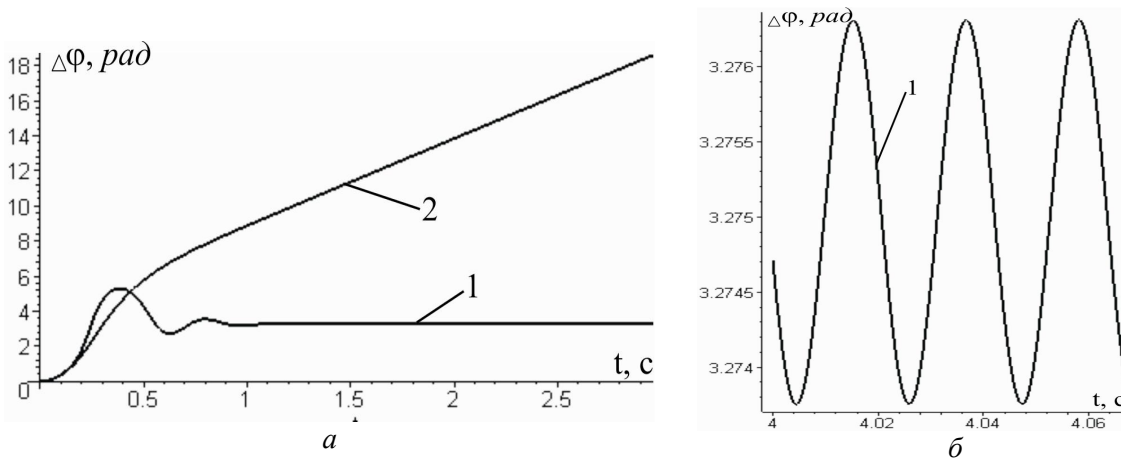


Рис. 3. Залежність різниці фаз між збудниками від часу: а) з моменту пуску; б) усталений рух: 1 –  $p_x < \omega$ ; 2 – збудники на нерухомій основі

Суттєве зменшення амплітуди усталених коливань (рис. 4) через 1–1,5 с після пуску електродвигунів є наслідком встановлення синхронно-протифазного режиму обертання збудників внаслідок якого їх збурюючі сили практично зрівноважуються одна одною. При цьому, несуче тіло не є нерухомим, а як слідує з результатів досліджень, – вібрає з дуже незначною амплітудою ( $A < 0,4 \text{ і } \dot{i}$ ) та частотою, яка дорівнює частоті збурення.

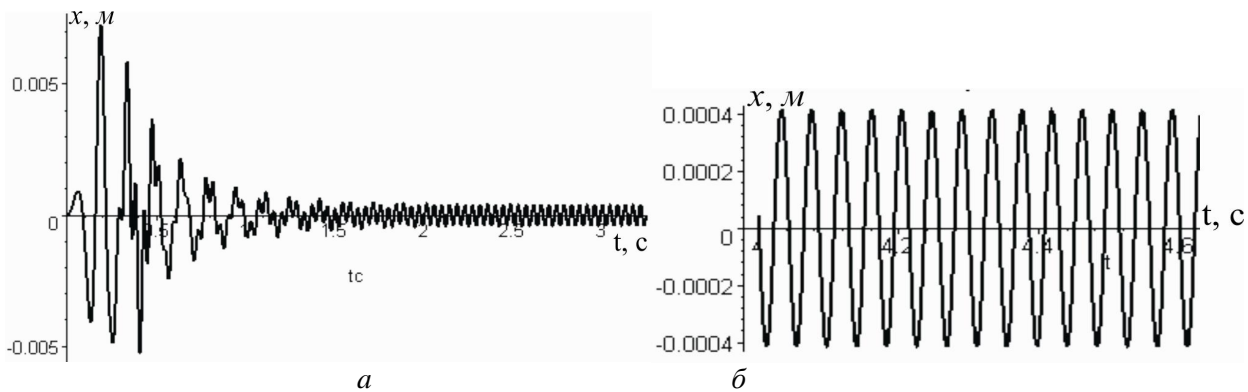


Рис. 4. Залежність від часу переміщення несучого тіла: а) з моменту пуску; б) усталений рух

Ефект самосинхронізації має місце також за значно більшої різниці між парціальними швидкостями збудників (істотної розбіжності між параметрами електродвигунів та збудників), у цьому разі, зсув фаз між збудниками буде все помітніше відрізнятися від  $180^\circ$ , і як наслідок, амплітуда коливань несучого тіла дещо збільшиться.

