

УДК. 531.7

**В.Ю. Ларин**

Национальный авиационный университет, г.Киев

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ****Abstract**

**Larin V.U. The Principles of the building of the differential measuring converter.** In article on the grounds of analytical presentation component schemes of the building of the differential measuring converter for ferromagnetic primary converter of the type FOMP, are shown ways to linearization's of the output feature and compensations forming inaccuracy to account of the using two measuring windings. They Are Given mathematical dependencies and restrictions, realizing principles.

**Keywords:** differential measuring transformer, methods of linearizing, components of charts, mathematical dependences, ferromagnetic primary transformer.

**Анотація**

**Ларін В.Ю. Принципи побудови диференціального вимірювального перетворювача.** У статті на підставі аналітичного представлення компонент схем побудови диференціального вимірювального перетворювача для ферромагнітного первинного перетворювача типу ФоМП показані способи лінеаризації вихідної характеристики і компенсації складових погрешностей за рахунок застосування двох вимірювальних обмоток. Дано математичні залежності й обмеження, що реалізують принципи.

**Ключові слова:** диференціальний вимірювальний перетворювач, способи лінеаризації, компоненти схем, математичні залежності, ферромагнітний первинний перетворювач.

**Аннотация**

**Ларин В.Ю. Принципы построения дифференциального измерительного преобразователя.** В статье на основании аналитического представления компонент схем дифференциального измерительного преобразователя для ферромагнитного первичного преобразователя типа ФоМП показаны способы линейаризации выходной характеристики и компенсации составляющих погрешностей за счет применения двух измерительных обмоток. Даны математические зависимости и ограничения, реализующие принципы.

**Ключевые слова:** дифференциальный измерительный преобразователь, способы линейаризации, компоненты схем, математические зависимости, ферромагнитный первичный преобразователь.

**Введение.**

Эффективность функционирования используемых в настоящее время измерительных приборов параметров сил и их производных существенно зависит от точности и достоверности работы всех преобразовательных звеньев. Методология реализации дифференциального измерительного преобразователя направлена на создание принципов, обеспечивающих принципы получения линейных характеристик измерительной цепи и установления ограничений с целью исключения или компенсации погрешностей. Улучшение метрологических характеристик приборов равносильно повышению качества продуктов производства, что, несомненно, актуально во всех отраслях народного хозяйства.

**Анализ современных систем и приборов.**

Состояние современных научно-методических основ построения измерительных технических средств параметров сил и их производных показывает, что они имеют некоторые нерешенные проблемы, в частности, не уделено должное внимание представлению характеристик преобразовательных элементов и установлению ограничений, накладываемых на них возможностями элементной базы и характеристик объекта [1, 2, 3, 4, 5].

**Цель задачи исследований.**

Обосновать принципы построения дифференциального измерительного преобразователя для улучшения линейной системы преобразований сигналов ферромагнитных первичных преобразователей, используемых в приборах контроля массы и других весо- и силоизмерительных устройствах.

**Изложение основного материала**

Две измерительные обмотки ферромагнитного преобразователя типа ФоМП обеспечивают:

- линейность характеристик преобразования выпрямителей в измерительной цепи;
- начальную установку нулевой отметки в заданной точке характеристики «сила — выходное напряжение»;
- применение дифференциального метода измерений.

Обоснование перечисленных особенностей ФоМП с двумя измерительными обмотками следующее:

1. Спектральная функция выходного напряжения ФоМП. Выходное напряжение ФоМП при силе, действующей на сердечник ФоМП, может быть записано тригонометрическим рядом

$$u(t) = U_0 + \sum_{i=1}^{\infty} U_{m_i} \cos(i\omega t + \varphi_i),$$

где  $U_0$  — постоянная составляющая выходного напряжения ( $U_0=0$ );

$i$  — номер гармоники;

$U_{m_i}$  — амплитуда  $i$ -гармоники;

$\omega=2\pi f$  — угловая частота.

Воспользовавшись интегралом Фурье

$$U(j\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) e^{-j\omega t} dt,$$

по осциллограмме выходного напряжения ФоМП для заданного дискретного значения силы определяется спектр амплитуд  $U(\omega)$ . С этой целью осциллограмма рис. 1. записывается массивом  $G(k)$  для  $k=0$  до  $N$  с шагом  $+1$  для обработки на ЭВМ.

