



УДК 681.5

© 2020 г. **Д.А. Томчин**, канд. техн. наук

(Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург),

**Н.В. Гуков,**

**А.А. Нерсисян**

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет),

**Т.А. Свенцицкая**, канд. физ.-мат. наук

(Военно-космическая Академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург)

## УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ РОТОРОВ ДВУХРОТОРНОЙ ВИБРОУСТАНОВКИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Исследуется динамика системы управления синхронизацией роторов двухроторной виброустановки, предназначенной для просеивания сыпучих материалов. С помощью компьютерного моделирования в программной среде MATLAB показано, что предлагаемый алгоритм адаптивного управления обеспечивает стабильный синхронный режим при стохастической нагрузке.

**Ключевые слова:** двухроторная виброустановка, алгоритм управления, стохастическая нагрузка, компьютерное моделирование.

DOI: 10.22250/isu.2020.66.49-59

### Введение

Одной из важных проблем, возникающих при работе двухроторных вибрационных установок, является проблема синхронизации угловых положений дебалансов, а соответственно и достижение требуемых параметров вибрационных колебаний.

Для исследования динамики двухроторных вибрационных установок типа “Грохот” был создан вибрационный стенд СВ-1 [1]. Данный стенд оснащен двумя дебалансными вибровозбудителями, укрепленными на платформе, которая установлена на упругих элементах. Стенд позволяет проводить эксперименты по исследованию эффективности алгоритмов управления

различными режимами работы виброустановки: режимом пуска, прохождением через резонансные частоты, режимом кратной синхронизации роторов. При этом можно оценивать влияние таких факторов как динамика системы электроприводов, влияние нестационарности массы сыпучего материала, просеиваемого с помощью виброустановки и т.д.

Эффективность алгоритмов управления оценивалась в работах [2 – 4] с помощью компьютерного моделирования, проводимого в программной среде MATLAB для различных математических моделей, описывающих динамику стенда, в том числе и с учетом массы сыпучего материала, просеиваемого виброустановкой. Так, в работе [2] исследовалась динамика стенда при различных значениях массы груза, но в предположении, что груз в каждом отдельном компьютерном эксперименте постоянен; каждый раз при моделировании определялись частоты верхнего и нижнего резонансов, которые далее сравнивались с экспериментальными данными, полученными на стенде. В работе [3] исследовалась упрощенная модель динамики стенда, в которой учитывалось лишь перемещение несущей платформы вдоль вертикальной оси и работоспособность алгоритма синхронизации. Предполагалось, что нестационарная масса груза изменяется равномерно с постоянной скоростью. Это соответствует предположению об однородности частиц просеиваемого материала, – например, при грохочении песка. В работе [4] проводилось исследование вида вибрационного поля в зависимости от параметров алгоритма управления синхронизацией. Рассматривался алгоритм двукратной синхронизации и варьировался заданный приведенный сдвиг фаз роторов и масса присоединенного груза  $m_r$ , которая в процессе одной реализации не изменялась. Алгоритмы управления синхронизацией [5], разработанные для обеспечения стабильного синхронного режима, базируются на информации о положениях дебалансов и платформы. Положения указанных элементов могут быть измерены с помощью датчиков, установленных на вибростенде.

В данной статье рассматривается модель динамики нестационарной виброустановки со стохастической нагрузкой, совершающей движение в вертикальной плоскости и управляемой с помощью алгоритма синхронизации движения роторов. Такая модель имеет место при неоднородном просеиваемом или вибротранспортируемом материале, – таком, например, как смесь песка и гравия, когда масса присоединенного груза является переменной и изменяется по заранее непредсказуемому стохастическому закону. При этом характеристики просеиваемого материала, который рассматривается как дополнительная упруго-присоединенная точечная масса, не измеряются. Поэтому при синтезе алгоритмов управления целесообразно упростить (ре-

дуцировать) расчет управляющих сигналов таким образом, чтобы информация о параметрах груза не требовала измерения.

В работе проводится компьютерное исследование с использованием программной среды MATLAB для определения эффективности синтезированного алгоритма синхронизации при стохастически изменяющихся скоростях нагружения виброустановки.

