

УДК 62.52:621.9.06

Белокузов Евгений Витальевич

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)
Россия, Санкт-Петербург¹
Аспирант кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов
(АТКиП) ИМаш «ЛМЗ-ВТУЗ»
E-Mail: be1389@mail.ru

Шестаков Вячеслав Михайлович

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)
Россия, Санкт-Петербург
Заведующий кафедрой автоматизации технологических комплексов и процессов
(АТКиП) ИМаш «ЛМЗ-ВТУЗ»
Доктор технических наук, профессор
E-Mail: atkip@zavod-vtuz.ru

Исследование и оптимизация динамики трехроторной вибрационной установки со средним поворотным ротором

Аннотация: вибрационные установки с различными типами вибровозбудителей широко используются в ряде отраслей промышленности и испытательных лабораториях. Проводится большое количество теоретических и прикладных исследований вибрационных процессов. Разрабатываются новые высокоэффективные технически и выгодные экономически конструкции, принципы управления и оптимизации режимов работы виброустановок. В статье предложена концепция построения трехроторной вибрационной установки со средним поворотным ротором, в которой источником вынуждающих сил и моментов служат дебалансные (центробежные) роторы. Рассмотрена динамика взаимосвязанной электромеханической системы и принципы оптимизации режимов её работы. Созданы эквивалентное математическое описание электрической и механической частей, динамическая структурная схема и соответствующая имитационная модель электромеханической системы трехроторной вибрационной установки. Приведены результаты многофакторных компьютерных исследований квазиустановившихся и динамических режимов работы установки с учетом внутренних взаимосвязей и внешних возмущений при генерации плоскостных и пространственных колебаний рабочего органа (платформы). Результаты исследований показывают, что данный класс виброустановок позволяет получать широкий спектр управляемых пространственных траекторий движения платформы (как совокупности линейных и угловых перемещений) и дает возможность создавать высокопроизводительные механизмы для машиностроения.

Ключевые слова: Электромеханические системы; вибрационные установки; вибровозбудители; математические модели; структурные схемы; имитационные модели; оптимизация динамики; управляемые колебания; режимы работы; компьютерные исследования.

Идентификационный номер статьи в журнале 54TVN114

¹ 197101, Санкт-Петербург, ПС Большой пр., д.51/9, кв.12

Evgeniy Belokuzov

St. Petersburg State Polytechnical University, Institute of Machine-Building
Russia, Saint-Petersburg
E-Mail: be1389@mail.ru

Vyacheslav Schestakov

St. Petersburg State Polytechnical University, Institute of Machine-Building
Russia, Saint-Petersburg
E-Mail: atkip@zavod-vtuz.ru

Research and optimization of dynamics of the three-rotor vibration installation with middle turning rotor

Abstract: In various industries and testing laboratories of widely used vibration installations with different types of vibration exciters. A large number of theoretical and practical scientific researches of vibration processes are carried out. New high-tech and economically advantageous structures, laws of control and optimization of operating conditions of vibration installations are developed. The article offers the concept of building a three-rotor vibration installation with middle turning rotor in which the source of coercive forces and moments are unbalance rotors. A dynamics of interconnected electromechanical system and methods of optimization of its operation are considered. The equivalent mathematical description of the electrical and mechanical parts, dynamic structural diagram and model simulating an electromechanical system of three-rotor vibration installation are worked out. The results of multifactor computer research of quasi steady-state and dynamic operating conditions, taking into account the internal linkages and external disturbances, during the generation of planar and spatial oscillations of the working body (platform) are shown. Researches show that the this class of vibration installation allows getting a wide range of managed spatial trajectory of movement of the platform (as a set of linear and angular displacement) and gives the ability to create high-performance mechanisms for mechanical engineering.

Keywords: Electromechanical systems; vibration installations; vibration exciters; mathematical models; structural diagrams; simulation models; optimization of dynamics; controlled oscillations; operating modes; computer research.

