

ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

Рассмотрены проблемы и способ реализации цифровой системы управления приводом электродинамического низкочастотного возбудителя. Приводятся: описание дискретной модели объекта, анализ ее устойчивости, синтез цифрового регулятора. Представлено техническое описание разработанной системы и результаты испытаний.

Назначение и проблематика

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

Низкие частоты колебаний вызывают необходимость создания больших амплитуд перемещений для обеспечения приемлемых значений амплитуд ускорений. Например, чтобы получить амплитуду ускорения $3,5 \text{ м/с}^2$ на частоте 0,6 Гц, амплитуда перемещения должна составлять 250 мм. Необходимость в столь больших амплитудных перемещениях исключает возможность использовать традиционный широко используемый электромагнитный тип вибровозбудителя. В связи с этим был выбран, спроектирован и изготовлен электродинамический вибровозбудитель ВМГ-2 с размахом колебаний до 1 м [1] (работы выполнялись при совместном участии Псковского государственного политехнического института и НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»).

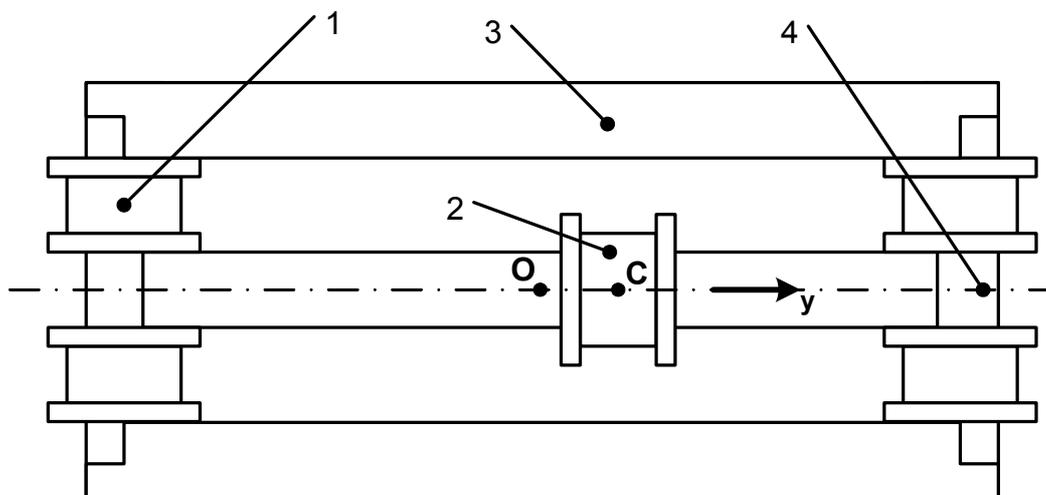


Рис. 1. Электромагнитная система вибровозбудителя.

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, 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 надет на центральный продольный стержень. При питании катушки синусоидальным задающим током $i(t) = I \sin \omega t$ на нее будет действовать гармоническая сила электродинамического воздействия $F \sin \omega t$.

Подвижная катушка вместе с прикрепленным к ней испытуемым акселерометром образует подвижную часть вибровозбудителя, которая должна быть снабжена системой

подвеса. Из двух возможных типов подвеса без трения – воздушного и магнитного, был выбран и осуществлен активный магнитный подвес [2].

Еще одна важная проблема состоит в том, что подвижная часть обладает безразличным положением равновесия. Это означает, что центр колебаний не определен и может находиться в любой точке по длине магнитопровода. Поэтому, чтобы колебания имели устойчивый центр в средней точке магнитопровода без использования механической пружины, привод был снабжен дополнительной системой управления колебаниями, или так называемой электромагнитной пружиной.

Эта система состоит из индуктивного датчика перемещения y подвижной части в продольном направлении из центра колебаний и пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора. Сигнал с датчика обрабатывается регулятором, усиливается, и его выходной сигнал $\Delta i = -f_1 y - f_2 \dot{y}$ суммируется с задающим током $I \sin \omega t$. 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 смысле постоянства коэффициентов усиления f_1 и f_2). Опыт эксплуатации показал, что настройка регулятора должна меняться с изменением частоты колебаний ω . 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 вызван переход на цифровое управление, одним из преимуществ которого является высокая гибкость.