## 1. Модель динамики двухроторной виброустановки, осуществляющей движение в вертикальной плоскости

В работе рассматривается двухроторная вибрационная установка, описанная в работе [2], общий вид и схема механической части которой также представлены в указанной работе. Платформа стенда связана с системой координат  $0'x'y'$ . Точка  $0'$  с координатами  $\{x_c, y_c\}$  является центром масс платформы, которая установлена на пружинах. Абсциссы прикрепления пружин  $x_{pi} = \pm a$ ,  $\varphi$  – угол поворота платформы в вертикальной плоскости  $Oxy$ , отсчитываемый против часовой стрелки. Масса груза  $m_r(t)$  переменная, центром масс принимается точка  $\{x_r, y_r\}$ . Симметричные дебалансные роторы находятся на оси абсцисс на расстоянии  $r$  от центра  $0$ ,  $\varphi_1, \varphi_2$  – углы отклонения дебалансов от горизонтальной оси. Уравнения динамики двухроторного вибрационного стенда имеют вид [2]:

$$\begin{aligned}
& m_0 \ddot{x}_c - m\rho[\sin(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_2)]\ddot{\varphi} - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1)\ddot{\varphi}_1 - \\
& \quad - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2)\ddot{\varphi}_2 - m\rho[\cos(\varphi + \varphi_1) + \cos(\varphi + \varphi_2)]\dot{\varphi}^2 - \\
& \quad - m\rho \cos(\varphi + \varphi_1)\dot{\varphi}_1^2 - m\rho \cos(\varphi + \varphi_2)\dot{\varphi}_2^2 - 2m\rho \cos(\varphi + \varphi_1)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1 - \\
& \quad - 2m\rho \cos(\varphi + \varphi_2)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_2 + \beta\dot{x}_c + 2c_{01} + c_{11}(x_c - x_r) = 0; \\
& m_0 \ddot{y}_c + m\rho[\sin(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_2)]\ddot{\varphi} + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1)\dot{\varphi}_1 + \\
& \quad + m\rho \cos(\varphi + \varphi_2)\dot{\varphi}_2 - m\rho[\sin(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_2)]\dot{\varphi}^2 - \\
& \quad - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1)\dot{\varphi}_1^2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2)\dot{\varphi}_2^2 - 2m\rho \sin(\varphi + \varphi_1)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1 - \\
& \quad - 2m\rho \sin(\varphi + \varphi_2)\dot{\varphi}\dot{\varphi}_2 + m_0 g + 2c_{02}y_c + \beta\dot{y}_c + c_{12}(y_c - y_r) = 0; \\
& - m\rho[\sin(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_2)]\ddot{x}_c + m\rho[\cos(\varphi + \varphi_1) + \cos(\varphi + \varphi_2)]\ddot{y}_c + \\
& \quad + [J + J_1 + J_2 - 2m\rho r(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)]\ddot{\varphi} + \\
& \quad + [J_1 - m\rho r \cos \varphi_1]\ddot{\varphi}_1 + [J_2 - m\rho r \cos \varphi_2]\ddot{\varphi}_2 + \\
& \quad + m\rho g[\cos(\varphi + \varphi_1) + \cos(\varphi + \varphi_2)] + c_{03} \cdot \varphi + \beta \cdot \dot{\varphi} = 0; \\
& J_1 \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_1)\ddot{x}_c + m\rho \cos(\varphi + \varphi_1)\ddot{y}_c + [J_1 - m\rho r \cos \varphi_1]\ddot{\varphi} - \\
& \quad - m\rho r \sin \varphi_1 \cdot \dot{\varphi}^2 + m\rho g \cos(\varphi + \varphi_1) + k_c \dot{\varphi}_1 = M_1; \\
& J_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin(\varphi + \varphi_2)\ddot{x}_c + m\rho \cos(\varphi + \varphi_2)\ddot{y}_c + [J_2 - m\rho r \cos \varphi_2]\ddot{\varphi} - \\
& \quad - m\rho r \sin \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}^2 + m\rho g \cos(\varphi + \varphi_2) + k_c \dot{\varphi}_2 = M_2,
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $m_0 = m_{\text{пл}} + 2m$ ;  $J_i = m\rho^2 + J_{ci}$ ;  $m_i = m$ ,  $\rho_i = \rho$  – масса и эксцентриситет  $i$ -го ротора;  $i = 1, 2$ ;  $m_{\text{пл}}$  – масса платформы;  $c_{0i}$  эквивалентные жесткости пружин, на которых установлена платформа,  $i = 1, 2$ ;  $c_{03} = -2a^2(c_{02} - c_{01})$ ,  $c_{11}$  и  $c_{12}$  – горизонтальная и вертикальная жесткости пружин, соединяющих платформу виброустановки с лотком, на который поступает сыпучий материал. В модели не учитывается скручивание пружин.