Identification number of article 54TVN114

Во многих отраслях промышленности, а также на испытательных полигонах и в лабораториях широкое распространение получили *вибрационные установки (ВУ)* с различными типами вибровозбудителей. Большинство ВУ, применяемых в горнорудной промышленности, строительстве и на машиностроительных предприятиях для интенсификации различных технологических процессов, являются электромеханическими, создающими вибрацию в результате преобразования механической энергии вращения с помощью несбалансированных роторов – дебалансов, приводимых во вращение электроприводом [1, 3, 4, 7]. Установки, применяемые в испытательных и измерительных вибростендах, позволяющих проводить практические исследования различных динамических воздействий (вибрации и удары) на отдельные конструкции и устройства, как правило, требуют высокого качества регулирования рабочих параметров и достаточно широкий спектр технологических (колебательных) режимов. Качественное улучшение режимов функционирования ВУ может быть достигнуто за счет совершенствования электрической и механической частей, причем оптимальными и наиболее эффективными являются комбинированные технические решения. В предыдущих работах нами были предложены четырех- и шестироторные ВУ [8, 9], генерирующие как плоскостные, так и пространственные управляемые колебания виброплатформы. Вместе с тем аналогичные режимы можно получить в трехроторных установках со средним поворотным ротором. Задачей настоящей статьи является определение возможностей подобных ВУ и анализ режимов их работы.

При описании динамических процессов в *электромеханических системах (ЭМС)* используют уравнения механики и электродинамики, на основе которых получают соответствующие математические модели систем. При этом выделяют типовые узлы механической и электрической частей агрегатов (модули), на основе которых komponуют необходимые эквивалентные модели в виде *динамических структурных схем (ДСС)*. Метод модульного построения математических моделей является рациональным, хорошо зарекомендовавшим себя при разработке моделей ЭМС ВУ и их исследовании с применением комплекса расчетно-аналитических и компьютерных методов для заданного множества технических решений и режимов работы ВУ [7]. Структурированные имитационные модели, построенные на основе модульного математического описания, позволяют провести многофакторные исследования динамики с учетом, как внутренних взаимосвязей, так и внешних возмущений, что обеспечивает эффективную оптимизацию ЭМС [2] и дает возможность разрабатывать новые технические решения высокопроизводительных агрегатов и систем управления ими для различных отраслей промышленности.

Для имитационного моделирования пространственных колебаний механической системы ВУ необходимо построить математические модели перемещений относительно координатных осей X, Y, Z ; при этом вынуждающие силы, действующие в координатных плоскостях, представляются в виде соответствующих проекций пространственных сил, создаваемых дебалансными вибровозбудителями. Особенностью рассматриваемой концепции построения трехроторной ВУ является получение пространственно распределенных вынуждающих сил и моментов за счет поворотной (в вертикальной плоскости) конструкции среднего ротора. На рис.1 представлена расчетная кинематическая схема ВУ, где введены следующие обозначения: 1, 2, 3 – *дебалансные роторы (ДР)*; $\rho_B, m_{B_i}, \varphi_{B_i}$ – радиус инерции, масса и углы поворота ДР соответственно, α_3 – угол поворота оси среднего ротора в плоскости ZY ; П – платформа; m_{Π}, φ_{Π} – масса и угол поворота П в плоскости XY ; $x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}$ – колебания П по координатным осям; ПВ – пружинные виброизоляторы; c, b – коэффициенты жесткости и демпфирования ПВ; a, r – конструктивные параметры ВУ.

ДР 1 и 2 имеют горизонтальные оси вращения, ротор 3 может занимать положение от вертикального ($\alpha_3 = 0^0$) до горизонтального ($\alpha_3 = 90^0$). Массы роторов могут быть одинаковыми или различными. В частности, при $m_{B1} = m_{B2} = m_B$ и $m_{B3} = 2m_B$ можно регулировать амплитуду колебаний y_{Π} от 0 при противофазном вращении роторов 1, 2 и 3 до максимума $y_{\Pi \max}$ при их синфазном вращении.

