

О. Б. Шагниева^{1,2}, канд. техн. наук, доц., shagnoleg@yandex.ru,

А. Л. Фрадков^{2,3}, д-р техн. наук, проф., fradkov@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург,

³ Санкт-Петербургский государственный университет

Оценка влияния дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении синхронизацией

Повышение производительности технологических операций является актуальной задачей современной науки. Внедрение современных систем управления промышленным оборудованием сопряжено с цифровизацией и компьютеризацией предприятий. Вибрационная техника является одним из распространенных типов промышленного оборудования, используемого для операций просеивания, дробления, виброперемещения и т. д. Энергетический подход к управлению вибрационными установками позволяет поддерживать постоянный уровень полной энергии колебаний вибрационной установки с грузом, что открывает широкие возможности для интеллектуализации управления оборудованием в условиях неопределенности пространства параметров. Настоящая работа нацелена на исследование влияния цифровизации и дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении кратной синхронизацией роторов вибрационной установки и на оценку критических шагов дискретизации сигналов датчиков. В работе приводятся результаты численного моделирования, основанного на уравнениях динамики системы и приближенных значениях параметров вибрационной установки. Установлено, что рост шага дискретизации приводит к срыву режима кратной синхронизации вплоть до потери устойчивости. Представлены результаты экспериментального исследования на мехатронном вибрационном стенде СВ-2М. Результаты демонстрируют в нормальном режиме работы установление низкочастотных колебаний скоростей вращения роторов и полной энергии системы, частота которых определяется ограничением на значение управляющего сигнала. При увеличении шага дискретизации наблюдается установление движения с остановками, по своему характеру схожее с устойчивыми релаксационными автоколебаниями. Практическая значимость полученных результатов определяется установлением возможных эффектов, возникающих в системе при значительных шагах дискретизации. Дальнейшая разработка адаптивных систем управления может быть нацелена на компенсацию влияния дискретизации на работу скоростного градиента при управлении синхронизацией роторов вибрационной установки.

Ключевые слова: *вибрационная установка, система управления, алгоритм скоростного градиента, цифровизация, дискретное управление*

Введение

Системы управления технологическими процессами в современном мире реализуются на вычислительной технике и, следовательно, являются цифровыми. В условиях цифровой трансформации экономики и промышленности приобретают актуальность исследования влияния дискретизации на работу сложных систем управления в условиях ограничений на мощность вычислительной техники, запаздывания сигналов датчиков и т. д. Настоящая работа посвящена исследованию влияния цифровизации на качество управления синхронизацией роторов вибрационной установки на базе алгоритма скоростного градиента.

Вибрационная техника используется в различных технологических процессах, включающих в себя просеивание сыпучих сред, вибротранс-

портировку и т. д. Стремление к повышению производительности технологических операций определяет необходимость разработки систем управления, обеспечивающих высокое качество синхронизации роторов вибрационной установки в широком диапазоне параметров [1–3].

Основными режимами работы вибрационных установок являются синхронизация и кратная синхронизация скоростей вращения роторов. Режим кратной синхронизации важен с точки зрения обеспечения устойчивых режимов вибротранспортировки за счет создания ненулевого в среднем ускорения платформы с грузом [4, 5]. При этом обеспечение устойчивого режима кратной синхронизации на высоких скоростях вращения является сложной задачей с точки зрения автоматического управления.

Одним из возможных подходов к управлению кратной синхронизацией вибрационной

установки является алгоритм скоростного градиента, основанный на обеспечении требуемого уровня полной энергии колебаний системы [6]. Энергетический подход к управлению синхронизацией вращения роторов вибрационной установки имеет преимущество в сравнении с алгоритмами, основанными на управлении по обратной связи по скоростям вращения роторов. Значительное влияние на динамику системы оказывают перемещения груза, расположенного на платформе. Следовательно, целесообразно использовать комплексный показатель вибрационного состояния системы, которым в алгоритме скоростного градиента служит полная энергия колебаний системы.

В настоящее время активно развиваются методы управления нелинейными системами с учетом дискретности сигналов датчиков и оценки критических значений шага дискретизации [7]. Однако применение этих методов к реальным механическим системам затруднено сложностью процессов и невозможностью приведения математических моделей системы к требуемым формам.

Объектом исследования являются процессы управления синхронизацией скоростей вращения роторов экспериментального мехатронного вибрационного стенда СВ-2М, являющегося прототипом промышленной вибрационной установки. Для управления синхронизацией вращения роторов используется алгоритм скоростного градиента.

В работе представлены результаты моделирования процессов управления синхронизацией вращения роторов вибрационной установки для различных шагов дискретизации. Продемонстрировано влияние цифровизации на качество процессов управления вплоть до потери устойчивости системы. Кроме того, представлены результаты аналогичных экспериментальных исследований на вибрационном стенде.