Добавим в систему дифференциальные уравнения динамики нестационарного груза

$$\begin{aligned} m_{\Gamma} \ddot{x}_{\Gamma} - c_{11}(x_c - x_{\Gamma}) + \dot{m}_{\Gamma} \dot{x}_{\Gamma} + \beta \dot{x}_{\Gamma} &= F_x; \\ m_{\Gamma} \ddot{y}_{\Gamma} + \dot{m}_{\Gamma} \dot{y}_{\Gamma} + m_{\Gamma} g - c_{12}(y_c - y_{\Gamma}) + \beta \dot{y}_{\Gamma} &= F_y, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_x$ ,  $F_y$  – проекции на оси  $0x$  и  $0y$  соответственно результирующей внешних сил  $F$ , действующих на груз, и обусловленной скоростью и массой просеиваемого материала, ссыпающегося с разгрузочного конца установки;  $\beta$  – демпфирование в пружинах;  $M_1$ ,  $M_2$  – управляющие электромеханические моменты.

Данные уравнения динамики получены как уравнения Лагранжа второго рода на основании выражений для кинетической  $T$  и потенциальной  $\Pi$  энергии станда, рассчитанных с учетом энергии груза с переменной массой  $m_{\Gamma}(t)$ :

$$\begin{aligned} T = 0,5m_0 \dot{x}_c^2 + 0,5m_0 \dot{y}_c^2 + 0,5\dot{x}_{\Gamma}^2 m_0 + 0,5\dot{y}_{\Gamma}^2 m_0 + 0,5J\dot{\varphi}^2 + \\ + \dot{\varphi}^2 \sum_{i=1}^2 m r_i \rho \cos \varphi_i + 0,5 \sum_{i=1}^2 J_i \dot{\varphi}_i^2 + \dot{\varphi} \sum_{i=1}^2 J_i \dot{\varphi}_i + \\ + \sum_{i=1}^2 [\dot{\varphi} \dot{\varphi}_i m r_i \rho \cos \varphi_i - \dot{x}_c \dot{\varphi} m r_i \sin \varphi - \dot{x}_c \dot{\varphi} m \rho \sin(\varphi + \varphi_i) - \\ - \dot{x}_c \dot{\varphi}_i m \rho \sin(\varphi + \varphi_i) + \dot{y}_c \dot{\varphi} m r_i \cos \varphi + \dot{y}_c \dot{\varphi} m \rho \cos(\varphi + \varphi_i) + \\ + \dot{y}_c \dot{\varphi}_i m \rho \cos(\varphi + \varphi_i)]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Pi = (m_{\text{пл}} + 2m)g y_c + m \rho g [\sin(\varphi + \varphi_1) + \sin(\varphi + \varphi_2)] + \\ + c_{01}(x_c^2 + a^2 \cos^2 \varphi) + c_{02}(y_c^2 + a^2 \sin^2 \varphi) + \\ + m_{\Gamma} g y_c + \frac{1}{2} c_{11}(x_c - x_{\Gamma})^2 + \frac{1}{2} c_{12}(y_c - y_{\Gamma})^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r_1 = -r$ ;  $r_2 = r$ .

Пусть  $H$  – полная механическая энергию станда, тогда  $H = T + \Pi$ .

Структура электрической части привода выбрана как традиционная одноконтурная система с контуром тока, включающим ПИ-регулятор. Контур скорости не рассматривается, поскольку датчики скорости в указанном станде не предусмотрены.