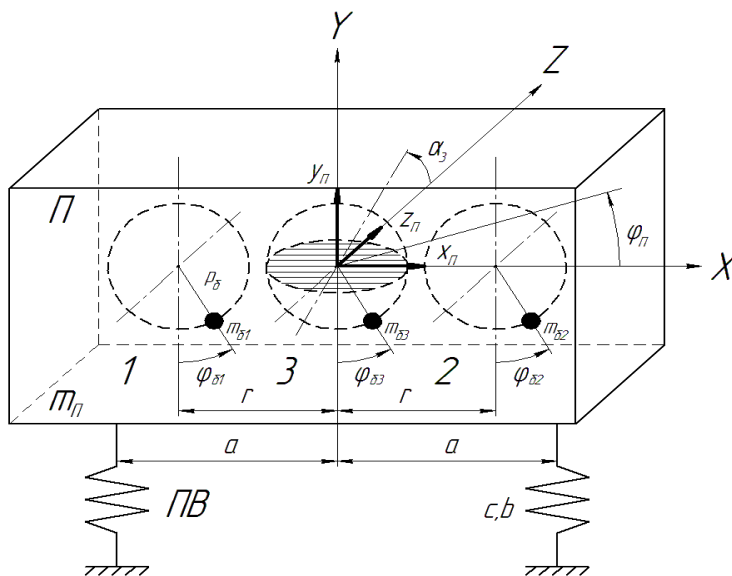


Рис. 1. Расчетная кинематическая схема ВУ

На основе кинематической схемы запишем соответствующие дифференциальные уравнения для линейных и угловых перемещений виброплатформы по каждой из осей.

1. Математическое описание механической части ВУ

Уравнение поступательного движения платформы по оси Y:

$$m_0 \ddot{y}_{\Pi} + b_Y \dot{y}_{\Pi} + c_Y y_{\Pi} + m_0 g = F_{1Y} + F_{2Y} + F_{3Y} \cos \alpha_3, \quad (1)$$

где $m_0 = m_{\Pi} + \sum_{i=1}^3 m_{Bi}$; c_Y, b_Y - осевая жесткость и демпфирование ПВ;

$F_{iY} = -m_{Bi} \rho_B (\ddot{\varphi}_{Bi} \sin \varphi_{Bi} + \dot{\varphi}_{Bi}^2 \cos \varphi_{Bi})$ - проекции вынуждающих сил на ось Y, ($i = 1, 2, 3$);

1-я составляющая – тангенциальная сила, 2-я составляющая – центробежная сила ДР.

Уравнение поступательного движения платформы по оси Z:

$$m_0 \ddot{z}_{\Pi} + b_Z \dot{z}_{\Pi} + c_Z z_{\Pi} = F_{3Z}, \quad (2)$$

где c_Z, b_Z - поперечная (тангенциальная) жесткость и демпфирование ПВ;

$$F_{3Z} = m_{B3} \rho_B (-\ddot{\varphi}_{B3} \sin \varphi_{B3} + \dot{\varphi}_{B3}^2 \cos \varphi_{B3}) \sin \alpha_3.$$

Уравнение углового перемещения платформы относительно оси Z:

$$J_{0Z} \ddot{\varphi}_{\Pi} + b_Y a^2 \dot{\varphi}_{\Pi} + c_Y a^2 \varphi_{\Pi} = M_{1Z} + M_{2Z}, \quad (3)$$

где $J_{0z} = J_{\Pi z} + 2m_B r^2$ - общий момент инерции П;

$$M_{iz} = m_B \rho_B r [\mp \ddot{\varphi}_{Bi} \sin(\varphi_{Bi} - \varphi_{\Pi}) \pm \dot{\varphi}_{Bi}^2 \cos(\varphi_{Bi} - \varphi_{\Pi})], (i = 1, 2),$$

причем верхний знак из "+" "-" действителен для $i = 1$, а нижний знак для $i = 2$.

Уравнение поступательного движения платформы по оси X:

$$m_0 \ddot{x}_{\Pi} + b_X \dot{x}_{\Pi} + c_X x_{\Pi} = F_{1X} + F_{2X} + F_{3X}, \quad (4)$$

где c_X, b_X - поперечная (тангенциальная) жесткость и демпфирование ПВ;

$$F_{iX} = m_{Bi} \rho_B (\ddot{\varphi}_{Bi} \cos \varphi_{Bi} + \dot{\varphi}_{Bi}^2 \sin \varphi_{Bi}), (i = 1, 2, 3).$$