Постановка задачи

Экспериментальный двухроторный вибрационный стенд СВ-2М разработан в Институте проблем машиноведения Российской академии наук для исследовательских и образовательных целей. Механическая часть вибрационного стенда включает в себя пару дебалансных вибровозбудителей, каждый из которых состоит из асинхронного двигателя с частотным преобразователем, вала и ротора с эксцентрично установленным грузом, вращающегося в вертикальной плоскости на корпусе вибрационного

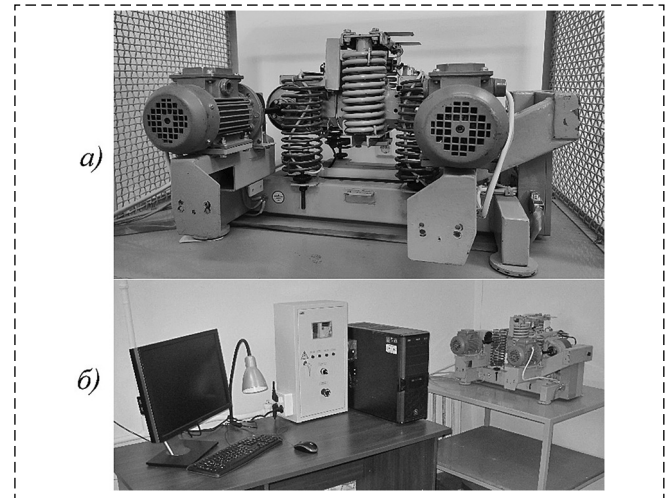


Рис. 1. Вибрационный стенд СВ-2М
Fig. 1. Vibration setup SV-2M

стенда [8]. Вращение неуравновешенных роторов определяет возбуждения колебания платформы, соединенной с опорной рамой четырьмя пружинами. Механическая часть вибрационного стенда представлена на рис. 1, а.

Управление вибрационным стендом в реальном времени осуществляется средствами пакета MATLAB/Simulink с использованием инструмента Real Time. Общий вид экспериментального стенда представлен на рис. 1, б.

Математическая модель вибрационной установки

Расчетная схема механической части вибрационной установки СВ-2М, используемая для разработки математической модели, приведена на рис. 2.

Предполагается, что перемещения вибрационной установки в направлении Z незначительны, т. е. все движения происходят в плоскости

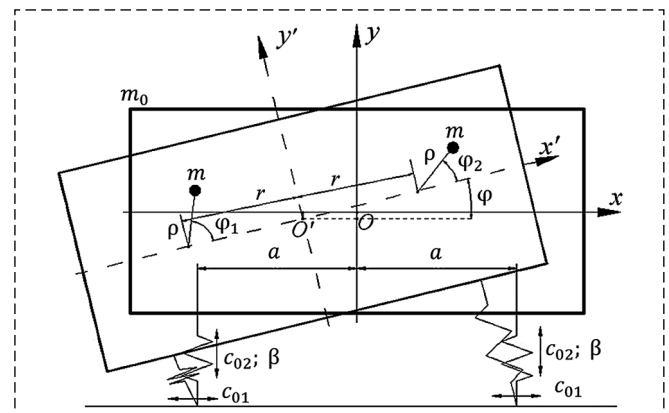


Рис. 2. Расчетная схема вибрационного стенда
Fig. 2. The calculation scheme of vibration setup

ОХУ. Координаты x_c и y_c описывают перемещение платформы в подвижной системе координат $O'X'Y'$. Величина r определяет расстояние от роторов до оси X' . Платформа соединена с опорной рамой пружинами с жесткостью c_{01} и c_{02} в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Координаты точек закрепления пружин равны $\pm a$ в горизонтальном направлении. Угол поворота платформы считается малым. Тогда уравнения, описывающие динамику системы, имеют вид [9]

$$\begin{aligned} m_0\ddot{x}_c - m\rho\sin\varphi_1\ddot{\varphi}_1 - m\rho\sin\varphi_2\ddot{\varphi}_2 - m\rho\cos\varphi_1\dot{\varphi}_1^2 - \\ - m\rho\cos\varphi_2\dot{\varphi}_2^2 + \beta\dot{x}_c + 2c_{01}x_c = 0; \\ m_0\ddot{y}_c + m\rho\cos\varphi_1\ddot{\varphi}_1 + m\rho\cos\varphi_2\ddot{\varphi}_2 - m\rho\sin\varphi_1\dot{\varphi}_1^2 - \\ - m\rho\sin\varphi_2\dot{\varphi}_2^2 + m_0g + \beta\dot{y}_c + 2c_{02}y_c = 0; \quad (1) \\ J_1\ddot{\varphi}_1 - m\rho\sin\varphi_1\ddot{x}_c + m\rho\cos\varphi_1\ddot{y}_c + \\ + m\rho g\cos\varphi_1 + k_c\dot{\varphi}_1 = M_1; \\ J_2\ddot{\varphi}_2 - m\rho\sin\varphi_2\ddot{x}_c + m\rho\cos\varphi_2\ddot{y}_c + \\ + m\rho g\cos\varphi_2 + k_c\dot{\varphi}_2 = M_2. \end{aligned}$$

В модели динамики системы введены следующие обозначения: φ_i — угол поворота i -го ротора относительно оси мотора; M_i — управляющий момент на i -м моторе; k_c — вязкое трение в моторе; β — коэффициент демпфирования в пружинах; m_0 — масса платформы; ρ — эксцентриситет ротора относительно оси вращения; J_i — момент инерции i -го ротора; m_i — масса дебаланса i -го ротора; g — ускорение свободного падения.

