

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 616.12-073.96-7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ  
НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ВЕЛОЭРГОМЕТРА  
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ТОРМОЖЕНИЯ**И.И. ЗАБЕНЬКОВ<sup>1</sup>, В.В. КИКИНЕВ<sup>2</sup>, Д.А. ЕНЬКОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь;<sup>2</sup>Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие "Луч"  
ул. Объездная Дорога, 7, Гомель, 246012, Беларусь*Поступила в редакцию 11 августа 2003*

Описана конструкция и дан теоретический анализ передаточной функции нагрузочного устройства велоэргометра; приведены краткие описания примененного метода измерений и экспериментальной установки, а также сделан анализ полученных результатов.

*Ключевые слова:* передаточная функция, следящая система, велоэргометр.

**Введение**

Велоэргометр представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для задания и поддержания с достаточной точностью и в течение необходимого времени требуемого значения тормозного момента на валу с педалями при его вращении пользователем.

Велоэргометры, использующиеся в медицине (главным образом при диагностике кардиозаболеваний), как правило, имеют нормированные метрологические характеристики и относятся к классу средств измерений.

Данная статья основана на результатах разработки велоэргометра М32–В1, выполненной в 1999 г. в рамках задания 01.19 Государственной научно-технической программы РБ "Диагностика, медицинская техника и оборудование".

**Конструкция и принцип действия нагрузочного устройства**

Как можно заключить из вышеприведенного определения, нагрузочное устройство является основным элементом велоэргометра. Общий вид нагрузочного устройства велоэргометра М32–В1 приведен на рис. 1. Оно состоит из электромагнитного тормоза и датчика тормозного момента. Электромагнитный тормоз включает в себя шестиполюсный индуктор с укрепленными на нем катушками индуктивности и кольцевой массивный якорь; датчик тормозного момента представляет собой изготовленную из алюминия балку ("тензобалку") с установленными на ней двумя парами тензорезисторов, включенных по мостовой схеме.

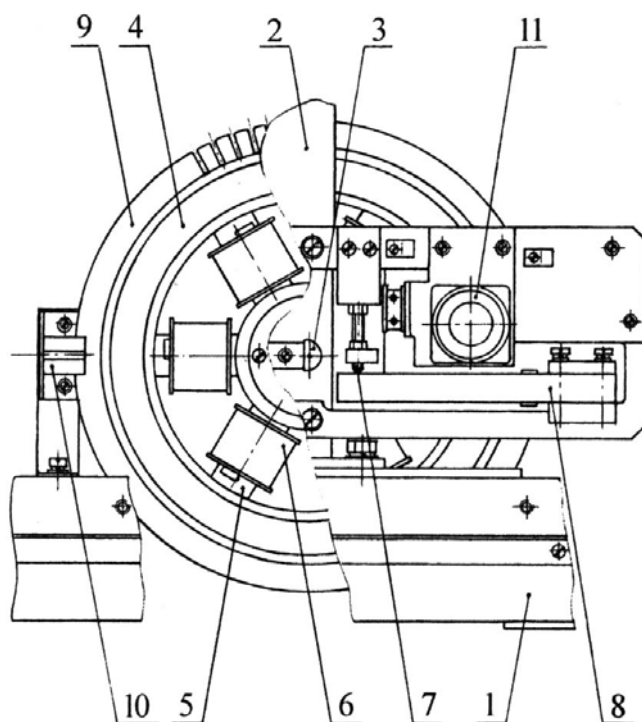


Рис. 1. Общий вид нагрузочного устройства велоэргометра М32-В1: 1 — рама основания; 2 — кронштейн; 3 — ось; 4 — яркость; 5 — индуктор; 6 — катушка индуктивности; 7 — толкатель; 8 — датчик тормозного момента; 9 — диск с прорезями; 10 — датчик числа оборотов; 11 — вентилятор охлаждения тензобалки

Вращение вала с педалями (на рисунке не показан) передается посредством двухступенчатой передачи на яркость, при этом шестидесяти оборотам в минуту вала соответствует семьсот двадцать оборотов в минуту яркости. Индуктор и яркость соосны; вращающийся яркость, взаимодействуя с магнитным полем катушек и тормозясь им, увлекает индуктор за собой с усилием, прямо пропорциональным создаваемому тормозному моменту. Далее это усилие передается посредством толкателя, жестко закрепленного на одном из полюсов индуктора, на тензобалку датчика тормозного момента, деформация (изгиб) которой приводит к разбалансу тензорезистивного моста.