Уравнения движения дебалансных роторов:

$$J_i \ddot{\varphi}_{Bi} = M_{Di} - M_{Ci} - M_{Bi}, \quad (5)$$

где $J_i = J_{Bi} + m_B \rho_B^2$ - моменты инерции ДР, приведенные к валам двигателей; J_{Bi} - центральные моменты инерции ДР; M_{Di} - моменты приводных электродвигателей; M_{Ci} - моменты сопротивления ДР вследствие сухого и вязкого трения; $M_{Bi} = M_{BiZ}, (i = 1, 2)$ - гармонические моменты сопротивления ДР;

$$M_{BiZ} = m_B \rho_B [\ddot{y}_{\Pi} \sin \varphi_{Bi} + g \sin \varphi_{Bi} - r(\ddot{\varphi}_{\Pi} \sin(\varphi_{Bi} - \varphi_{\Pi}) - \dot{\varphi}_{\Pi}^2 \cos(\varphi_{Bi} - \varphi_{\Pi}))].$$

На основании уравнений (1)...(5) можно построить ДСС механической части трехроторной ВУ в координатных осях X, Y, Z с соответствующими движениями виброплатформы $x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}$ и φ_{Π} . Для обеспечения физической наглядности её необходимо представить в виде нескольких взаимосвязанных подсистем с выделением ДСС дебалансов и ДСС платформы по каждой из координат (рис.2).