Полная энергия колебаний может быть записана как

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

Данное выражение будет использоваться для расчета полной энергии системы как при моделировании, так и при реализации алгоритма скоростного градиента на экспериментальной установке.

Синтез алгоритма управления синхронизацией роторов

Алгоритм скоростного градиента основан на управлении системой по значению ее полной энергии. Общий вид алгоритма скоростного градиента может быть записан как [4]

$$M = -\gamma\nabla_M\dot{Q}(z), \quad (3)$$

где M — вектор управляющих моментов; $\dot{Q}(z)$ — производная по времени целевой функции $Q(z)$; ∇ — символ градиента; z — вектор переменных состояния системы; γ — настроечный параметр алгоритма управления.

Для применения алгоритма скоростного градиента к задачам управления синхронизацией роторов целевая функция должна включать в себя как компоненту, определяющую выход полной энергии системы на заданный уровень, так и компоненту, задающую кратность синхронизации. Такая целевая функция может быть записана как

$$Q(z) = 0,5((1-\alpha)(H-H^d)^2 + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)^2), \quad (4)$$

где H^d — задание по значению полной энергии колебаний системы.

Тогда алгоритм управления синхронизацией роторов на базе скоростного градиента примет вид

$$\begin{aligned} M_1 = -\gamma_1 \left((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_1 + \frac{\alpha}{J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)} \right); \\ M_2 = -\gamma_2 \left((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_2 \pm \frac{\alpha n}{J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)} \right). \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь n — кратность синхронизации. Настраиваемые параметры алгоритма α , γ_1 , γ_2 подбираются экспериментально. Плюс или минус в слагаемом, определяющем кратность синхронизации, выбирается в зависимости от направления вращения роторов. Данный алгоритм управления использовался при численном моделировании.

Для экспериментальной апробации алгоритма скоростного градиента на мехатронном стенде необходимо привести управляющие моменты к сигналу, поступающему на вход асинхронных двигателей. В работах [4, 10] показано, что в стационарном режиме электромеханическую характеристику асинхронного двигателя можно аппроксимировать линейной комбинацией управления и скорости вращения. Типичные механические характеристики асинхронных двигателей [11] показывают падающую характеристику момента на двигателе при росте скорости вращения ротора. Пусть электромеханические характеристики асинхронных двигателей описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} M_1 = k_1u_1 - h_1\dot{\varphi}_1; \\ M_2 = k_2u_2 - h_2\dot{\varphi}_2, \quad (6) \end{aligned}$$

где u_1, u_2 — управление на входе двигателей. Предполагается, что точная заводская характеристика асинхронных двигателей неизвестна. Кроме того, с учетом наличия в системе частотного преобразователя, который фактически сам является дополнительной системой управления двигателем, целесообразно считать, что величины k_1, k_2, h_1 и h_2 являются настроечными параметрами регулятора. Учитывая, что в реальной установке на вход двигателя подается управление u , можно с помощью соотношений (5) и (6) получить окончательную форму закона управления:

$$u_1 = \frac{h_1 \dot{\varphi}_1 - \gamma_1((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2))}{k_1},$$

$$u_2 = \frac{h_2 \dot{\varphi}_2 - \gamma_2((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2))}{k_2}. \quad (7)$$

Таким образом, закон управления на базе алгоритма скоростного градиента включает в себя семь настроечных параметров, подбираемых экспериментально: $\alpha, \gamma_1, \gamma_2, k_1, k_2, h_1$ и h_2 . Для упрощения можно провести алгебраические преобразования, чтобы этих параметров стало меньше, но это приведет к утрате связи настроечных параметров, определяющих электромеханические характеристики двигателей, с их физическим смыслом, что усложнит подбор значений.

Теоретическое обоснование работоспособности синтезированной системы в полном объеме затруднено вследствие нелинейности и многомерности математической модели объекта управления, а также нестандартности цели управления, которая состоит в совпадении или кратности угловых скоростей роторов при достижении заданного уровня полной энергии установки. Известные результаты относятся к исследованию упрощенных моделей, не учитывающих неопределенность параметров, динамику электроприводов и другие факторы [12, 13]. В данной работе делается попытка разработать математический аппарат для анализа влияния дискретизации алгоритма управления.

Дискретизация алгоритма управления энергией

Учет дискретности реализации алгоритма управления будем проводить, ориентируясь на упрощенные версии задачи. Это даст возможность использовать более общие результаты о достижении цели в дискретизованных нелинейных системах.

