

## ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕМ

*Рассматриваются проблемы и способ реализации цифровой системы управления электроприводом электродинамического низкочастотного вибровозбудителя. Приводятся: описание дискретной модели управления, анализ устойчивости, синтез цифрового регулятора. Представлено техническое описание разработанной системы.*

**Ключевые слова:** управление, регулятор, модель, вибровозбудитель, устойчивость, дискретность, частота.

### *Назначение и проблематика*

Во многих областях современной техники (сейсмология, космическая и авиационная индустрия, мощные энергетические установки, строительство высотных объектов, транспорт) широко используются датчики ускорения (акселерометры), работающие в очень низком диапазоне частот (0,01...5 Гц). Для проверки и градуировки таких датчиков требуются вибровозбудители, способные обеспечивать прямолинейные горизонтальные гармонические колебания поверяемого акселерометра в столь низком диапазоне частот.

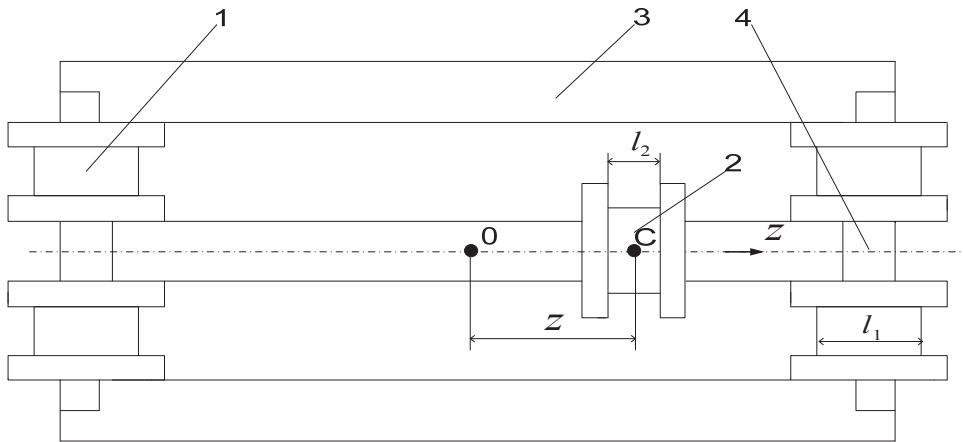
Низкие частоты колебаний вызывают необходимость создания больших амплитуд перемещений для обеспечения приемлимых значений амплитуд ускорений. К настоящему времени создан низкочастотный электродинамический вибровозбудитель с магнитным подвесом подвижной части (Грибов, 1986, С. 77–82) с диапазоном частот 0,1–5 Гц и амплитудой колебаний 0,5 м, который является составной частью Национального Стандарта вибрационного движения Российской Федерации. Однако, развитие современной техники требует расширения частотного диапазона в область сверхнизких частот до 0,01 Гц.

Одним из требований, предъявляемым к вибростенду, работающему в сверхнизком диапазоне частот, является увеличение амплитуды горизонтальных перемещений подвижной части, так как при малых амплитудах скорость и ускорение гармонического закона перемещения, пропорциональные соответственно частоте колебаний и квадрату этой частоты, будут иметь малые амплитудные значения.

Приводная часть вибровозбудителя (рис. 1) состоит из магнитопровода, четырех неподвижных катушек намагничивания 1 и одной подвижной катушки 2. Магнитопровод состоит из пяти горизонтально расположенных ферромагнитных стержней круглого поперечного сечения — трех продольных 3 и двух поперечных 4, соединяющих торцевые поверхности продольных стержней.

Катушки намагничивания надеты на поперечные стержни, соединены последовательно, питаются от блока питания постоянным током  $I_1$  и создают постоянное магнитное поле по всей длине рабочего воздушного зазора между центральным и боковыми продольными стержнями. Подвижная катушка свободно надета на центральный продольный стержень. При питании катушки си-

нусоидальным задающим током на нее будет действовать в продольном направлении гармоническая сила электродинамического воздействия.



**Рис. 1.** Система электродинамического привода

Подвижная катушка вместе с прикрепленным к ней испытуемым акселерометром образует подвижную часть вибровозбудителя, которая снабжена системой активного магнитного подвеса (Журавлев, 2003).

Одна из проблем реализации системы управления электроприводом вибровозбудителя состоит в том, что подвижная часть обладает безразличным положением равновесия. Центр колебаний подвижной части не определен и может находиться в любой точке по длине магнитопровода. Чтобы колебания имели устойчивый центр в средней точке магнитопровода без использования механической пружины, привод снабжается дополнительной системой управления колебаниями, или так называемой электромагнитной пружиной.