С учетом интервала дискретизации  $\Delta t$  динамическая характеристика выходного сигнала, описанная с помощью интеграла Фурье, записывается в следующем виде:

$$U(j\omega) = \frac{1}{T} \sqrt{\left( \sum_{k=0}^N G(k) \cdot \Delta t \cdot \cos(i\omega \cdot \Delta t \cdot k) \right)^2 + \left( \sum_{k=0}^N G(k) \cdot \Delta t \cdot \sin(i\omega \cdot \Delta t \cdot k) \right)^2}.$$

2. Таким образом, напряжение на входе двухполупериодного выпрямителя не гармоническое и записывается тригонометрическим рядом

$$U(\omega t) = U_{m1} \sin \omega t + U_{m2} \sin 2\omega t + U_{m3} \sin 3\omega t + \dots$$

3. ВАХ диода — нелинейная (рис. 2).

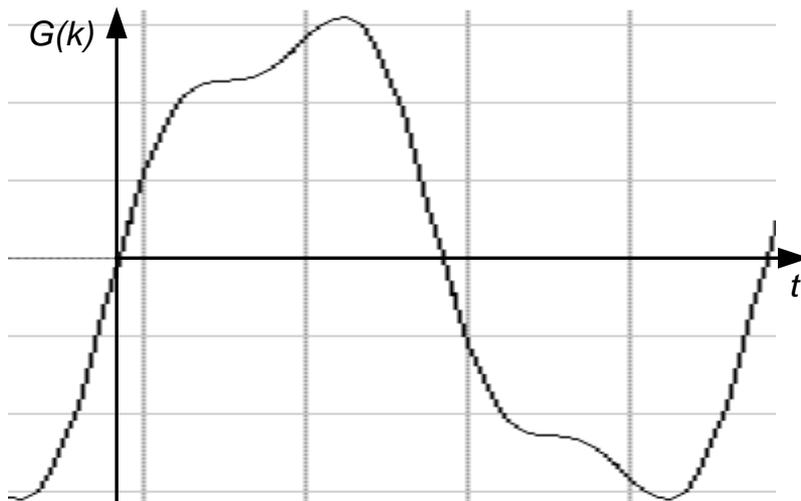


Рисунок 1 — Осциллограмма выходного сигнала ФомП

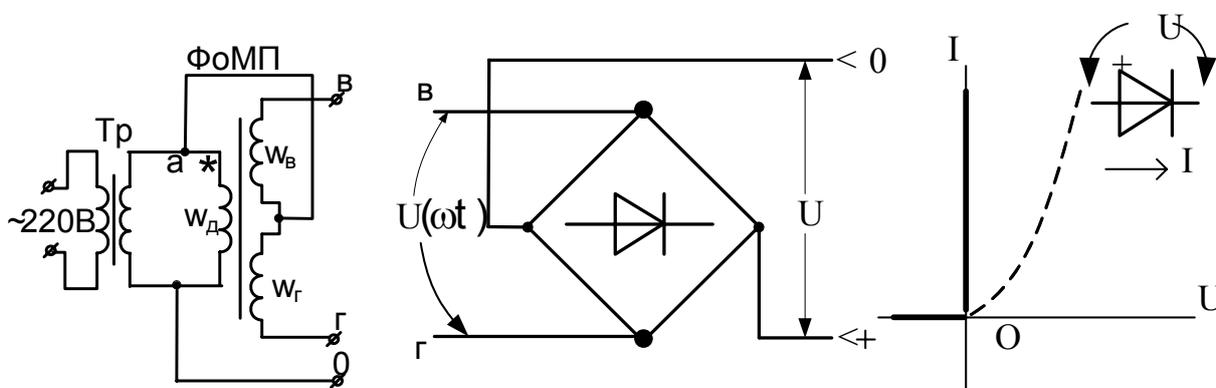


Рисунок 2 — Представление ВАХ диода и двухполупериодного выпрямителя

3. Среднее значение напряжения на выходе выпрямителя:

$$U = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} (U_{m1} \sin \omega t + U_{m2} \sin 2\omega t + U_{m3} \sin 3\omega t) d\omega t - \int_{\pi}^{2\pi} (U_{m1} \sin \omega t + U_{m2} \sin 2\omega t + U_{m3} \sin 3\omega t) d\omega t \right] =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left[ U_{m1} \cos \omega t + \frac{U_{m2}}{2} \cos 2\omega t + \frac{U_{m3}}{3} \cos 3\omega t \right] \Big|_0^{\pi} - \frac{1}{2\pi} \left[ U_{m1} \cos \omega t + \frac{U_{m2}}{2} \cos 2\omega t + \frac{U_{m3}}{3} \cos 3\omega t \right] \Big|_{\pi}^{2\pi}$$