Математическую модель вибрационного стенда и управления (1), (6) можно представить в обобщенном виде как аффинную по входу модель состояния

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (8)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния стенда, состоящий из координат, скоростей и т. д.; $f(x), g(x)$ — вектор функций $f(x) \in R^n, g(x) \in R^n$, которые являются гладкими (непрерывно дифференцируемыми). Цель управления (ЦУ) зададим в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(x(t)) \leq \Delta, \quad (9)$$

где $Q(x) = \|h(x)\|^2$ — целевая функция; Δ — предельная погрешность. Функция $h(x) \in R^n$ выбирается исходя из требуемой практической цели. Например, в задаче управления энергией (гамильтонианом) механической системы $H(x)$, где $x = [q, \dot{q}]^T \in R^{2m}, q \in R^m$ — вектор обобщенных координат, $\dot{q} \in R^m$ — вектор обобщенных скоростей, можно взять $h(x) = H(q, \dot{q}) - H^d$, где H^d — заданное значение гамильтониана.

Будем считать, что нам известны верхняя граница начального значения целевой функции Q_0 , т. е. вектор начальных условий x_0 принадлежит множеству $\Omega_0 = \{x : Q(x) \leq Q_0\}$. Предположим также, что функция $h(x)$ — инвариант свободной системы при $x \in \Omega_0$:

$$\dot{h}(x(t)) = \nabla h(x(t))^T f(x(t)) = 0. \quad (10)$$

Для функции энергии соотношение (10), очевидно, выполняется. Непрерывный алгоритм скоростного градиента (3) в этом общем случае будет иметь вид

$$u_c(t) = -\gamma[g(x(t))^T \nabla h(x(t))]h(x(t)), \quad (11)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент усиления.

Рассмотрим дискретизованный (sampled-data) алгоритм (11), имеющий вид

$$u_d = -\gamma[g(x(t_k))^T \nabla h(x(t_k))]h(x(t_k)), \quad (12)$$

при $t_k \leq t < t_{k+1}, t_k = kd, k = 0, 1, 2, \dots$, где $d > 0$ — шаг дискретизации.

Справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть функции $f(x), g(x), h(x), \nabla g(x), \nabla h(x), \nabla^2 h(x)$ ограничены при $x \in \Omega_0$, и существует $\varepsilon_0 > 0$ такая, что $\|g(x)^T \nabla h(x)\| \geq \varepsilon_0$ при $x \in \Omega_0$. Пусть начальные условия такие, что $Q(x_0) \leq Q_1 < Q_0$. Тогда при достаточно малом шаге дискретизации d и некотором C достигнется ЦУ (9) с точностью

$$\Delta = \left(\frac{Cd}{\varepsilon_0} \right)^2. \quad (13)$$

Доказательство теоремы может быть проведено аналогично доказательству теоремы 7.2 в работе [14].

Результаты компьютерного моделирования

Моделирование процессов управления в системе при кратной синхронизации проводилось в программном пакете MATLAB/Simulink.

При моделировании были использованы следующие значения параметров: $m_0 = 9$ кг; $m = 1,5$ кг; $\rho = 0,04$ м; $g = 9,81$ кг·м/с²; $J_1 = J_2 = 0,014$ кг·м²; $J = 0,2$ кг·м²; $k_c = 0,01$ кг·м²/с; $\beta = 5$ кг/с; $r = 0,2$ м; $c_{01} = c_{02} = 5300$ Н/м. Настроенные параметры алгоритма скоростного градиента α , γ_1 , γ_2 для случая кратной синхронизации ($n = 2$) были выбраны следующие: $\alpha = 0,25$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,02$. Параметры, определяющие механические характеристики асинхронных двигателей, приняты равными $k_1 = k_2 = 0,00001$; $h_1 = h_2 = 0,01$.

Значение шага дискретизации T варьировалось в диапазоне от 0,001 до 1 с. Учитывая, что на экспериментальном стенде установлено ограничение на управление $u = 30\,000$, при моделировании значения моментов на двигателе были ограничены значением 10 Н·м. Задание по значению полной энергии системы принято $H^d = 60$ Дж. На рис. 3 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации 0,01 с.

На рис. 4 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $T = 0,1$ с.

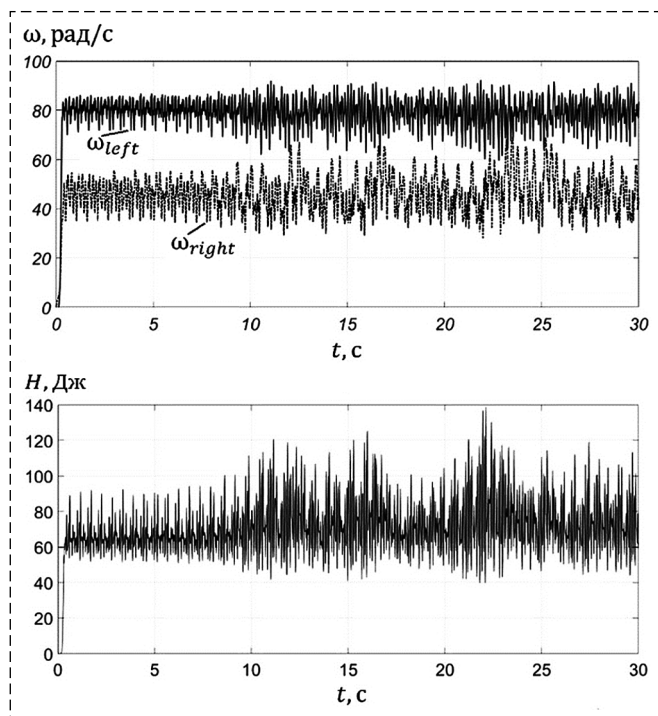


Рис. 3. Скорости вращения роторов и полная энергия колебаний системы при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,01$ с