Вся конструкция крепится на кронштейне, который установлен на раме основания велоэргометра. Яркость изготовлен из стали и имеет массу 8,52 кг. На нем крепится диск с шестидесятью прорезями, служащий для определения его (яркости) скорости вращения. Индуктор также изготовлен из стали, его момент инерции составляет 0,002 кг·м<sup>2</sup>. Суммарная индуктивность шести включенных последовательно катушек равна 170 мГн, их суммарное сопротивление постоянному току равно 2,45 Ом. Величина зазора между внутренней цилиндрической поверхностью яркости и наружными поверхностями полюсов индуктора определяющим образом влияет на степень магнитного взаимодействия элементов электромагнитного тормоза при работе [1]. Уменьшение зазора ограничено главным образом технологическими возможностями производства; в данном случае его величина установлена в пределах 0,1–0,15 мм.

Описанная конструкция электромагнитного тормоза позволяет обеспечить необходимые параметры нагрузки, компактна, технологична; вместе с тем исследования макета выявили выраженную зависимость создаваемого тормозного момента от степени нагрева элементов электромагнитного тормоза: при работе макета в течение получаса с установленной на валу с педалями нагрузочной мощностью 360 Вт значение тормозного момента уменьшается приблизительно на треть от первоначального. Это обстоятельство, а также некоторые другие, в частности изменение конфигурации зазора в процессе эксплуатации велоэргометра, делает необходимым организацию автоматической системы поддержания тормозного момента, для расчета которой в свою очередь необходима математическая модель нагрузочного устройства.

## Теоретический анализ передаточной функции

Вращающий момент  $\tau$ , приложенный к индуктору, пропорционален с коэффициентом  $K_\tau$  току через катушки  $i$  (предполагаем магнитный поток постоянным):

$$\tau(t) = K_\tau i(t).$$

Преобразование по Лапласу этого уравнения дает

$$T(s) = K_\tau I(s).$$

При этом очевидно:

$$I(s) = \frac{E(s)}{Ls + R},$$

где  $E(s)$  — изображение напряжения  $e(t)$ , приложенного к катушкам;  $L$  — суммарная индуктивность катушек;  $R$  — суммарное сопротивление катушек постоянному току.

На индуктор также действует момент реакции тензобалки  $\tau_k$ , пропорциональный с коэффициентом  $k$  углу его (индуктора) поворота  $\theta$  и направленный навстречу вращающему моменту:

$$\tau_k(t) = -k \theta(t).$$

Преобразование по Лапласу этого уравнения дает

$$T_k(s) = -k \Theta(s).$$

При работе подобных конструкций всегда имеют место потери энергии на трение, которые можно охарактеризовать демпфирующим моментом  $\tau_D$ , пропорциональным с коэффициентом  $k_D$  угловой скорости индуктора и направленным навстречу вращающему моменту:

$$\tau_D(t) = -k_D \frac{d\theta(t)}{dt}.$$

Преобразование по Лапласу этого уравнения дает

$$T_D(s) = -k_D s \Theta(s).$$

Суммируя моменты сил, действующих на индуктор, получим

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \tau(t) - \tau_k(t) - \tau_D(t) = K_\tau i(t) - k \cdot \theta(t) - k_D \cdot \frac{d\theta(t)}{dt},$$

где  $J$  — момент инерции индуктора. Тогда

$$J s^2 \Theta(s) = K_\tau I(s) - k \Theta(s) - k_D s \Theta(s) = K_\tau \frac{E(s)}{Ls + R} - k \Theta(s) - k_D s \Theta(s),$$

$$(J \cdot s^2 + k_D \cdot s + k) \cdot \Theta(s) = K_\tau \frac{E(s)}{Ls + R},$$

$$\Theta(s) = \frac{K_\tau}{(Js^2 + k_D s + k)(Ls + R)} E(s) = \frac{K_\tau}{JL} \frac{1}{\left(s^2 + \frac{k_D}{J}s + \frac{k}{J}\right) \left(s + \frac{R}{L}\right)} E(s).$$

Выходной сигнал датчика тормозного момента  $u_T$  (ему соответствует изображение  $U_T(s)$ ) в первом приближении пропорционален с коэффициентом  $K_\theta$  углу  $\theta$ :

$$U_T(s) = K\theta \cdot \Theta(s) = \frac{K_\theta K_\tau}{JL} \frac{1}{\left(s^2 + \frac{k_D}{J}s + \frac{k}{J}\right)\left(s + \frac{R}{L}\right)} E(s).$$