Тогда дифференциальные уравнения, описывающие динамику  $i$ -го электропривода, будут следующими [2]:

$$\begin{aligned}
\frac{dI_{яi}}{dt} &= \frac{1}{T_{яi}}(-I_{яi}(t) + \frac{1}{R_{яцi}}(E_{пi}(t) - E_{дi}(t))); \\
\frac{dE_{пi}}{dt} &= \frac{1}{T_{пi}}(-E_{пi}(t) + k_{пi}U_{ргi}(t)); \\
\frac{d}{dt}U_{ргi}(t) &= \frac{\beta_i}{\tau_i}(U_i(t) - U_{дгi}(t)); \\
\frac{d}{dt}U_{дгi}(t) &= \frac{1}{T_{дгi}}(-U_{дгi}(t) + k_{отi}I_{яi}),
\end{aligned}
\tag{5}$$

где  $I_{яi}$  – ток якоря;  $E_{пi}$ ,  $E_{дi}$  – ЭДС преобразователя и двигателя;  $k_{пi}$ ,  $k_{отi}$  – коэффициенты усиления преобразователей и обратной связи по току;  $T_{пi}$ ,  $T_{дгi}$  – постоянные времени преобразователя и датчика тока;  $T_{яi}$  – постоянная времени якоря;  $R_{яцi}$  – сопротивление якорной цепи;  $\beta_i$ ,  $\tau_i$  – динамический коэффициент усиления и постоянная времени РТ<sub>*i*</sub>;  $U_{ргi}$ ,  $U_{дгi}$  – выходные напряжения регулятора тока и датчика тока;  $U_i$  – напряжение, соответствующее значению момента  $M_i$ , поступающему с задающего устройства;  $i = 1, 2$ .

## 2. Синтез алгоритмов синхронизации дебалансов для двухроторной виброустановки

В работах [3, 4], посвященных исследованию алгоритма синхронизации для двухроторной вибрационной установки с учетом нестационарной нагрузки, рассматривался алгоритм управления пропорционального типа. Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента, частными случаями которых являются пропорциональные, интегральные и пропорционально-интегральные алгоритмы скоростного градиента, описываются в работе [5]. В этой же работе синтезируются интегро-дифференцирующие алгоритмы управления кратной синхронизацией для вибрационной установки. Однако модель динамики виброустановки, рассматриваемая в [5], не учитывает влияние упруго-присоединенного груза, моделирующего массу просеиваемого сыпучего материала.

В данной работе для синхронизации применяется пропорционально-интегральный алгоритм скоростного градиента, синтезированный для модели виброустановки с учетом нестационарной нагрузки.

При синтезе прежде всего выбирается целевой функционал [6], минимальное значение которого соответствует достижению желаемой цели управления. В качестве цели управления выбирается достижение роторами заданных средних скоростей вращения и их синхронное движение [5]. Первое требование удобно заменить на этапе синтеза требованием достижения

заданной полной механической энергии  $H^*$ , соответствующей движению роторов с желаемыми средними скоростями. Таким образом, целевую функцию выбираем в виде:

$$Q(z) = 0,5 \left[ (1 - \alpha)(H - H^*)^2 + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\varphi}_2)^2 \right], \quad (6)$$

где  $z = [x, \dot{x}, y, \dot{y}, \varphi, \dot{\varphi}, \varphi_1, \dot{\varphi}_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_2, x_{\Gamma}, \dot{x}_{\Gamma}, y_{\Gamma}, \dot{y}_{\Gamma}]^T$  – вектор состояния системы;  $\alpha : 0 < \alpha < 1$  – весовой коэффициент;  $H^*$  – заданное значение полной механической энергии системы.

При достижении цели управления  $Q(z) = 0$  получим  $H = H^*$  и равные скорости  $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2$ .

В соответствии со схемой скоростного градиента получаем уравнения для расчета управляющих моментов по пропорционально-интегральному закону зад:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 \left[ (1 - \alpha)(H - H^*)\dot{\varphi}_1 + \frac{\alpha}{J_1}(\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\varphi}_2) + \frac{\alpha}{J_1}(\varphi_1 \pm \varphi_2 + \Delta\varphi_{\text{зад1}}) \right], \\ M_2 = -\gamma_2 \left[ (1 - \alpha)(H - H^*)\dot{\varphi}_2 + \frac{\alpha}{J_2}(\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\varphi}_2) + \frac{\alpha}{J_2}(\varphi_1 \pm \varphi_2 + \Delta\varphi_{\text{зад2}}) \right], \end{cases} \quad (7)$$

где слагаемые  $\Delta\varphi_{\text{зад}}$  – постоянные интегрирования.