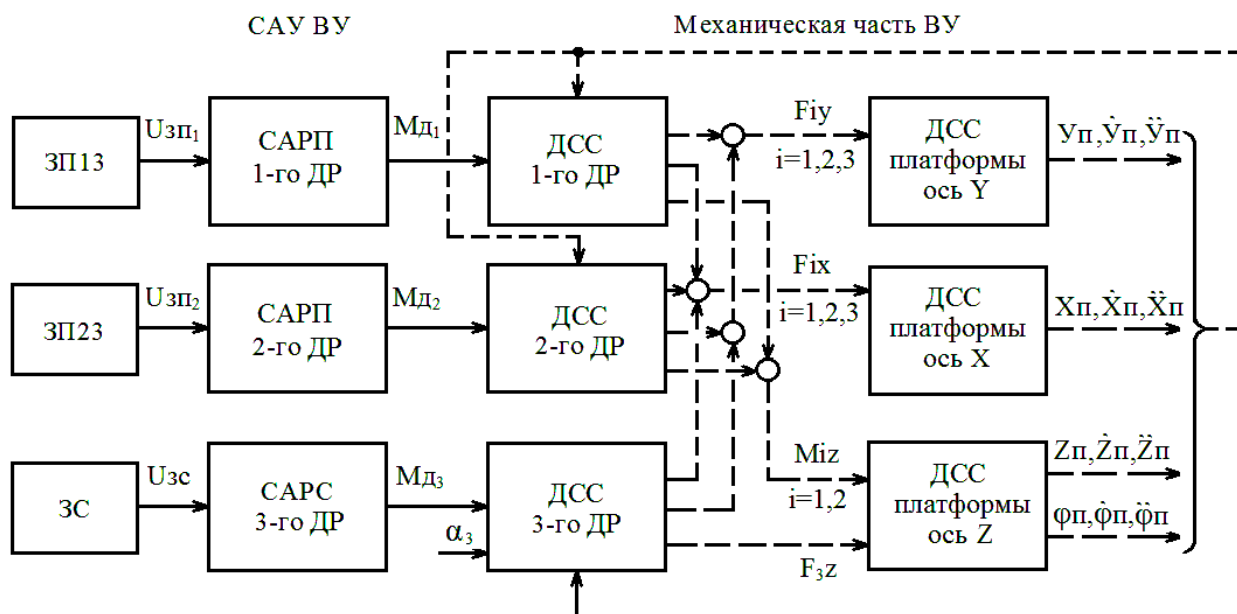


Рис. 2. Динамическая структурная схема трехроторной ВУ со средним поворотным ДР

2. Построение и оптимизация динамики взаимосвязанной ЭМС виброустановки

Для получения высокой точности и гибкости управления угловым рассогласованием роторов, они должны иметь индивидуальные электроприводы (ЭП) с двигателями постоянного тока или вентильными двигателями [11]. При выборе типа и способов оптимизации САУ следует ориентироваться на унифицированные структуры подчиненного регулирования, хорошо зарекомендовавшие себя в различных *системах ЭП (СЭП)* постоянного и переменного тока. При иерархическом управлении СЭП достоинства указанных систем проявляются в наибольшей степени при относительно простых алгоритмах управления. В качестве ведущего выбран 3-й (средний) ротор, регулируемый по скорости (САРС с контурами тока и скорости двигателя ДЗ). Ведомыми являются роторы 1 и 2, регулируемые по угловому положению θ_{13} и θ_{23} относительно ротора 3 (САРП1 и САРП2 с контурами тока, скорости и положения). ЗС, ЗП – задатчики скорости и положения ДР. Настройка регуляторов САРС и САРП выполняется в соответствии с разработанными рекомендациями [7]. Ведомые приводы должны иметь достаточное быстродействие контуров положения ($\omega_{CO} > \omega_{УП}$), что определяет выбор соответствующих настроек регуляторов. Регуляторы скорости должны обеспечивать подавление гармонического возмущения со стороны ДР. Для стабилизации параметров колебаний платформы следует ввести соответствующие контуры с регуляторами линейных (РЛК) и угловых (РУК) колебаний по координатам $y_{П}$ и $\varphi_{П}$. При этом РЛК воздействует на вход САРС, а РУК – на вход САРП, корректируя положение рабочей точки на резонансной характеристике ВУ или угловое рассогласование роторов соответственно.

3. Исследование квазиустановившихся режимов ВУ на имитационной модели

Компьютерная имитационная модель взаимосвязанной ЭМС ВУ является программной реализацией математической модели и формируется по структурной схеме, представленной на рис.2. Модели сепаратных ЭП созданы на основе системы дифференциальных уравнений электродинамики, учитывающих внутренние электромагнитные и электромеханические процессы для каждого двигателя [12]. Модели структурных подсистем механической части компонуются согласно дифференциальным уравнениям виброплатформы (1)...(4) и дебалансов (5) (уравнений Лагранжа 2-го рода, решенных относительно вторых производных обобщенных координат системы $x_{П}$, $y_{П}$, $z_{П}$, $\varphi_{П}$ для ДСС перемещений и углов поворота ДР $\varphi_{Б1}$, $\varphi_{Б2}$, $\varphi_{Б3}$ для ДСС роторов). Все уравнения представляются в операторной форме и реализуются с помощью визуального программирования в MATLAB при помощи стандартных блоков Simulink. Следует отметить, что структурное моделирование сложных (нелинейных) динамических систем является физически наглядным, достаточно гибким и дает возможность контролировать поведение ЭМС по нескольким координатам. Пространственные траектории движения формируются в модели как геометрическая сумма линейных и угловых перемещений виброплатформы и их производных.

Исследования квазиустановившихся режимов ВУ проводились на околорезонансной скорости роторов $\omega_{ДР} = (0,7...0,9)\omega_{УП}$ ($\omega_{УП}$ - частота свободных упругих колебаний платформы), где обеспечивается высокая управляемость механической системы. Вначале исследовались процессы генерирования плоскостных, а затем пространственных колебаний виброплатформы при $m_{Б1} = m_{Б2} = m_{Б}$ и $m_{Б3} = 2m_{Б}$.