Дискретное описание объекта управления

Объектом управления служит подвижная часть вибровозбудителя, являющаяся динамическим звеном, входной (управляющей) переменной которого является ток $i(t)$ в подвижной катушке, а выходной (управляемой) переменной – координата $y(t)$ центра C подвижной катушки относительно центра колебаний O . Сила трения отсутствует, поэтому уравнение объекта имеет вид

$$m \ddot{y}(t) = F(t), \quad F(t) = h i(t), \quad (1)$$

где h – коэффициент передачи «ток-сила», зависящий от тока I_1 ; m – масса подвижной части.

Таким образом, во временной области объект описывается уравнением

$$\ddot{y}(t) = a i(t), \quad (2)$$

где коэффициент $a = h/m$. Одной 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 , т.е. $i(t) = i(k) = const$ при $kT_0 \leq t < (k+1)T_0$. Задача сводится к определению изменения состояния системы (2) за один период квантования при начальных условиях $y(0) = y(k)$, $\dot{y}(0) = \dot{y}(k)$. Интегрируя дважды уравнение (2) и используя начальные условия, находим, что в момент времени $t_{k+1} = (k+1)T_0$ перемещение и скорость примут значения

$$\begin{aligned} y(k+1) &= y(k) \cdot 1 + \dot{y}(k) \cdot T_0 + i(k) \cdot a \frac{T_0^2}{2} \\ \dot{y}(k+1) &= \dot{y}(k) \cdot 1 + i(k) \cdot a T_0 \end{aligned} \quad (3)$$

В результате получаем дискретное описание объекта управления в виде разностных уравнений, записанных в матричном виде

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bi(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (4)$$

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

Устойчивость объекта управления

Известно [3], что дискретный объект (4) 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, т.е. обладает безразличным положением равновесия.

Описание объекта управления по методу z-преобразования

Применяя метод z-преобразования к системе разностных уравнений (4) при нулевых начальных условиях, имеем $Y(z) = H(z)I(z)$, где z – комплексная переменная преобразования; $H(z)$ – передаточная функция объекта, определяемая как

$$H(z) = C(zI - A)^{-1}B. \quad (5)$$

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

$$H(z) = \frac{aT_0^2}{2} \frac{z+1}{(z-1)^2}. \quad (6)$$

Блок-схема цифровой системы управления

Блок-схема цифровой системы управления показана на рис. 2.

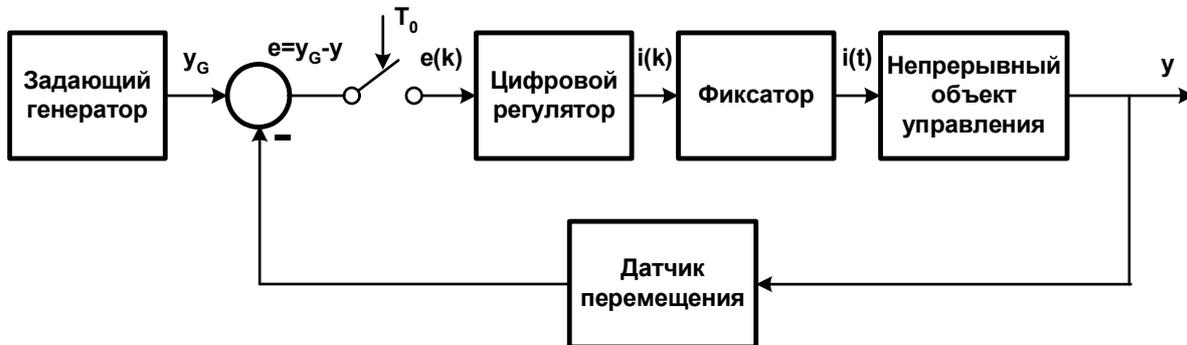


Рис. 2. Блок-схема цифровой системы управления.

Перемещение объекта управления $y(t)$ измеряется индуктивным датчиком. Задающий генератор формирует синусоиду $y_G(t) = A \sin \omega t$. Элемент сравнения формирует ошибку $e = y_G - y$, которая квантуется с периодом T_0 и обрабатывается цифровым регулятором. Регулятор совместно с фиксатором вырабатывает управляющий сигнал $i(t)$, который после усиления поступает на вход объекта управления.