Эта система состоит из индуктивного датчика перемещения у подвижной части в продольном направлении из центра колебаний и регулятора. Сигнал с датчика обрабатывается регулятором, усиливается, и его выходной сигнал  $\Delta i = -f_1 y - f_2 \dot{y}$  суммируется с задающим сигналом  $I_{sin} \omega t$ . Здесь  $f_1$  и  $f_2$  — коэффициенты усиления обратной связи по перемещению и скорости соответственно.

Описанная система управления движением была реализована в аналоговом исполнении, при котором регулятор имеет постоянную настройку (в плане постоянства коэффициентов усиления  $f_1$  и  $f_2$ ). Опыт эксплуатации показал, что настройка регулятора должна меняться с изменением частоты колебаний  $\omega$ , поскольку частотный диапазон  $\omega = 0,01 \dots 5$  Гц предполагает изменение частоты в 500 раз, перенастройка аналогового регулятора сопряжена со значительными трудностями. Этим обстоятельством и вызвана необходимость перехода на цифровое управление, одним из преимуществ которого является высокая гибкость.

Для технической реализации цифровой системы управления определим дискретную модель объекта управления.

### *Дискретная модель объекта управления*

Объектом управления служит подвижная часть вибровозбудителя, являющаяся динамическим звеном, входной (управляющей) переменной которого является ток  $i_2(t)$  в подвижной катушке магнитопровода, а выходной (управляемой) переменной — координата  $x(t)$  центра  $C$  подвижной катушки относительно центра колебаний  $O$  (рис. 1). Так как осуществлен активный магнитный подвес подвижной части вибровозбудителя, то сила трения отсутствует и уравнение объекта имеет вид

$$m\ddot{x}(t) = F(t) \quad F(t) = hi_2(t),$$

где  $h$  — коэффициент передачи «ток–сила», зависящий от тока  $I_1$  в катушках намагничивания;  $m$  — масса подвижной части.

Таким образом, во временной области объект описывается уравнением:

$$\ddot{x}(t) = ai_2(t),$$

где коэффициент  $a = h/m$ . Одна из особенностей цифрового управления — это переход от дифференциальных к разностным уравнениям. Такой переход вызван тем, что переменные объекта являются функциями непрерывного времени, а переменные цифрового регулятора изменяются только в дискретные моменты времени  $t_k = kT_0$ , где  $T_0$  — период квантования,  $k$  — целое число.

Пусть система снабжена идеальным квантователем с периодом квантования  $T_0$  и фиксатором нулевого порядка, сохраняющим постоянное значение управляющего тока в течение периода  $T_0$ , то есть  $i_2(t) = i_2(k) = \text{const}$  при  $kT_0 \leq t < (k+1)T_0$ . Перемещение и скорость примут значения

$$x(k+1) = x(k) \times 1 + \dot{x}(k) \times T_0 + i_2(k) \times a \frac{T_0^2}{2};$$

$$\dot{x}(k+1) = \dot{x}(k) \times 1 + i_2(k) \times aT_0.$$

В результате получаем дискретное описание объекта управления в виде разностных уравнений. Запишем их в матричном виде:

$$y(k+1) = Ay(k) + Bi_2(k);$$

$$x(k) = Cy(k),$$

где  $y(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \end{pmatrix}$ ;  $y(k+1) = \begin{pmatrix} x(k+1) \\ \dot{x}(k+1) \end{pmatrix}$ ;  $A = \begin{pmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ ;  $B = \begin{pmatrix} a \frac{T_0^2}{2} \\ aT_0 \end{pmatrix}$ ;  $C = (1 \ 0)$ .

Известно (Куо, 1986), что дискретный объект (Изерман, 1984) будет устойчив, если собственные числа матрицы  $A$  находятся внутри единичного круга на комплексной плоскости. Отыскивая собственные числа матрицы  $A$ , как корни уравнения  $\det(\lambda I - A) = 0$ , где  $I = \text{diag}(1; 1)$  — единичная матрица, получаем  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ . Отсюда следует, что объект находится на границе устойчивости, то есть обладает безразличным положением равновесия.