Графіки на рис. 2, а та рис. 5, а, б демонструють динаміку виходу роторів збудників на синхронний режим руху. Починаючи з моменту часу  $t > 0,3 \text{ с}$ , на графіку кутових швидкостей (рис. 2, а) можна спостерігати спроби збудників обертатися з однаковою швидкістю. Встановлено, якщо коливна система допускає самосинхронізацію, то вона настає практично відразу після виходу електродвигунів на усталений режим обертання. У розглядуваному випадку час встановлення синхронного режиму руху становить близько 1–1,5 с.

Коливання електромагнітних моментів двигунів (рис. 5, а, б) перед встановленням усталеного режиму руху також демонструють процес виникнення самосинхронізації. Прослідковується взаємозалежність моментів: якщо на одному з двигунів обертальний момент збільшується, то на іншому – навпаки, спадає; спостерігаються проміжки часу, протягом яких при зростанні моменту на одному з двигунів, інший двигун переходить у генераторний режим роботи. Згідно наведених графіків, «повільний» віброзбудник гальмується з меншим за абсолютною величиною вібраційним моментом і протягом меншого проміжку часу, проте пришвидшується

сильніше й довше, ніж «швидкий»; максимальні величини вібраційних моментів в усталеному режимі є значно більшими за моменти двигунів та моменти опору обертанню.