Синтез регулятора

Используем дискретный ПИД-регулятор, реализующий закон управления вида [4]

$$i(k) = i(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (7)$$

где

$$q_0 = K \left(1 + \frac{T_0}{2T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right), q_1 = -K \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_0} - \frac{T_0}{2T_i} \right), q_2 = K \frac{T_d}{T_0}. \quad (8)$$

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

Техническая реализация

Рассмотрев несколько вариантов технической реализации, было решено использовать в качестве устройства цифрового управления персональный компьютер с установленной в нем многофункциональной платой ввода-вывода. На рис. 3 представлена разработанная функциональная схема системы управления

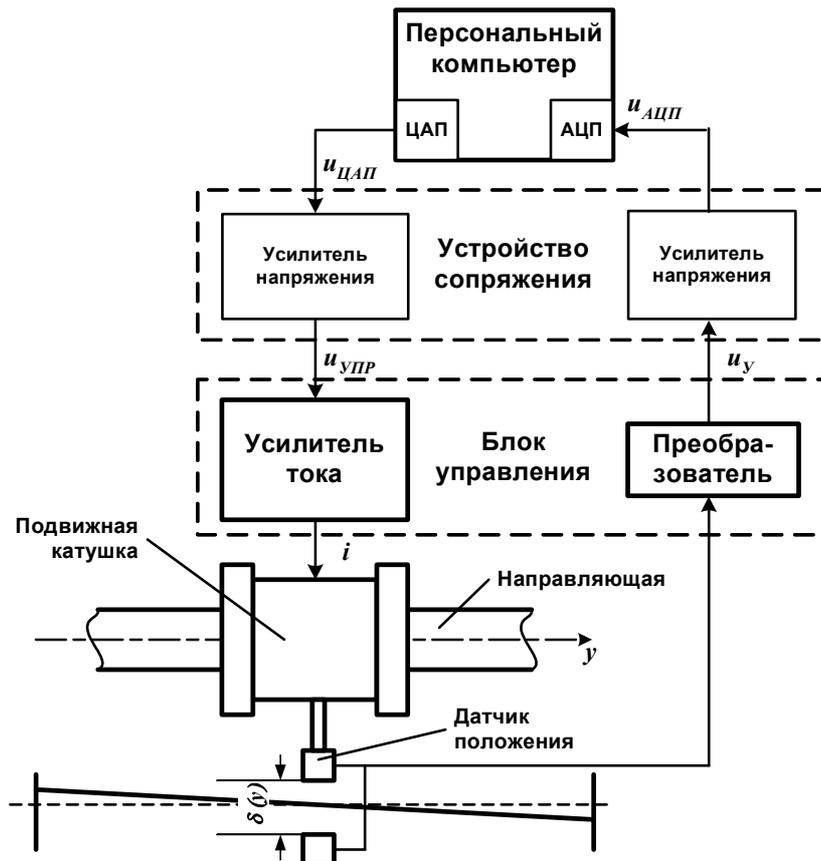


Рис. 3. Функциональная схема цифровой системы управления.

Сигнал от магнитоиндукционного 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 аналого-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 цифроаналогового преобразователя платы ввода-вывода. Выходное напряжение через согласующий усилитель устройства сопряжения поступает на вход усилителя тока. Усилитель тока управляет током i подвижной катушки вибровозбудителя пропорционально поступающему на вход напряжению.

В качестве устройства ввода-вывода сигналов в цифровой системе управления используется многофункциональная плата PCI-1711 фирмы Advantech. В таб. 1 перечислены основные характеристики платы ввода-вывода.

Таб. 1. Основные характеристики платы PCI-1711.

Параметр	Значение
Аналоговый ввод	16 каналов ± 10 В, 12 бит, до 100 кГц
Аналоговый вывод	2 канала ± 10 В*, 12 бит, от 38 кГц
Дискретный ввод	16 каналов
Дискретный вывод	16 каналов
Счетчики	1 канал ТТЛ, 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 подвижной части вибровозбудителя может быть измерена при помощи имеющегося 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 реализовано при помощи вспомогательной терминальной платы PCLD-8710-A и соединительного кабеля PCL-10168. Для согласования сигналов используется устройство сопряжения с объектом.



Рис. 4. Структурная схема и потоки данных программного обеспечения.