Будем считать входной переменной  $e$ , выходной переменной  $u_T$ , тогда для передаточной функции нагрузочного устройства  $G(s)$  можно записать:

$$G(s) = \frac{U_T(s)}{E(s)} = \frac{K_\theta K_\tau}{JL} \frac{1}{\left(s^2 + \frac{k_D}{J}s + \frac{k}{J}\right)\left(s + \frac{R}{L}\right)}.$$

Полученное выражение для  $G(s)$  представляет собой произведение двух передаточных функций: второго порядка с параметром затухания  $\xi = \frac{1}{2} \frac{k_D}{\sqrt{k \cdot J}}$  и частотой резонанса  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}}$  и первого порядка с постоянной времени  $\tau = \frac{L}{R} = \frac{1}{\omega_p}$ , где  $\omega_p$  — частота полюса, обусловленного цепью индуктора.

Обычно известны точные значения  $R$ ,  $L$  и  $k$  (последнее — из расчета датчика тормозного момента); коэффициенты  $K_\tau$ ,  $K_\theta$ ,  $k_D$  и момент инерции индуктора  $J$  могут быть оценены с той или иной степенью точности даже в условиях неспециализированной лаборатории, но более рациональным (и достоверным) представляется непосредственное измерение передаточной функции. Если нагрузочное устройство спроектировано правильно (частота резонанса  $\omega_0$  в несколько раз превышает частоту полюса  $\omega_p$ ), то диапазон частот, в котором производятся измерения, выбирается в пределах  $0,1\omega_p - 10\omega_p$  [2].

### Методика проведения измерений и экспериментальная установка

Для экспериментального определения исследуемой передаточной функции применен квадратурный метод, при котором, как известно, измерительный сигнал, прошедший через исследуемый четырехполюсник, разлагается на две квадратурные (ортогональные) компоненты с последующим их фазочувствительным выпрямлением, фильтрацией и измерением постоянных напряжений, соответствующих каждой компоненте. Модуль и аргумент передаточной функции четырехполюсника рассчитываются на каждой частоте из диапазона измерений.

Для проведения измерений была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой изображена на рис. 2. Установка работает следующим образом. Привод М32-СТ1 (разработанный специально для настройки и испытаний велоэргометров), основными элементами которого являются двигатель постоянного тока и редуктор, вращает с требуемой частотой вал с педалями и, следовательно, якорь электромагнитного тормоза. Необходимое значение тормозного момента задается пропусканием через катушки индуктора тока с выхода усилителя мощности.

В качестве задающего генератора используется комплект стенда измерительного М32-СИ1 [3], включающий ПЭВМ с установленным специализированным программным обеспечением и блок БПД. Стенд М32-СИ1 предназначен главным образом для испытаний и метрологической поверки электрокардиографов, но его программное обеспечение позволяет формировать в требуемом частотном диапазоне (0,2–50 Гц) два гармонических сигнала с постоянной разностью фаз  $\pi/2$ .