Применяя метод  $z$  — преобразования к полученной системе разностных уравнений при нулевых начальных условиях, имеем  $Y(z) = H(z)I(z)$ , где

$z$  — комплексная переменная преобразования;  $H(z)$  — передаточная функция объекта, определяемая, как

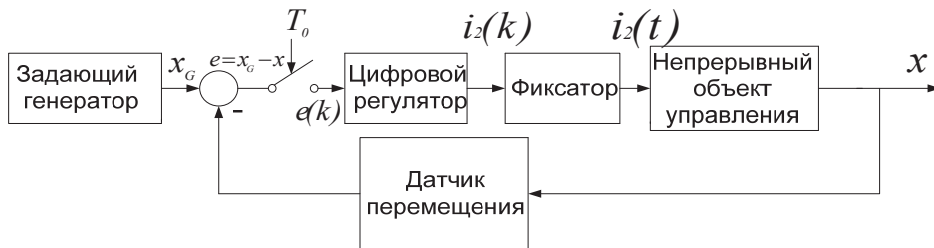
$$H(z) = C(zI - A)^{-1}B.$$

Определяя обратную матрицу  $(zI - A)^{-1}$ , приходим к передаточной функции объекта управления

$$H(z) = \frac{aT_0}{2} \frac{z+1}{(z-1)^2}.$$

Функциональная схема цифровой системы управления показана на рис. 2.

Перемещение объекта управления  $x(t)$  измеряется датчиком. Задающий генератор формирует синусоиду  $x_G(t) = A \sin \omega t$ , которая квантуется с периодом  $T_0$  и обрабатывается цифровым регулятором. Регулятор совместно с фиксатором вырабатывает управляющий сигнал  $i_2(t)$ , который после усиления поступает на вход объекта управления.



**Рис. 2.** Функциональная схема цифровой системы управления приводом вибровозбудителя

### *Синтез регулятора*

Используем дискретный ПИД регулятор, реализующий закон управления вида

$$i_2(k) = i_2(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2),$$

где

$$q_0 = K \left( 1 + \frac{T_0}{2T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right); \quad q_1 = -K \left( 1 + \frac{2T_d}{T_0} - \frac{T_0}{2T_i} \right); \quad q_2 = K \frac{T_d}{T_0}.$$

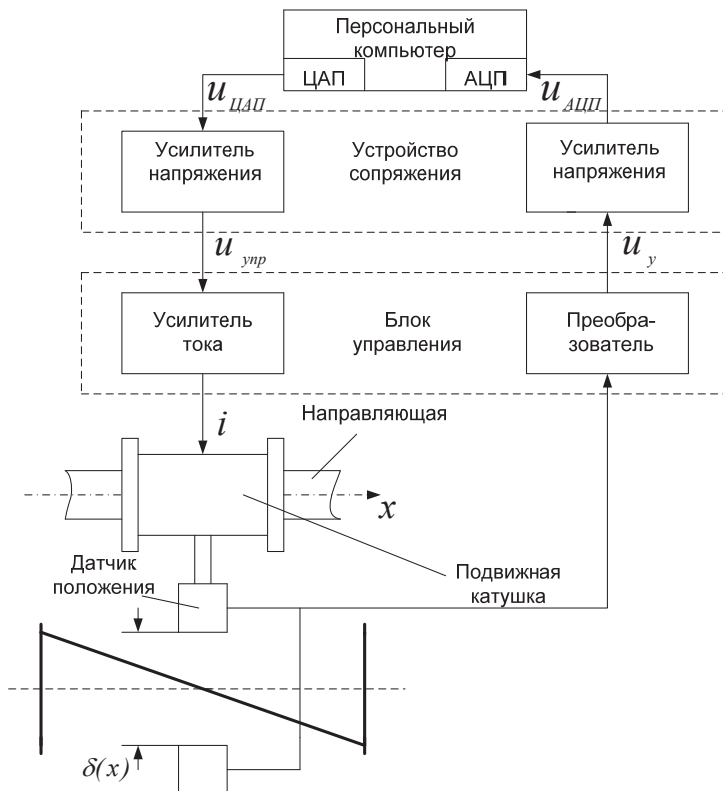
Здесь  $K$  — коэффициент передачи;  $T_d$  — постоянная дифференцирования;  $T_i$  — постоянная интегрирования. Значения параметров регулятора определялись методом параметрической настройки, то есть по качеству переходного процесса при ступенчатом изменении ошибки  $e(0)$ .

### *Техническая реализация*

Одним из вариантов технической реализации является применение в качестве устройства цифрового управления персонального компьютера с уста-

новленной в нем многофункциональной платой ввода–вывода. На рис. 3 представлена функциональная схема такой системы управления.

Сигнал от датчика положения поступает на вход преобразователя, размещенного в блоке управления. Выходное напряжение преобразователя пропорционально положению подвижной части вибровозбудителя. Данное напряжение через согласующий усилитель, расположенный в устройстве сопряжения, поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя платы ввода-вывода персонального компьютера. Персональный компьютер выступает в роли управляющего устройства и реализует цифровой регулятор управления объектом. Рассчитанный регулятором сигнал подается на вход цифро-аналогового преобразователя платы ввода–вывода. Выходное напряжение через согласующий усилитель устройства сопряжения поступает на вход усилителя тока. Усилитель тока управляет током  $i_2$  подвижной катушки вибровозбудителя пропорционально поступающему на вход напряжению.