Программное обеспечение для цифровой системы управления разработано на языке высокого уровня Delphi и предназначено для работы под управлением операционной системы Windows XP. Структура и потоки данных реализованного программного комплекса изображены на рис. 4. Основу программного обеспечения 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.

Результаты испытаний

Разработанная цифровая система управления внедрена на эталонном вибростенде ВМГ-2 и проходит опытную эксплуатацию в НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» г. Санкт-Петербург.

Заложенные в программном обеспечении средства графического представления проведенных опытов позволяют анализировать переходные процессы в системе и легко настраивать необходимые параметры цифрового регулятора (см. рис. 6).

В процессе внедрения и пуско-наладочных работ были выявлены и решены несколько технических проблем.

Из-за большой нелинейности имеющегося магнитоиндукционного исходного датчика положения подвижной части происходило значительное искажение управляющего тока, что недопустимо, так как поверяемое ускорение прямо-пропорционально току. Для решения данной проблемы был разработан и установлен новый дифференциальный датчик положения, состоящий из двух ферромагнитных катушек, движущихся вместе с подвижной частью вдоль противоположных сторон натянутой ленты из электротехнической стали (см. рис. 3). Такая реализация позволила добиться практически линейной зависимости измеряемого напряжения от положения объекта. Небольшие нелинейности, связанные с неоднородностью материала натянутой ленты, были устранены введением в систему управления цифрового фильтра второго порядка по управляющему сигналу.

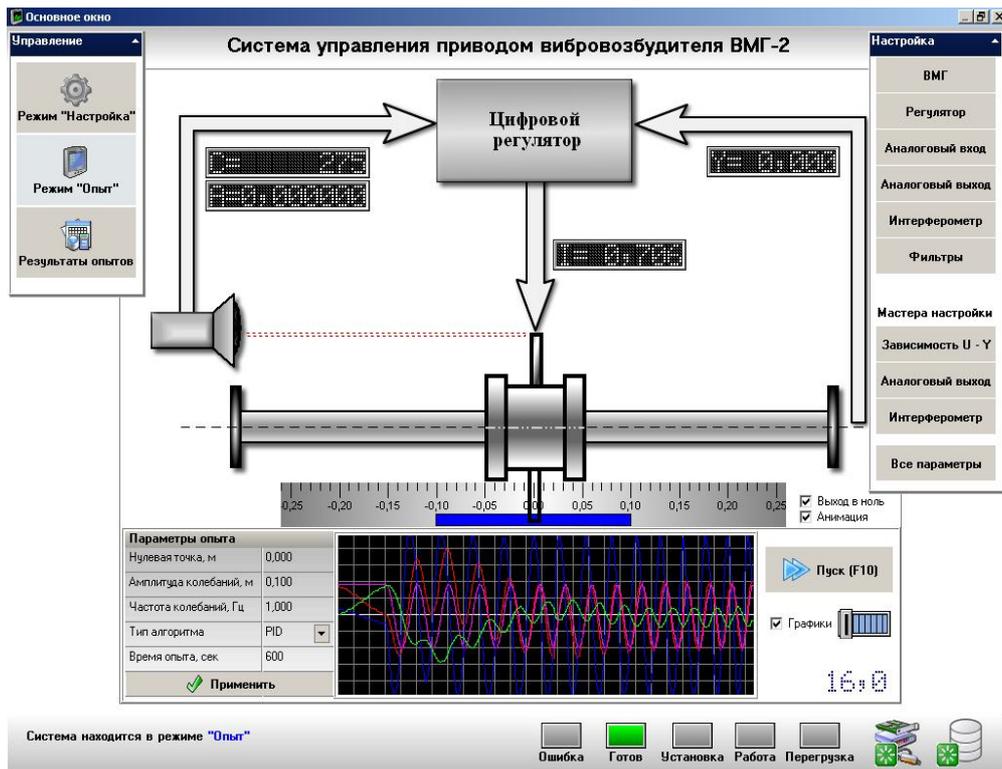


Рис. 5. Внешний вид главного окна программы оператора.

Другая проблема – возникновение резонансных явлений на частотах 0,2-0,4 Гц, вызванных 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.