Поскольку выражение для полной механической энергии  $H$  имеет довольно громоздкий вид, целесообразно его редуцировать (сократить) для упрощения расчета величин управляющих моментов. При этом правомерность такого упрощения будет исследоваться с помощью компьютерного моделирования. Необходимость упрощения диктуется имеющимися датчиками и другими возможностями для восстановления других координат, в частности параметров груза. В работе [7] рассматривались возможности управления синхронизацией для модели двухроторной ВУ без груза при неполном измерении вектора состояния. В частности, была показана возможность эффективного управления при отсутствии информации об угле поворота платформы  $\varphi$ . Поэтому допустимо упростить выражение для полной энергии, положив  $\varphi = 0$ . Тогда в редуцированном алгоритме можно использовать выражение для энергии следующего вида:

$$\begin{aligned} \tilde{H} &= \tilde{T} + \tilde{П}. \\ \tilde{H} &= 0,5m_0\dot{x}_c^2 + 0,5m_0\dot{y}_c^2 + 0,5J_1\dot{\varphi}_1^2 + 0,5J_2\dot{\varphi}_2^2 - m\rho \sin \varphi_1 \dot{x}_c \dot{\varphi}_1 + \\ &+ m\rho \cos \varphi_2 y_c \dot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_2 \dot{x}_c \dot{\varphi}_2 + m\rho \cos \varphi_1 y_c \dot{\varphi}_1 + 0,5m_{\Gamma}\dot{x}_{\Gamma}^2 + \\ &+ 0,5m_{\Gamma}\dot{y}_{\Gamma}^2 + m_0 g y_c + m\rho [\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2] + c_{01}(x_c^2 + a^2) + c_{02}y_c^2 + \\ &+ m_{\Gamma} g y_{\Gamma} + 0,5c_{11}(x_c - x_{\Gamma})^2 + 0,5c_{12}(y_c - y_{\Gamma})^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Однако расчет механической энергии по указанной формуле при управлении СВ-1 невозможен, поскольку на стенде отсутствуют датчики положения груза. Поэтому слагаемые, соответствующие кинетической и потенциальной энергии груза, из выражения для механической энергии на этапе синтеза алгоритма управления исключаются.

$$\begin{aligned} \bar{H} = & 0,5m_0\dot{x}_c^2 + 0,5m_0\dot{y}_c^2 + 0,5J_1\dot{\varphi}_1^2 + 0,5J_2\dot{\varphi}_2^2 - m\rho \sin \varphi_1 \dot{x}_c \dot{\varphi}_1 + \\ & + m\rho \sin \varphi_2 \dot{y}_c \dot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_2 \dot{x}_c \dot{\varphi}_2 + m\rho \sin \varphi_1 \dot{y}_c \dot{\varphi}_1 + \\ & + m_0gy_c + m\rho g(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) + c_{01}(x_c^2 + a^2) + c_{02}y_c^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Предполагается, что данное упрощение слабо повлияет на динамику замкнутой системы в силу робастных свойств алгоритмов скоростного градиента. Обоснованность упрощения и исследование работоспособности системы проводится с помощью компьютерного моделирования. Окончательно управляющие электромеханические моменты рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} M_1 = -\gamma_1 \left[ (1 - \alpha)(\bar{H} - H^*)\dot{\varphi}_1 + \frac{\alpha}{J_1}(\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\varphi}_2) + \frac{\alpha}{J_1}(\varphi_1 \pm \varphi_2 + \Delta\varphi_{зад1}) \right], \\ M_2 = -\gamma_2 \left[ (1 - \alpha)(\bar{H} - H^*)\dot{\varphi}_2 + \frac{\alpha}{J_2}(\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\varphi}_2) + \frac{\alpha}{J_2}(\varphi_1 \pm \varphi_2 + \Delta\varphi_{зад2}) \right]. \end{cases} \quad (10)$$