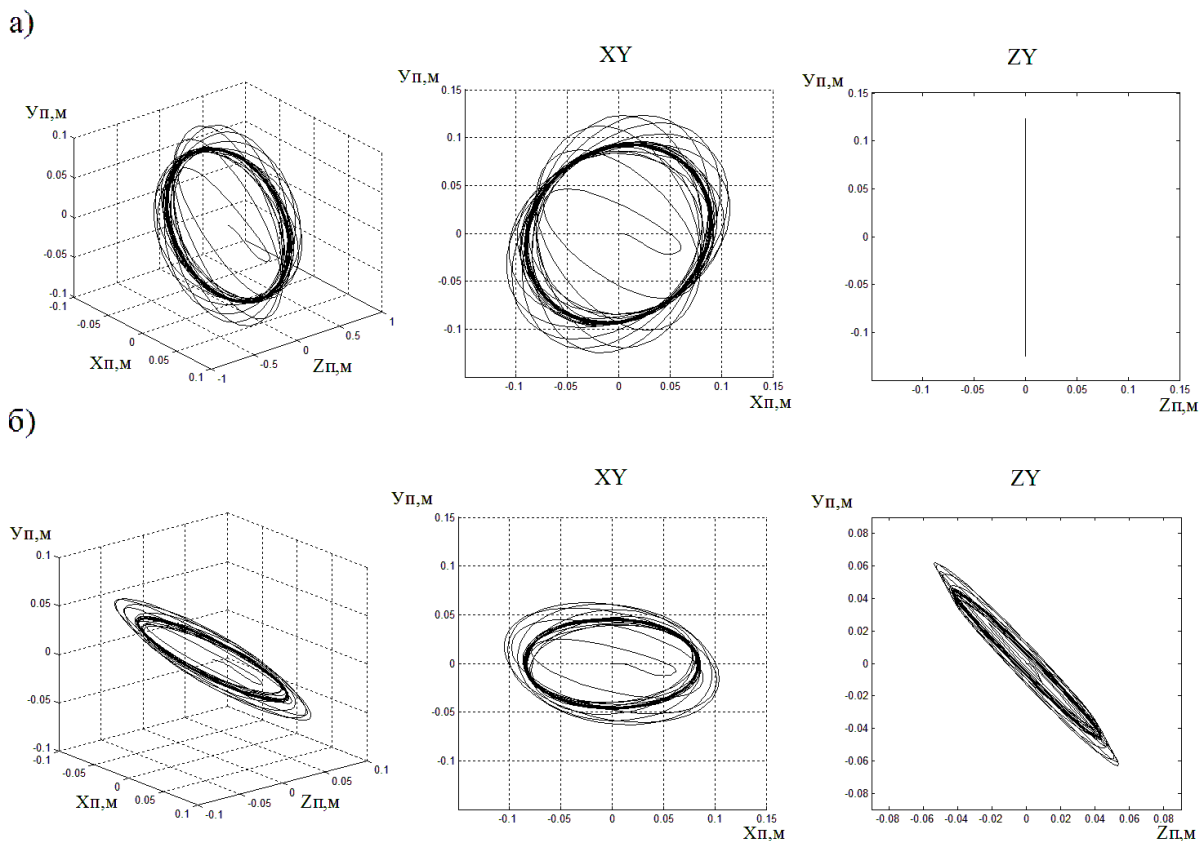


Рис. 3. Траектории движения платформы: а - при $\alpha_3 = 0^\circ$; $\theta_{13} = \theta_{23} = 0^\circ$;
 б – при $\alpha_3 = 90^\circ$; $\theta_{13} = \theta_{23} = 0^\circ$

При $\alpha_3 = 0^\circ$ платформа совершает колебания в плоскости XY с $y_{II \max}$ (рис.3,а). При $\alpha_3 = 90^\circ$ траектории движения платформы имеют наклон в плоскости ZY, равный 45° (рис.3,б). Следует отметить, что при указанном соотношении масс роторов угол наклона колебаний платформы $\beta_{II} = \frac{\alpha_3}{2}$.

Из результатов, представленных на рис.4 видно, что при $\theta_{13} = -90^\circ$, $\theta_{23} = 90^\circ$, т.е. при противофазном движении роторов 1 и 2 у платформы отсутствуют линейные колебания по оси Y, а имеются лишь угловые колебания φ_{II} относительно оси Z, что позволяет ДРЗ при $\alpha_3 = 90^\circ$ перевести движение платформы в плоскость XZ.