Среднее значение напряжения на выходе двухполупериодного мостового выпрямителя с активной нагрузкой определяется нечетными гармониками напряжения питания от выходных обмоток ФомП. Если в напряжении питания выпрямителя нет четных гармоник, спектр амплитуд напряжения на выходе выпрямителя содержит постоянную составляющую и четные гармоники напряжения (0, 100, 200 и т.д.) Гц. Идеализированная ВАХ полупроводникового диода

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

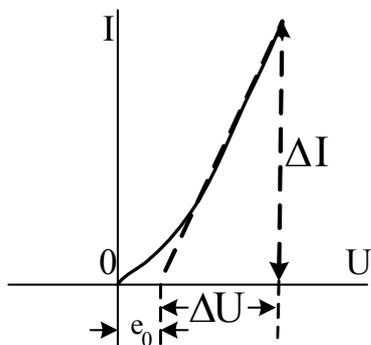
где  $I_0$  — обратный ток насыщения р-п перехода (при неизменной температуре определяются физические свойства полупроводникового материала);

$U$  — напряжение, приложенное к р-п переходу;

$$\phi_m = \frac{kT}{q} \text{ — температурный потенциал;}$$

$q$  — заряд электрона [к].

4. ВАХ полупроводникового диода — нелинейная и аппроксимируется прямой линией (рис. 3).



Для  $U < e_0$  накладывається обмеження області використання характеристики

Для  $U \geq e_0$ :

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

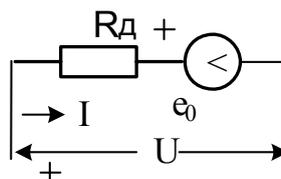
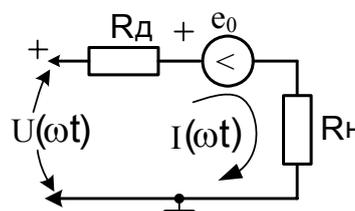
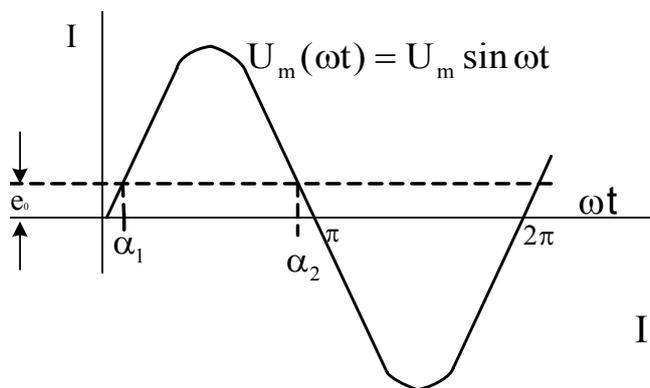


Рис. 3. Электрическая модель диода

5. Ток диода в схеме выпрямителя (рис. 4).



$$I = \frac{U_m \sin \omega t - e_0}{R_d + R_n} \text{ для } \alpha_1 \leq \omega t \leq \alpha_2 t, \quad I(\omega t) = I_m \sin \omega t$$

Рисунок 4 — Определение области линейности тока диода

Если  $U_m$  медленно изменяющаяся во времени в пределах  $U_{m \min} \leq U_m \leq U_{m \max}$ , то ток выпрямителя  $I_{\max}(t)$  можно считать линейной функцией  $U_m(t)$  при выполнении ограничений  $U_{m \min} \gg e_0$ , то есть

$$I_m = \frac{U_m - e_0}{R_d + R_n} = \frac{U_m}{R_d + R_n} = kU_m.$$

Для обеспечения пропорциональности тока  $I_m$  выпрямителя и  $U_m$  ФомП должен иметь две измерительных обмотки.