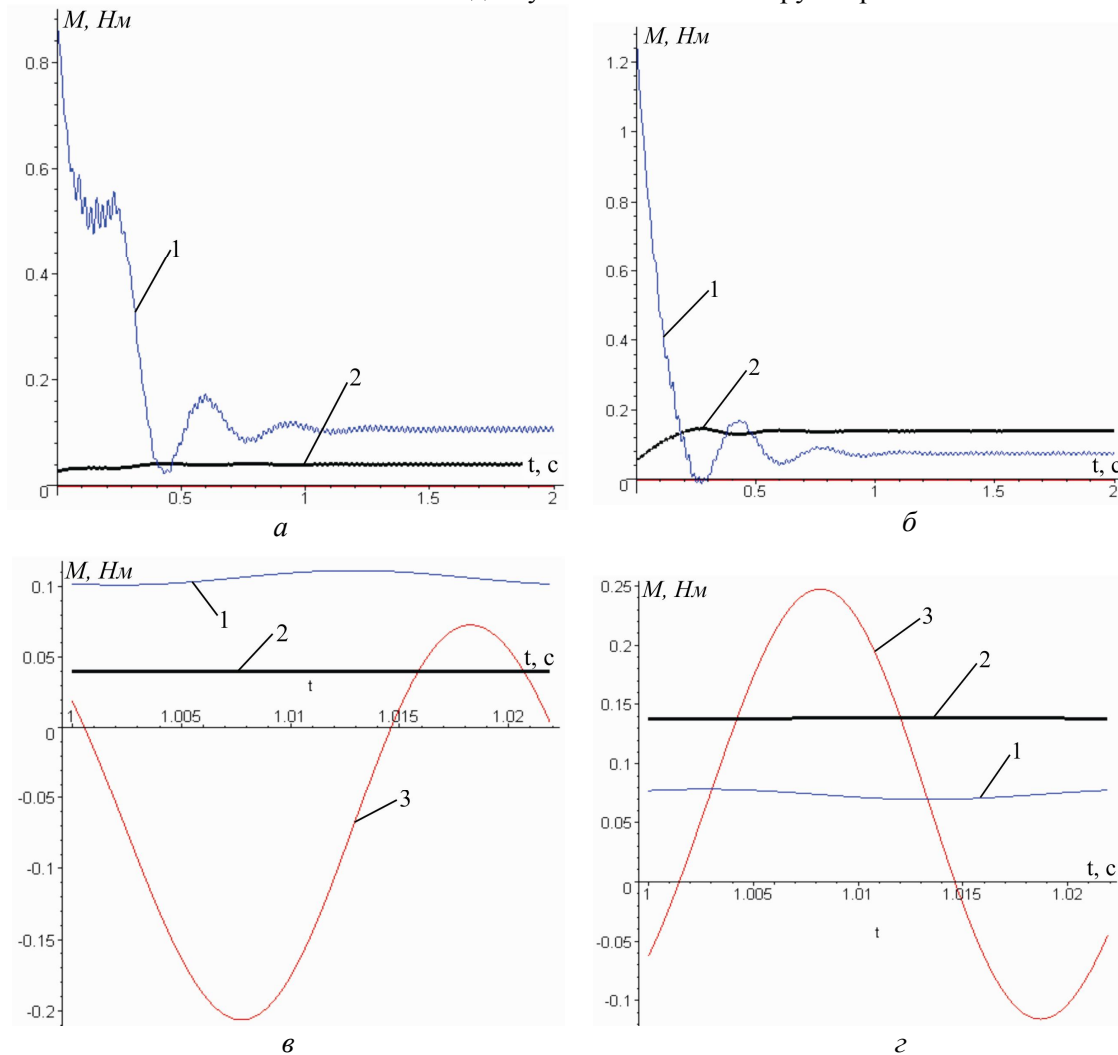


Рис. 5. Залежність від часу моментів: 1 – двигуна, 2 – опору обертанню; 3 – вібраційного моменту, з моменту пуску (а, б) для усталеного руху (в, г); для «швидкого» збудника (а, в); для «повільного» збудника (б, г)

Зауважимо, що такі вібраційні моменти (значні за величиною та змінні за напрямком) додатково навантажують жорсткі кінематичні зв'язки (ланцюги, зубчасті колеса) у разі застосування кінематичної синхронізації віброзбудників.

Проаналізувавши величину та розмах коливань моментів, що діють на кожний з віброзбудників, можна констатувати справедливості припущень, прийнятих під час аналітичних досліджень [3]; моменти двигунів та моменти опору обертанню при усталеному русі змінюються в незначних межах та допускають лінеаризацію; основний вплив на самосинхронізацію роторів збудників чинять вібраційні моменти.

У випадку дорезонансного руху отримано аналогічні графічні залежності. Відмінність полягає лише у значеннях досліджуваних параметрів: кут зсуву фаз між роторами збудників у стійкому синхронному русі приймає значення, близьке до нуля. При цьому, віброзбудники обертаються практично синфазно, і, як наслідок, несуче тіло здійснює вимушені коливання з частотою, яка дорівнює частоті збудюючої сили та амплітудою  $A \approx 4 \dot{\lambda} \dot{\lambda}$ , що узгоджується з аналітичними результатами.

**Висновки.** Наведена методика дає змогу докладно аналізувати динамічні процеси, що мають місце при самосинхронізації дебалансних віброзбудників з урахуванням їх взаємодії з

асинхронними електродвигунами; дозволяє досліджувати вплив динамічних та конструктивних параметрів системи на самосинхронізацію збудників; підбирати основні параметри вібромашини.

Проведене чисельне моделювання явища самосинхронізації показує добру узгодженість з відомими аналітичними та експериментальними результатами.

#### **Список використаних джерел**

1. Блехман И.И. Самосинхронизация в природе и технике / И.И. Блехман – М.: Наука, 1981. – 352 с.
2. Нагаев Р.Ф. Самосинхронизация инерционных вибровозбудителей // Нагаев Р.Ф., Гузев В.В. Под ред. К.М.Рагульскаса. – Л.: Машиностроение, 1990. – 178 с.
3. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем / И.И. Блехман– М.: Наука, 1971. – 896 с.
4. Вибрации в технике. Справочник. Т.4 / Под ред. Э.Э.Лавендела – М.: Машиностроение. 1981. – 509 с.
5. Румянцев С.А. Динамика переходных процессов и самосинхронизация движений вибрационных машин / С.А.Румянцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 134 с.
6. Ярошевич М.П. Складні випадки в теорії самосинхронізації механічних віброзбудників / М.П.Ярошевич.– Луцьк: ЛДТУ, 2005. – 192 с.
7. Ярошевич Т.С. Чисельне моделювання самосинхронізації дебалансних віброзбудників/ Т.С.Ярошевич, В.М.Тимошук, М.П.Ярошевич //Вісник НУ "Львівська політехніка". -2006.-№556.-с.103-107.
8. Шатохин В.М. Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин: монографія / В.М. Шатохин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.-456с.
9. Ярошевич Н.П. Компьютерное моделирование двойного пуска вибрационных машин с инерционным возбуждением колебаний / Н.П.Ярошевич В кн. Нелинейные проблемы теории колебаний и теории управления. Вибрационная механика. – СПб.: Наука, 2009. – С. 170-192.