Fig. 3. Rotation speed and total system energy, $H^d = 60$ J and $T = 0,01$ s

Задание по полной энергии колебаний $H^d = 60$ Дж определяет скорости вращения роторов порядка 80 рад/с и 40 рад/с. Таким образом, медленно вращающийся ротор возбуждает колебания платформы вибрационного стенда на частоте, близкой к парциальной частоте

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2c_{02}}{m_0}} \cong 35 \text{ рад/с.}$$

Это приводит к приближению системы к резонансному режиму [6] и, соответственно, к большому размаху колебаний скоростей вращения ротора в сравнении со случаем больших значений задания по полной энергии H^d . Увеличение шага дискретизации до $T = 0,1$ с фактически приводит к срыву режима синхронизации и, в перспективе, к потере устойчивости системы. Характерно, что потеря устойчивости начинается с переходов с режима кратной синхронизации на режим обычной синхронизации. Потеря устойчивости подтверждается возрастающей амплитудой колебаний полной энергии колебаний системы.

Экспериментальные исследования

При проведении экспериментов для учета неизвестных характеристик асинхронных двигателей использовался алгоритм управления (7).

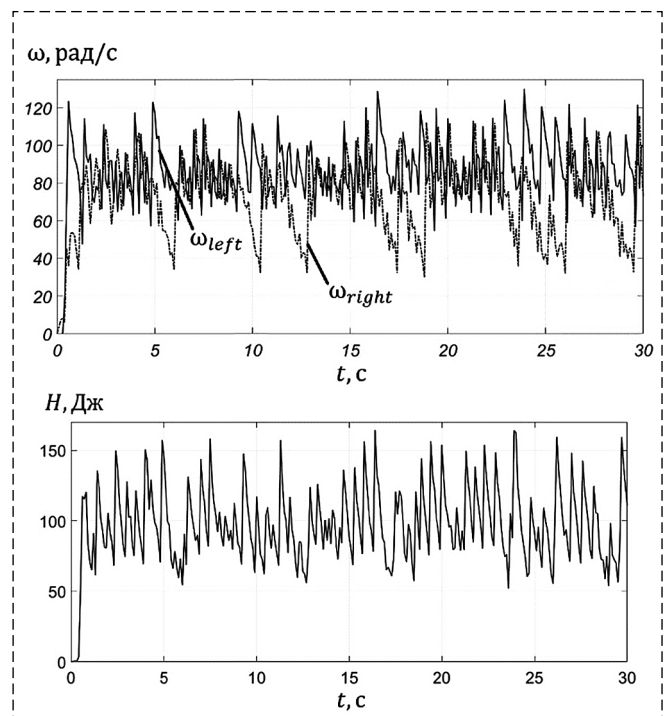


Рис. 4. Скорости вращения роторов и полная энергия колебаний системы, $H^d = 60$ Дж и $T = 0,1$ с

Fig. 4. Rotation speed and total system energy, $H^d = 60$ J and $T = 0,1$ s

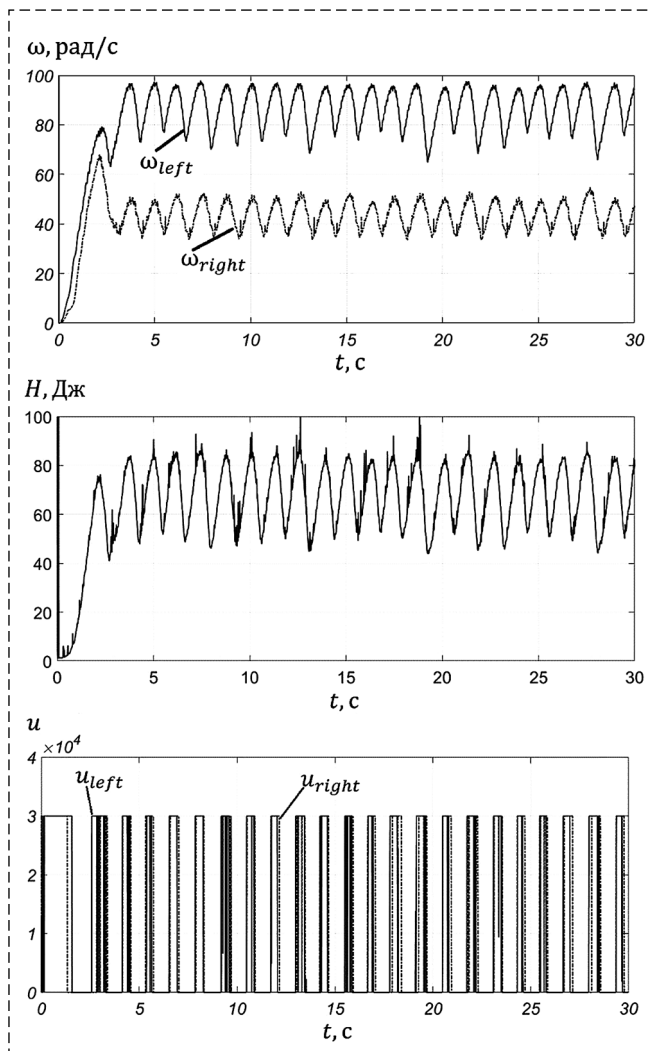


Рис. 5. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях, $H^d = 60$ Дж и $T = 0,01$ с
 Fig. 5. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,01$ s

Задание по значению полной энергии системы принято равным $H^d = 60$ Дж. На рис. 5 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $T = 0,01$ с.