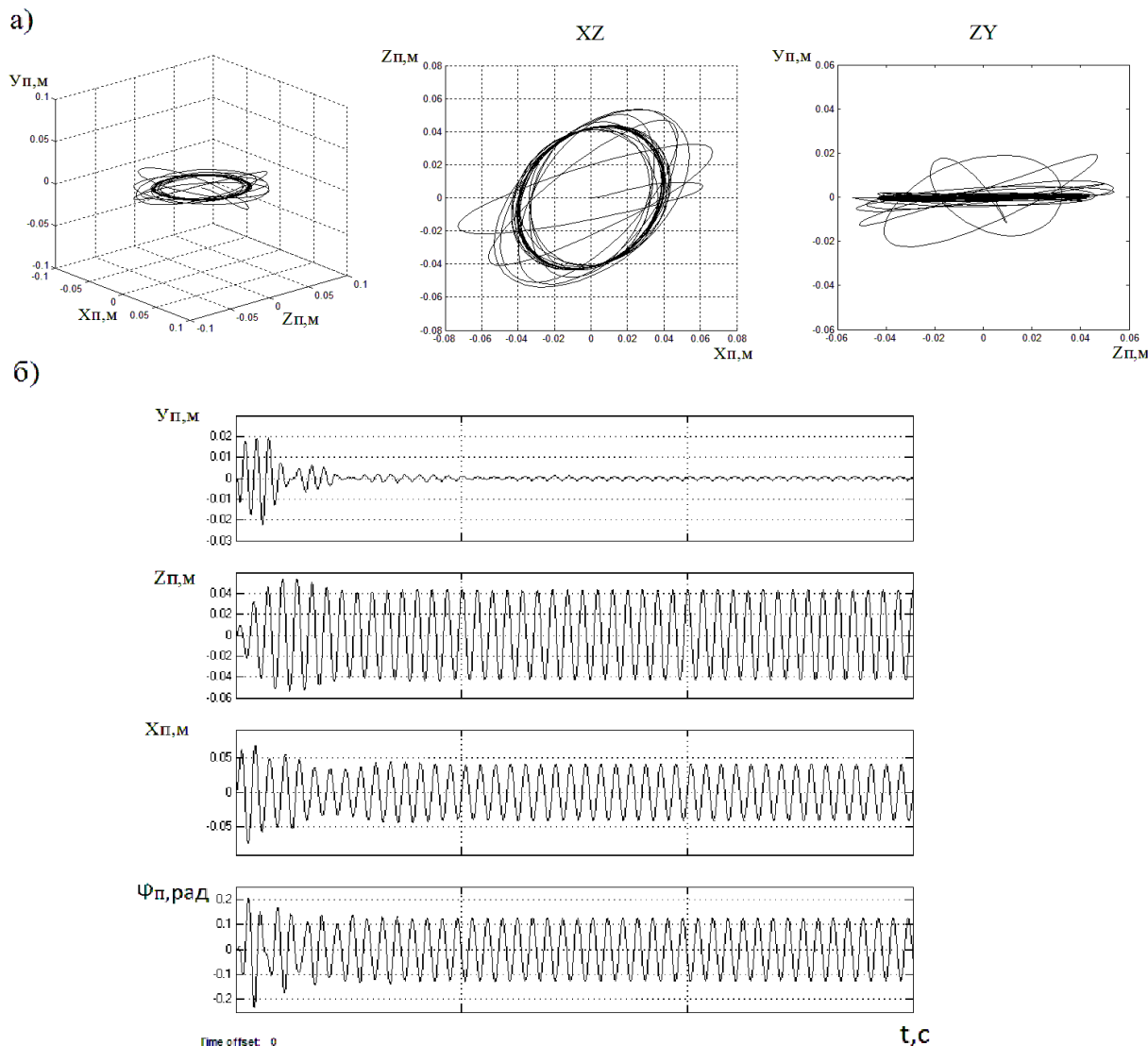


Рис. 4. Динамика виброустановки при противофазном движении роторов 1 и 2 ($\alpha_3 = 90^\circ$; $\theta_{13} = -90^\circ$, $\theta_{23} = 90^\circ$): а – фазовые траектории
 б – осциллограммы колебаний платформы

При $\alpha_3 = 0^\circ$; $\theta_{13} = \theta_{23} = 180^\circ$ роторы 1 и 2 находятся в противофазе к ДРЗ, что обуславливает отсутствие колебаний платформы.

Таким образом, совокупность генерируемых линейных и угловых перемещений при изменении угла наклона α_3 оси вращения ДРЗ и одновременном регулировании фазового рассогласования θ_{13} и θ_{23} позволяет получить управляемые пространственные траектории движения платформы.