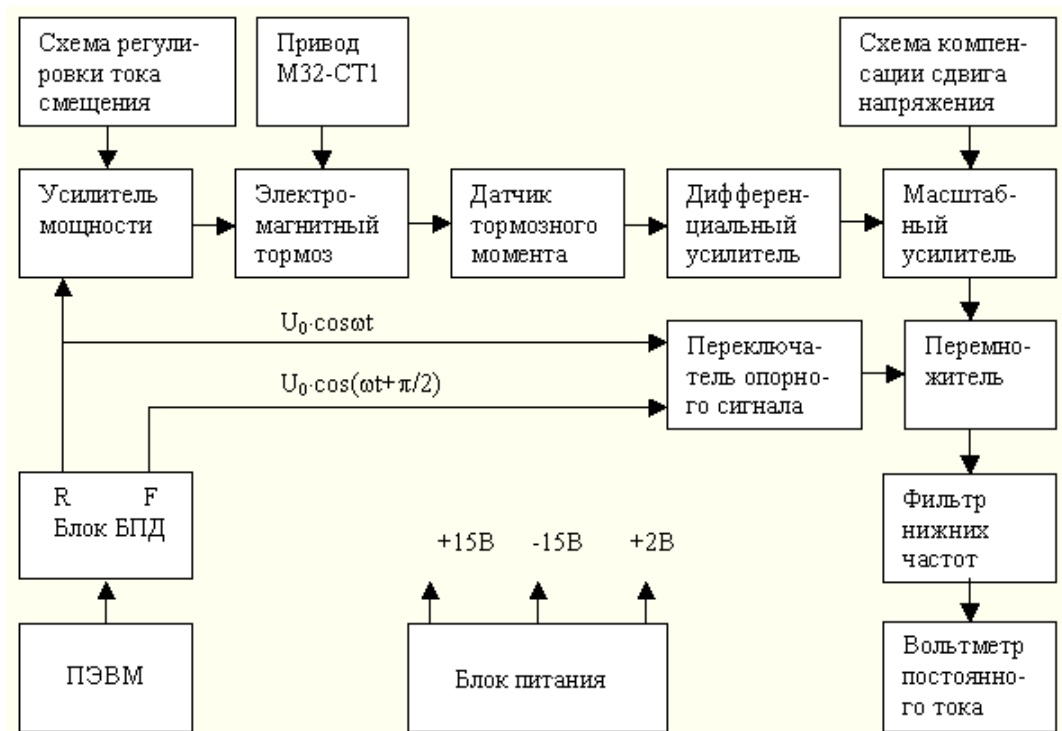


Рис. 2. Структурная схема установки для исследования передаточной функции нагрузочного устройства

Блок БПД представляет собой прецизионный многоканальный цифроаналоговый преобразователь; гармонические сигналы, являющиеся в данном случае опорными, снимаются с его выходов R и F и поступают на переключатель. Путем выбора сигнала (синфазного или сдвинутого на  $\pi/2$ ) производится организация соответствующего измерительного канала. Такое построение экспериментальной установки приводит к увеличению общего времени измерений в два раза, но при этом упрощается схема (нет необходимости в применении еще одного перемножителя, фильтра нижних частот и вольтметра) и устраняется проблема неидентичности каналов.

Сигнал с выхода R блока БПД подается также на вход усилителя мощности, схема которого содержит кроме каскада усиления напряжения и оконечного каскада также схемы регулировки уровня усиливаемого сигнала и регулировки тока смещения – последняя необходима, так как при проведении измерений наряду с гармоническим током через катушки индуктора пропускается постоянный ток ("ток смещения") для устранения эффектов, связанных с перемагничиванием. В результате этого в спектре сигнала, действующего на выходе перемножителя, кроме двух обычных для данного метода измерений компонент (на постоянном токе и на удвоенной частоте задающего генератора  $2\omega$ ) появляется компонента на частоте задающего генератора  $\omega$  как результат взаимодействия постоянного напряжения на измерительном входе перемножителя и гармонического сигнала с частотой  $\omega$  на опорном, поэтому на измерительном входе перемножителя перед подачей гармонического сигнала при проведении измерений производится компенсация постоянного напряжения (установка фильтра верхних частот здесь явно нецелесообразна из-за требуемых больших постоянных времени этого фильтра и неизбежно вносимых им фазовых искажений в низкочастотной области диапазона измерений).

ФНЧ является основным элементом описываемой установки, обеспечивающим требуемое отношение сигнал/ шум при измерении напряжений; он также производит подавление компоненты с частотой  $\omega$  (при неполной компенсации постоянного напряжения на входе перемножителя). Крутизна спада частотной характеристики ФНЧ в полосе подавления составляет 43,5 дБ/ декада (измеренное значение), частота среза равна 0,1 Гц по уровню  $-3$  дБ. Из-за относительно небольшого объема измерений съем показаний производится неавтоматизированным способом; в качестве окончательного устройства применен цифровой вольтметр типа В7-40.

### Результаты экспериментального исследования передаточной функции

Результаты экспериментального исследования передаточной функции нагрузочного устройства приведены на рис. 3 в виде кривых, обозначенных штрих-пунктиром.