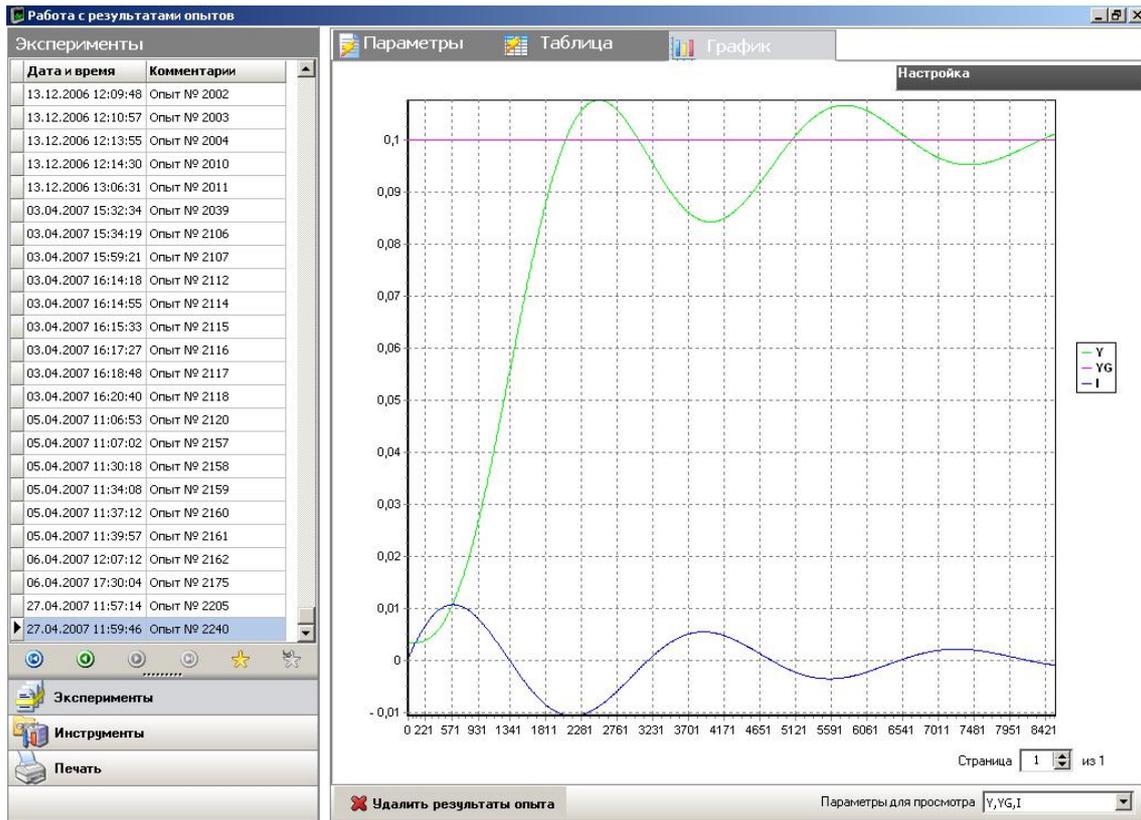


Рис. 6. Окно представления результатов опытов.

Выводы

Успешное внедрение данной системы демонстрирует возможность и целесообразность применения цифровых систем управления для решения подобных задач в различных областях современной техники. Использование цифровой системы позволило значительно упростить процесс настройки регулятора, расширить рабочий диапазон установки, увеличить функциональные возможности и облегчить работу оператора по обслуживанию стенда, за счет применения персонального компьютера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибов А. Н., Журавлев Ю. Н., Мацевич В. Г. Вибровозбудитель низкочастотной вибрации с активной магнитной подвеской подвижной части // Современные проблемы совершенствования средств измерения механических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 77-82.
2. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – Спб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 447 с.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984 – 541 с.

В.А. ИВАНОВ, А.И. МАРКЕВИЧ

РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА

Рассмотрена возможность построения инвертора с использованием силового управляемого LC-колебательного контура. Приведены соотношения между параметрами зарядного и разрядного колебательных контуров, последовательность их работы.

Для электропитания приемников непромышленной частоты на кафедре Электроэнергетики разработан инвертор с использованием силового колебательного контура.

Устройство содержит управляемый выпрямитель 1, соединенный с инвертором 2 через дроссель 3 (рис.1). К выходу инвертора 2 подключена нагрузка через выходной трансформатор