### 3. Результаты компьютерного моделирования при стохастическом характере изменения массы груза

В разделе приведены результаты исследования эффективности редуцированного алгоритма синхронизации (10) при синфазном вращении роторов для виброустановки с переменной нагрузкой, которые были получены при моделировании системы (1), (2), (5) в программной среде MATLAB. Предполагаем, что нагружение начинается не в момент пуска виброустановки, а после выхода установки на рабочий режим в момент времени  $t_1$ , которое больше, чем время первоначальной синхронизации роторов. Масса нагружаемого сыпучего материала (груза) изменяется по стохастическому закону, начиная с момента  $t_1$ . До этого момента масса груза постоянна (соответствует массе загружаемого лотка). Нагрузка рассматривается как упруго-присоединенная точечная масса. Во время исследования анализировалась стабильность синхронного режима в зависимости от средней скорости нагружения и установившейся средней массы груза. При моделировании предполагалось, что в момент времени  $t_2$  среднее количество насыпаемого сыпучего материала приблизительно равно количеству материала, убывающего с сита. В связи с тем, что в этом исследовании частицы материала неоднородны по массе, график массы присоединенного груза в период времени

$t > t_2$  способен значительно изменяться, но никак не может быть меньше массы лотка. Редуцированное выражение для полной энергии  $\bar{H}$  (9) дает возможность осуществлять расчеты управляющих моментов на основе информации о положении платформы, а также о положениях и скоростях роторов, которая поступает от датчиков, установленных на стенде. Информация о скорости платформы может быть получена с помощью наблюдателя, аналогичного описанному в работе [8]. Таким образом, алгоритм синхронизации (10) можно реализовать практически.

Программное изменение  $m_r$  реализуется при помощи изменения скорости нагружения  $V = V_0 + \Delta V$ , где  $V_0$  – постоянная составляющая скорости нагружения (средняя скорость нагружения), а  $\Delta V$  – стохастическая составляющая этой скорости. Максимальная величина случайной составляющей скорости нагружения варьирует в различных экспериментах в пределах от  $(0,05-0,1) \cdot V_0$ , кг/с. В программе  $\Delta V$  моделируется с помощью оператора rand как случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[-1; 1]$ . Результаты моделирования представлены в таблице и на рис. 1, 2 (при  $V_0 = 1$  кг/с).

Средняя скорость нагружения $V_0$ , кг/с	Стохастическая составляющая $\Delta V$ , %	Промежуток нагружения $(t_1, t_2)$ , с	Начальная масса груза $m_r(0)$ , кг (масса лотка)	Время синхронизации $t_{\text{син}}$ , с	Примечание	
0,4	5	$t_1 = 5, t_2 = 9$	1	3,2	При указанных исходных данных режим синхронизации не нарушается при нагружении	
0,6				3,3		
0,8				3,3		
1,0				3,3		
0,4	10			3,4		
0,6				3,3		
0,8				3,4		
1,0				3,4		
0,4	5	$t_1 = 5, t_2 = 9$	1,3	5,7		При указанных исходных данных режим синхронизации при нагружении устанавливается вновь
0,6				6,6		
0,8				6,7		
1,0				6,2		
0,4	10			6,8		
0,6				6,7		
0,8				6,3		
1,0				6,5		

В таблице рассматривается масса лотка  $m_r = 1$  кг и  $m_r = 1,3$  кг, это обуславливает различную среднюю установившуюся массу груза. Средние скорости нагружения  $V_0$  варьировали от 0,4 кг/с до 1 кг/с. В графе  $\Delta V$  представлены возможные максимальные амплитуды случайной составляющей для скорости вращения груза  $\Delta V$ , выраженные в процентах от составляющей  $V_0$ . Время синхронизации  $t_{\text{син}}$  – время входа сдвига фаз  $\Delta\varphi$  в пятипроцентную зону от своего установившегося значения. Параметры алгоритма управления имели следующие значения:  $\gamma_1 = 0,1$ ;  $\gamma_2 = 0,1$ ;  $\alpha = 0,2$ ;  $H^* = 300$  Дж.