**Рис. 3.** Функциональная схема системы управления

Для сглаживания микроскачков тока и ускорения на выход системы можно добавить фильтр.

В качестве устройства ввода–вывода сигналов в цифровой системе управления используется многофункциональная плата PCI-1711 фирмы Advantech. В таблице перечислены основные характеристики платы ввода–вывода.

Параметры платы ввода–вывода

Параметр	Значение
Аналоговый ввод	16 каналов $\pm 10$ В, 12 бит, до 100 кГц
Аналоговый вывод	2 канала $\pm 10$ В*, 12 бит, от 38 кГц
Дискретный ввод	16 каналов
Дискретный вывод	16 каналов
Счетчики	1 канал ТГЛ, 16 бит, до 10 МГц
Таймеры	1 канал, 32 бита

\* при наличии внешнего опорного напряжения, иначе 0...10 В.

Сигнал с датчика положения поступает на один из каналов аналогового ввода. Управление положением подвижной части осуществляется при помощи канала аналогового вывода.

Точная амплитуда колебаний может быть измерена при помощи лазерного интерферометра. Для ввода сигнала интерферометра в цифровую систему управления используется канал высокочастотного счетчика. Остальные свободные аналоговые и дискретные входы-выходы платы PCI-1711 могут быть задействованы для обеспечения вспомогательных функций управления и индикации. Аппаратное подключение сигналов ввода-вывода реализуется при помощи вспомогательной терминальной платы PCLD-8710-A и соединительного кабеля PCL-10168. Для согласования сигналов используется устройство сопряжения с объектом.

Дифференциальный датчик положения состоит из двух ферромагнитных катушек, движущихся вместе с подвижной частью вибровозбудителя вдоль противоположных сторон натянутой ленты из электротехнической стали (рис. 3). Данная реализация позволяет добиться практически линейной зависимости измеряемого напряжения от положения объекта. Небольшие нелинейности, связанные с неоднородностью материала натянутой ленты устраняются введением в систему управления цифрового фильтра второго порядка по управляющему сигналу.

В качестве датчика положения подвижной части вибровозбудителя также может использоваться лазерный интерферометр.

Программное обеспечение для цифровой системы реализуется на языке высокого уровня Delphi. Основу составляют два модуля:

- модуль управления, который осуществляет реализацию всех алгоритмов работы цифровой системы управления и взаимодействия с оборудованием;
- программа интерфейса оператора, которая позволяет осуществлять настройку параметров объекта управления и цифрового регулятора, задавать исходные данные испытаний, производить анализ текущей информации о работе системы и результатов проведенных опытов.

Испытания системы на действующем устройстве показали, что на частотах колебаний 0,2–0,4 Гц возникают резонансные явления, вызванные наложением частоты регулятора на собственную частоту объекта управления. Амплитуда колебаний отличалась в 2–3 раза от заданной. Данная проблема решена введением в алгоритм цифрового регулятора корректирующего амплитудного коэффициента в зависимости от задающей частоты.

## Литература

1. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб. : Политехника, 2003.
2. Грибов А. Н., Журавлев Ю. Н., Мацевич В. Г. Вибровозбудитель низкочастотной вибрации с активной магнитной подвеской подвижной части // Современные проблемы совершенствования средств измерений механических величин. Л. : Энергоатомиздат, 1986.
3. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М. : Машиностроение, 1986.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. М. : Мир, 1984.

*D. S. Fyodorov*

### DIGITAL CONTROL SYSTEM OF LOW-FREQUENCY ELECTRODYNAMIC VIBRATING STAND

*In article problems and a way of realization of a digital control system are considered by the electric drive of an electrodynamic low-frequency vibrating stand. Are brought: description of discrete model of management, stability analysis, synthesis of a digital regulator. The technical specification on the developed system is presented.*

**Keywords:** management, regulator, model, vibrating stand, stability, step-type behavior, frequency.

Федоров Дмитрий Сергеевич — старший преподаватель кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, dmitriy-fedorov-2012@mail.ru.

УДК 620.9 + 502

*К. В. Глотова*

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО ОБЪЕКТА ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЧЕЛОВЕКА

*Проведен анализ неблагоприятных факторов воздействия и риска на потенциально опасных объектах энергетики на примере филиала ОАО «ОГК-2 Псковская ГРЭС».*

**Ключевые слова:** электрическая станция, электроэнергетическая установка, топливо, вредные выбросы, негативное воздействие.

Государственная районная электрическая станция (ГРЭС) является сложным энергетическим комплексом, состоящим из зданий, сооружений, энергетического и иного оборудования. Основными системами ГРЭС являются:

- котельная установка;