На рис. 6 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $0,1$ с.

Результаты экспериментов демонстрируют снижение качества процессов управления синхронизацией роторов и рост амплитуды колебаний значения полной энергии относительно заданного значения. На графиках полной энергии и скоростей вращения роторов наблюдаются низкочастотные осцилляции, частота которых совпадает с частотой достижения управлением предельного значения $u = 30\ 000$. Потери устойчивости вибрационного стенда не происходит, что может объясняться более суще-

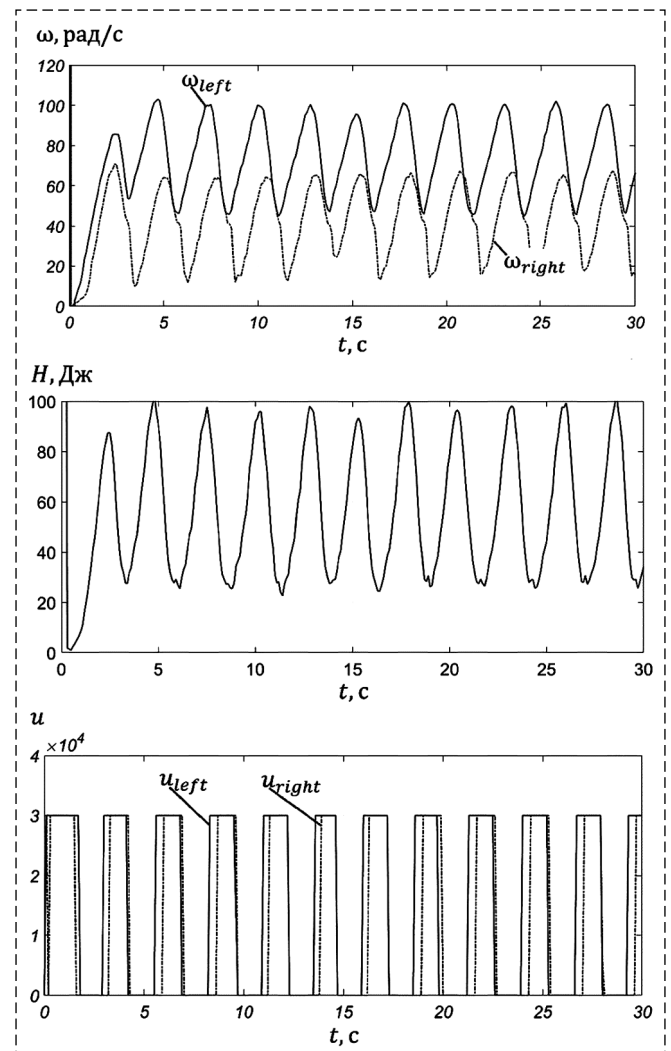


Рис. 6. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,1$ с
 Fig. 6. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,1$ s

ственной в сравнении с моделью диссипацией энергии, а также жесткими ограничениями на значение управляющего сигнала. При дальнейшем увеличении шага дискретизации T режим кратной синхронизации полностью срывается. Кроме того, в системе наблюдается периодическое падение скоростей вращения роторов и полной энергии системы практически до нуля. На рис. 7 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $0,3$ с.

Заключение

Проведено исследование влияния цифровизации на работу системы управления синхронизацией на базе алгоритма скоростного градиента. Численным моделированием под-