На рис. 1 представлены графики изменения координат платформы и груза при нагружении после момента пуска при массе лотка  $m_r(0) = 1$  кг. Как видно из графиков, алгоритм управления обеспечивает как частотную синхронизацию  $|\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2| < \varepsilon$ ,  $\varepsilon > 0$ , так и координатную синхронизацию  $|\phi_1 - \phi_2| < \varepsilon_1$ . Здесь  $\dot{\phi}_i = \omega_i$  – угловые скорости роторов. Причем для данного случая изменение массы груза не приводит к потере синхронизации при начале нагружения. Как видно из графика изменения массы груза, начиная с момента времени  $t_2$ , его величина изменяется в окрестности некоторого среднего значения по случайному закону, что соответствует предположению о неоднородности просеиваемого сыпучего материала. Как видно из таблиц и графиков, результирующая масса присоединенного груза  $m_r$  меняется в пределах от 1 кг до 6 кг.

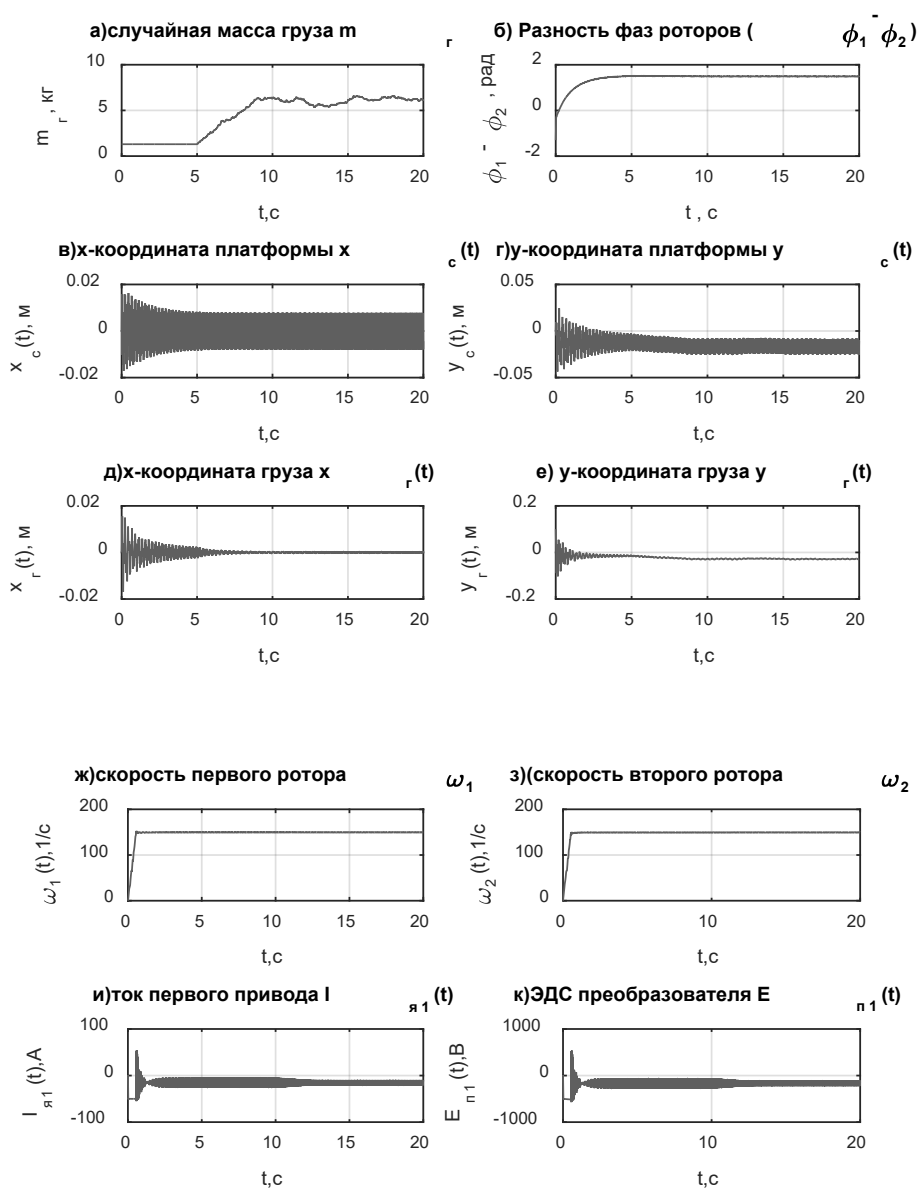


Рис. 1. Графики изменения основных переменных электромеханической системы виброустановки при массе груза  $m_r(0) = 1$  кг.