Вывод: При разработке многороторных вибрационных установок, представляющих собой сложные электромеханотронные системы, наиболее эффективными для анализа, синтеза и многофакторных компьютерных исследований ЭМС являются структурированные динамические модели. Проведенные исследования показали, что трехроторная виброустановка со средним поворотным ротором при введении системы автоматического управления может обеспечить заданное множество регулируемых плоскостных и пространственных траекторий движения рабочего органа (платформы). Таким образом,

предлагаемая конфигурация вибросистемы реализует значительную часть спектра генерируемых колебаний четырех- и шестироторных вибрационных установок, обладая сравнительно более простой структурой механической части и системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавендел Э.Э. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти томах. – М.: Машиностроение, 1978. Т.4. – 544с.
2. Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. – М.: Наука, 1984. – 351 с.
3. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
4. Управление мехатронными вибрационными установками / Б.Р.Андриевский [и др.]; под ред. И.И. Блехмана и А.Л. Фрадкова. – СПб.: Наука, 2001. – 278 с.
5. Водовозов В.М. Теория и системы электропривода: Учебное пособие. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 306с.
6. Белов М.П. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. – М.: Академия, 2006. – 368с.
7. Шестаков В.М. Динамика взаимосвязанных электромеханических систем многороторных вибрационных установок / В.М. Шестаков, А.Е. Епишкин, В.А. Шаряков. – СПб.: СПбГПУ, 2009. –108с.
8. Шестаков В.М., Епишкин А.Е. Построение взаимосвязанной электромеханической системы шестироторной вибрационной установки // Электричество. 2009. №9. с.55-60.
9. Епишкин А.Е., Шестаков В.М. Взаимосвязанные электромеханические системы четырехроторных вибрационных установок // Электричество. 2011. №2. с.64-68.
10. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Прогресс, 2008. – 784с.
11. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 265с.
12. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона.Век, 2008. – 368с.

Рецензент: Поляхов Николай Дмитриевич, профессор кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

REFERENCES

1. Lavendel Je.Je. Vibracii v tehnike. Spravochnik. V 6-ti tomah. – M.: Mashinostroenie, 1978. T.4. – 544s.
2. Vejc V.L., Kolovskij M.Z., Kochura A.E. Dinamika upravljaemyh mashinnyh agregatov. – M.: Nauka, 1984. – 351 s.
3. Blehman I.I. Vibracionnaja mehanika. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400 s.
4. Upravlenie mehatronnymi vibracionnymi ustanovkami / B.R.Andrievskij [i dr.]; pod red. I.I. Blehmana i A.L. Fradkova. – SPb.: Nauka, 2001. – 278 s.
5. Vodovozov V.M. Teorija i sistemy jelektroprivoda: Uchebnoe posobie. – SPb.: SPbGJeTU «LJeTI», 2004. – 306s.
6. Belov M.P. Inzhiniring jelektroprivodov i sistem avtomatizacii. – M.: Akademija, 2006. – 368s.
7. Shestakov V.M. Dinamika vzaimosvjazannyh jelektromehaničeskikh system mnogorotornyh vibracionnyh ustanovok / V.M. Shestakov, A.E. Epishkin, V.A. Sharjakov. – SPb.: SPbGPU, 2009. –108s.
8. Shestakov V.M., Epishkin A.E. Postroenie vzaimosvjazannoje jelektromehaničeskoje sistemy shestirotnoj vibracionnoj ustanovki // Jelektrichestvo. 2009. №9. s.55-60.
9. Epishkin A.E., Shestakov V.M. Vzaimosvjazannye jelektromehaničeskie sistemy četyrehrotornyh vibracionnyh ustanovok // Jelektrichestvo. 2011. №2. s.64-68.
10. D'jakonov V. P. Simulink 5/6/7: Samouchitel'. – M.: DMK-Progress, 2008. – 784s.
11. Sokolovskij G.G. Jelektroprivody peremennogo toka s častotnym regulirovaniem. – M.: Akademija, 2006. – 265s.
12. German-Galkin S.G. Matlab&Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. – SPb.: Korona.Vek, 2008. – 368s.