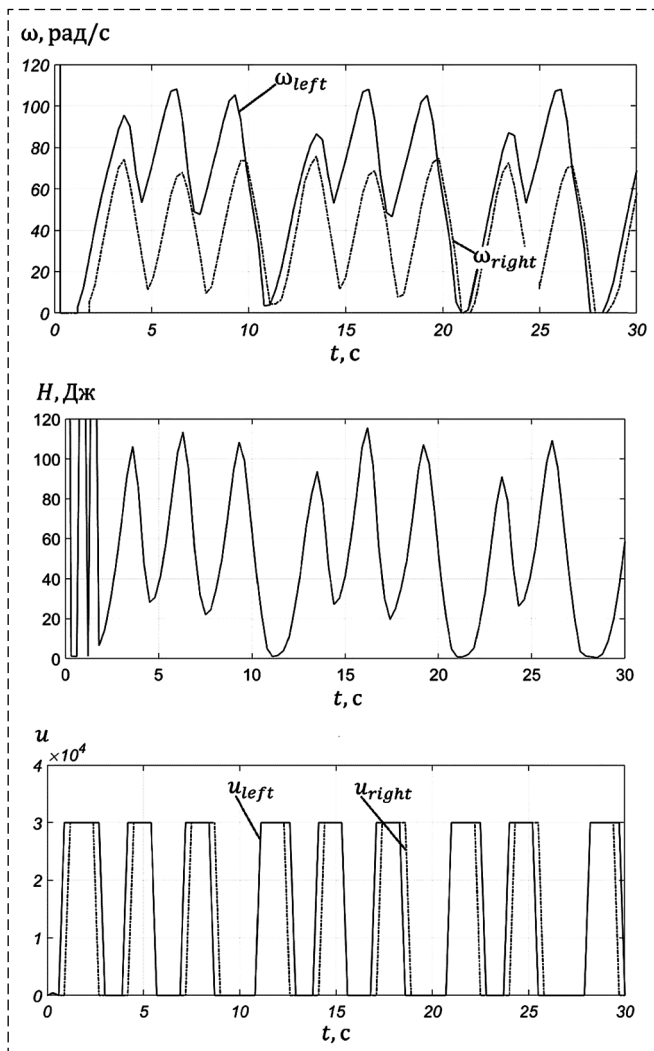


Рис. 7. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,3$ с
 Fig. 7. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,3$ s

тверждено, что увеличение шага дискретизации может приводить к срыву режима кратной синхронизации на режим обычной синхронизации и к последующей потере устойчивости процесса. В ходе экспериментов подтверждена работоспособность алгоритма скоростного градиента для управления режимом кратной синхронизации. Установлен факт наличия низкочастотных осцилляций на графиках полной энергии системы и скоростей вращения двигателей, обусловленных наличием ограничения на значение управляющего сигнала. Продемонстрировано влияние увеличения шага дискретизации на режим кратной синхронизации. Получен режим срыва кратной синхронизации. Представлены результаты, иллюстрирующие установление режима движения с остановами или релаксационных автоколебаний [15, 16] при достижении критиче-

ских значений шага дискретизации, что может объясняться помимо ограничений на управление падающей электромеханической частотно-моментной характеристикой асинхронных двигателей и внутренним трением в системе.

Список литературы

1. Blekhman I. I., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Bogdanov D. E. Self-synchronization and controlled synchronization: general definition and example design // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. Vol. 58. P. 367–384.
2. Blekhman I. I., Fradkov A. L., Nijmeijer H., Pogromsky A. Yu. On self-synchronization and controlled synchronization // Systems and Control Letters. 1997. Vol. 31. P. 299–305.
3. Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Boikov V. I. Angular velocity and phase shift control of mechatronic vibrational setup // IFAC PapersOnLine. 2019. Vol. 52, Iss. 15. P. 436–441.
4. Blekhman I. I. Vibrational Mechanics. World Scientific. Singapore, 2000. 536 p.
5. Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Tomchina O. P. Controlled Passage through Resonance for Two-Rotor Vibration Unit: Influence of Drive Dynamics // IFAC PapersOnLine. 2015. Vol. 48, Iss. 11. P. 313–318.
6. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Speed Gradient Method and Its Applications // Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82, Iss. 9. P. 1463–1518.
7. Fridman E. Brief paper: A refined input delay approach to sampled-data control // Automatica. 2010. Vol. 46, Iss. 2. P. 421–427.
8. Андриевский Б. Р., Блехман И. И., Блехман Л. И., Бойков В. И., Васильков В. Б., Фрадков А. Л. Учебно-исследовательский мехатронный комплекс для исследования вибрационных устройств и процессов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 90–97.
9. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Andrievsky B. R., Boikov V. I. Control of phase shift in two-rotor vibration units // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2021. Vol. 29, Iss. 3. P. 1316–1323.
10. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособ. для вузов/ М.: Энергия, 1979. 616 с.
11. Архипцев Ю. Ф., Котеленец Н. Ф. Асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1986. 104 с.
12. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Tomchin D. A. Controlled passage through resonance in mechanical systems // Journal of Sound and Vibration. 2011. Vol. 330, Iss. 6. P. 1065–1073.
13. Фрадков А. Л., Томчина О. П., Галицкая В. А., Горлатов Д. В. Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 83, № 1. С. 30–37.
14. Амелина Н. О., Ананьевский М. С., Андриевский Б. Р., Граничин О. Н., Джунусов И. А., Матвеев А. С., Проскурников А. В., Пчелкина И. В., Селиванов А. А., Фрадков А. Л., Фридман Э. М., Фуртат И. Б. Проблемы сетевого управления / Под редакцией д.т.н., проф. А. Л. Фрадкова. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 392 с.
15. Байдина Т. А., Бурдаков С. Ф., Шагниев О. Б. Управление импульсным сглаживанием фрикционных автоколебаний при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2018. Т. 11, № 4. С. 119–129.
16. Шагниев О. Б., Шаньшин И. К., Бурдаков С. Ф. Управление регенеративными автоколебаниями в процессе фрезерования // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2019. Т. 20, № 5. С. 291–298.