На рис. 2 представлены графики изменения массы груза и разности фаз роторов при  $m_r(0) = 1,3$  кг. Как видно из таблицы с результатами моделирования при стохастическом изменении массы груза, синхронный режим при данном увеличении массы нагрузки также практически остается неизменным.

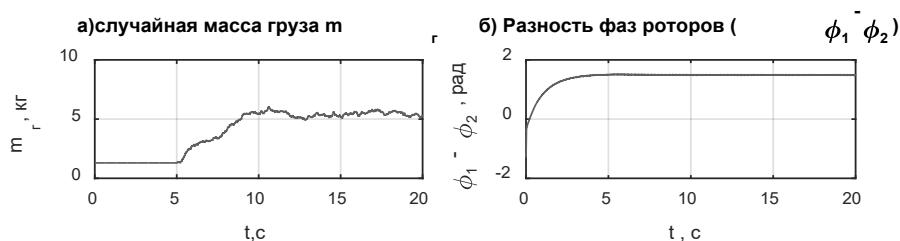


Рис. 2. Графики изменения основных переменных электромеханической системы виброустановки при массе груза  $m_r(0) = 1,3$  кг.

### Заключение

Представленные результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что алгоритм синхронизации (10), в котором используется упрощенное выражение для расчета энергии  $\bar{H}$ , не учитывающее динамику упруго-присоединенного груза, обеспечивает стабильный синхронный режим. Таким образом, предлагаемый подход к реализации управления с помощью адаптивных алгоритмов скоростного градиента, в которых производится упрощение выражения для полной механической энергии, позволяет отказаться от установки датчиков для измерения параметров груза и обеспечивает достижение цели управления и поддержание стабильного синхронного режима при стохастической нагрузке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Управление мехатронными вибрационными установками / И.И. Блехман, А.Л. Фрадкова и др. – СПб.: Наука, 2001. – 278 с.
2. Томчина О.П., Горлатов Д.В., Белов Ф.А. Комплекс моделей многороторных вибрационных установок: от модели к эксперименту // Информатика и системы управления. – 2017. – № 2 (52). – С. 25-36.
3. Кудрявцева И.М., Томчина О.П. Алгоритм кратной синхронизации для двухроторного вибрационного стенда с нестационарной нагрузкой // Информатика и системы управления. – 2009. – № 3 (21). – С. 34-44.
4. Томчина О.П., Галицкая В.А. Кратная синхронизация роторов с регулировкой приведенного сдвига фаз для двухроторной виброустановки с переменной нагрузкой // 7-й научно-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление" МАУ-2010 – СПб., 2010. – С. 392-395.
5. Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок / А.Л. Фрадков, О.П. Томчина, В.А. Галиц-

- кая, Д.В. Горлатов // Научно–технический вестник ИТМО. – 2013. – № 1 (83). – С. 30-37.
6. *Фрадков А.Л.* Кибернетическая физика. – СПб.: Наука, 2003. – 207с.
  7. *Томчина О.П., Горлатов Д.В., Томчин Д.А., Свенцицкая Т.А.* Управление двухроторной вибрационной установкой при неполном измерении вектора состояния // Информатика и системы управления. – 2019. – № 4 (62). – С. 110-119.
  8. *Fradkov A.L., Tomchina O.P., Tomchin D.A., Gorlatov D.V.* Time-varying observer of the supporting body velocity for vibration units // IFAC 6-th IFAC Workshop on Periodic Control Systems PSYCO. – Austria, 2016. – № 49 (14). – P. 18-23.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.*

*E-mail:*

*Томчин Дмитрий Александрович – dtomchin@yandex.ru;*  
*Свенцицкая Татьяна Алексеевна – sventsitskaya@mail.ru;*  
*Гуков Никита Владимирович – nik.x96@mail.ru;*  
*Нерсесян Анна Ашотовна – anna.nersesyan.1998@mail.ru.*