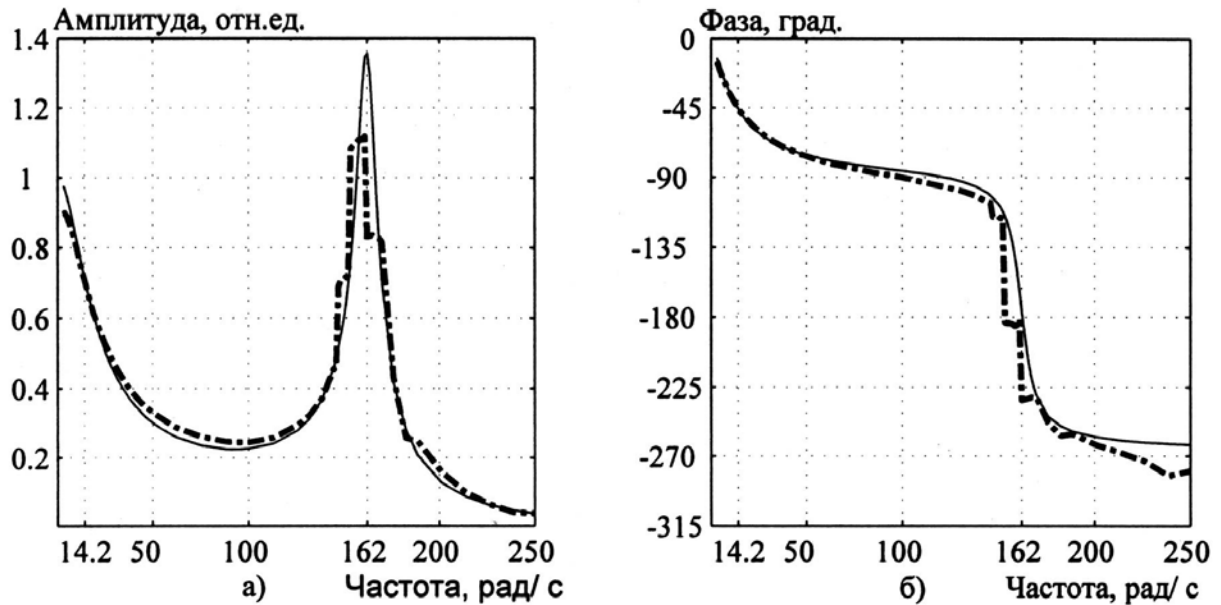


Рис. 3. Частотные характеристики нагрузочного устройства: *a* — АЧХ, нормализованная к значению коэффициента передачи на постоянном токе; *б* — ФЧХ

Анализ позволил выявить следующие основные особенности исследуемой передаточной функции:

- коэффициент передачи на постоянном токе  $G_0=0,000156$  или  $-76,16$  дБ;
- полюс на частоте  $\omega_p=14,2$  рад/с;
- резонанс на частоте  $\omega_0=162$  рад/с с параметром затухания  $\xi \approx 0,032$ ;
- спад АЧХ до пренебрежимо малых значений на частотах  $\omega > 200$  рад/с.

Таким образом, искомое выражение имеет вид

$$G(s)=0,000156 \frac{14,2}{s+14,2} \frac{162^2}{s^2+2 \cdot 0,032 \cdot 162 s+162^2} = \frac{58,1}{s^3+24,6 \cdot s^2+26391,2 s+372664,8}. \quad (14)$$

На рис. 3 кривые, соответствующие выражению (14), изображены сплошной линией.

### Заключение

Проведенный теоретический анализ выявил характер зависимости передаточной функции нагрузочного устройства от параметров (электрических и механических) электромагнитного тормоза и датчика тормозного момента. Эксперимент подтвердил в целом правильность теоретических выводов и позволил определить численные значения коэффициентов в выражении для исследуемой передаточной функции. На основании результатов настоящего исследования был сделан расчет корректора, который обеспечил требуемые параметры качества замкнутой следящей системы поддержания тормозного момента. Полученная математическая модель нагрузочного устройства использовалась также при организации двух других следящих систем велоэргометра — системы поддержания нагрузочной мощности и системы поддержания постоянства частоты сердечных сокращений пациента.

# **STUDY ON TRANSFER FUNCTION OF THE WORKLOAD DEVICE OF THE BICYCLE ERGOMETER EQUIPPED WITH AN ELECTRONICALLY CONTROLLED EDDY CURRENT BRAKE**

I.I. ZABENKOV, V.V. KIKINEV, D.A. ENKOV

## **Abstract**

The structure is described and theoretical analysis of the transfer function is made for the workload device of the bicycle ergometer; the applied method and measurement system are described briefly and the results achieved have been analysed as well.

## **Литература**

1. *Щетинин Т.А.* Электропривод с индукционными муфтами и тормозами. М., 1971.
2. *Филлипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. М., 2001.
3. *Кикинев В.В., Шуляк М.И.* Разработка и изготовление программно-метрологического стенда для аттестации электрокардиографов: Отчет о НИР / Респ. науч.-исслед. УП "Луч". Гомель, 2003. Деп. в БелИСА. 09.04.2003, № Д200325.