Influence of Discretization on the Speed Gradient Synchronization Control

O. B. Shagniev^{1,2}, shagnoleg@yandex.ru, A. L. Fradkov^{2,3}, fradkov@mail.ru,

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation,

² Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation,

³ Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author: **Shagniev Oleg B.**, Ph.D., Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: shagnoleg@yandex.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

Increasing the productivity of technological operations is a current task of modern science. The introduction of modern industrial equipment control systems is associated with the digitalization and computerization of enterprises. Vibration technology is one of the common types of industrial equipment used for screening, crushing, vibratory movement, etc. The energy approach for the vibration setups control makes it possible to keep a constant level of total energy of vibration setup oscillations, which makes it possible to develop intelligent control system under conditions of uncertainty in the parameter space. This paper is devoted to the study of the influence of digitalization and discretization on the speed gradient algorithm operation for the multiple synchronization control of vibration setup rotors and evaluation of the critical sensor signals sampling steps. The paper presents the results of numerical simulation based on the system dynamics equations and approximate values of vibration setup parameters. The simulation results present that an increase of the discretization sampling step leads to a disruption of the multiple synchronization mode up to the stability loss. The results of an experimental study on a mechatronic vibration setup SV-2M demonstrate in normal operation mode the low-frequency oscillations of the rotors speeds and the total system energy, which frequency is determined by the control signal limit. When the discretization step increase, the motion with stops is observed, which has a similar nature with the stable relaxation self-oscillations. The practical relevance of the obtained results is a detection of possible effects that occur in the system with significant discretization steps. Further development of adaptive control systems can be aimed to compensating of the discretization effect on the operation of the speed gradient control of the vibration setup rotors synchronization.

Keywords: vibration setup, control system, speed-gradient algorithm, digitalization, discrete control

For citation:

Shagniev O. B., Fradkov A. L. Influence of Discretization on the Speed Gradient Synchronization Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 59–66.

DOI: 10.17587/mau.24.59-66

References

1. Blekhan I. I., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Bogdanov D. E. Self-synchronization and controlled synchronization: general definition and example design, *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 58, pp. 367–384.
2. Blekhan I. I., Fradkov A. L., Nijmeijer H., Pogromsky A. Yu. On self-synchronization and controlled synchronization, *Systems and Control Letters*, 1997, vol. 31, pp.299–305.
3. Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Boikov V. I. Angular velocity and phase shift control of mechatronic vibrational setup, *IFAC PapersOnLine*, 2019, vol. 52, iss.15, pp. 436–441.
4. Blekhan I. I. *Vibrational Mechanics*, Singapore, World Scientific, 2000. 536 p.
5. Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Tomchina O. P. Controlled Passage through Resonance for Two-Rotor Vibration Unit: Influence of Drive Dynamics, *IFAC PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 313–318.
6. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Speed Gradient Method and Its Applications, *Automation and Remote Control*, 2021, vol. 82, iss. 9, pp. 1463–1518.
7. Fridman E. Brief paper: A refined input delay approach to sampled-data control, *Automatica*, 2010, vol. 46, iss. 2, pp. 421–427.
8. Andrievsky B. R., Blekhan I. I., Blekhan L. I., Boikov V. I., Vasilkov V. B., Fradkov A. L. Educational and research mechatronic setup for the study of vibration devices and processes, *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2016, iss. 4, pp. 90–97 (in Russian).
9. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Andrievsky B. R., Boikov V. I. Control of phase shift in two-rotor vibration units, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, vol. 29, iss. 3, pp. 1316–1323.
10. Chilikin M. G., Klyuchev V. I., Sandler A. S. *Theory of automated electric drive: Textbook for universities*, Moscow, Energiya, 1979, 616 p. (in Russian).
11. Arkhipov Yu. F., Kotelenets N. F. *Asinkhronnyye elektrodvigateli. 2-e izd., pererab. i dop.* [Asynchronous electric motors, Moscow, Energoatomizdat, 1986, 104 p. (in Russian).
12. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Tomchin D. A. Controlled passage through resonance in mechanical systems, *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, iss. 6, pp.1065–1073.
13. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Galitskaya V. A., Gorlatov D. V. Integro-Differentiating Algorithms of Speed Gradient in Problems of Multiple Synchronization of Vibration Setups, *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2013, vol. 83, iss. 1, pp. 30–37 (in Russian).
14. Amelina N. O., Ananievskiy M. S., Andrievsky B. R., Granichin O. N., Dzhunusov I. A., Matveev A., Proskurnikov A. V., Pchelkina I. V., Selivanov A. A., Fradkov A. L., Fridman E. M., Furtat I. B. *Problems of network control*, Edited by Doctor of Technical Sciences, prof. A. L. Fradkov, Moscow, Izhevsk, Institut komputernykh issledovaniy, 2015, 392 p. (in Russian).
15. Baidina T. A., Burdakov S. F., Shagniev O. B. Control of impulse smoothing of frictional self-oscillations during contact interaction of the robot with the surface to be treated, *Nauchno-tehnicheskije vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, 2018, vol. 11, iss 4, pp. 119–129 (in Russian).
16. Shagniev O. B., Shanshin I. K., Burdakov S. F. Control of regenerative self-excited vibrations in the milling process, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2019, iss. 5, pp. 291–298 (in Russian).