Требования для измерительной цепи ФомП:

1. Выпрямитель надо по среднему значению выпрямленного напряжения сделать линейной системой относительно входного напряжения.
2. Выпрямитель измерительной цепи ФомП должен быть нагружен активным сопротивлением.

3. Подавлять спектральные составляющие выходного напряжения выпрямителя, сохраняя постоянную составляющую, следует полосовым фильтром низких частот.

4. Фильтр низких частот первого порядка обеспечивает крутизну ската ЛАЧХ 20 дБ/окт, или уменьшение коэффициента передачи в 20 раз при изменении частоты в 100 раз.

5. Фильтр низкой частоты второго порядка обеспечивает крутизну ската ЛАЧХ  $2 \cdot 20 = 40$  дБ/окт, или уменьшение коэффициента усиления в 100 раз при изменении частоты в 100 раз.

Если принять частоту среза 0,5 Гц, то для фильтра первого порядка на частоте  $0,5 \cdot 100 = 50$  Гц первая гармоника напряжения сети будет ослабляться в 10 раз, что вполне допустимо.

Таким образом:

Первый принцип, вызвавший необходимость двух измерительных обмоток ФомП — это обеспечение линейной связи выходного (среднего значения) напряжения выпрямителя. Способ решения: две измерительных обмотки  $W_B$  и  $W_r$  (рис. 5).

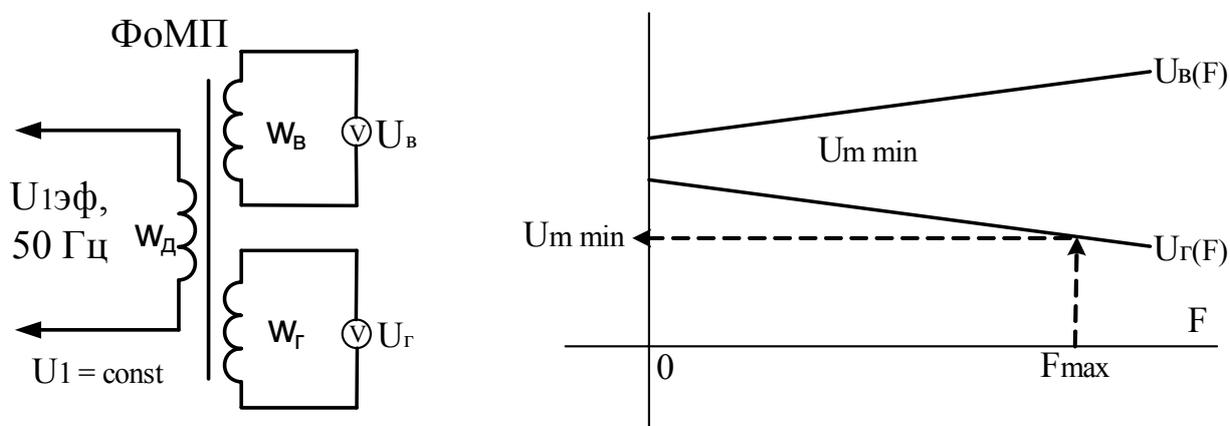


Рисунок 5 — Способ обеспечения линейной связи выходного напряжения выпрямителя

При правильном выборе числа витков обмоток  $W_r$  и  $W_B$  при  $F_{\max}$  можно обеспечить поставленное условие  $U_{m \min} \gg e_0$ .

Рассмотрим измерительную цепь ФомП, представленную на рис. 6

Выпрямители в схеме включены согласно. С помощью резистора  $R_6$  схема может быть начально уравновешенной при заданном значении  $F$ , и в том числе при  $F = 0$ .

Выходное напряжение схемы — среднее значение напряжения, измеряемое вольтметром, будет пропорциональным измеряемой силе при условии линейности характеристик  $U_g(F)$  и  $U_z(F)$ , (рис. 5) или при пропорциональности  $\Delta U = U_g(F) - U_z(F)$  измеряемой силы.

Второй вариант схем измерительной цепи ФомП, обеспечивающих выполнения поставленных требований приведен на рис. 7.

Если при измерениях должно использоваться несколько ФомП и их выходные напряжения должны суммироваться, для обеспечения точности измерений после начального уравновешивания каждого ФомП при нагрузке  $F_{нач}$ , характеристики преобразования каждого ФомП в системе координат с началом в точке  $0_1$  (рис. 8) должны быть одинаковыми.

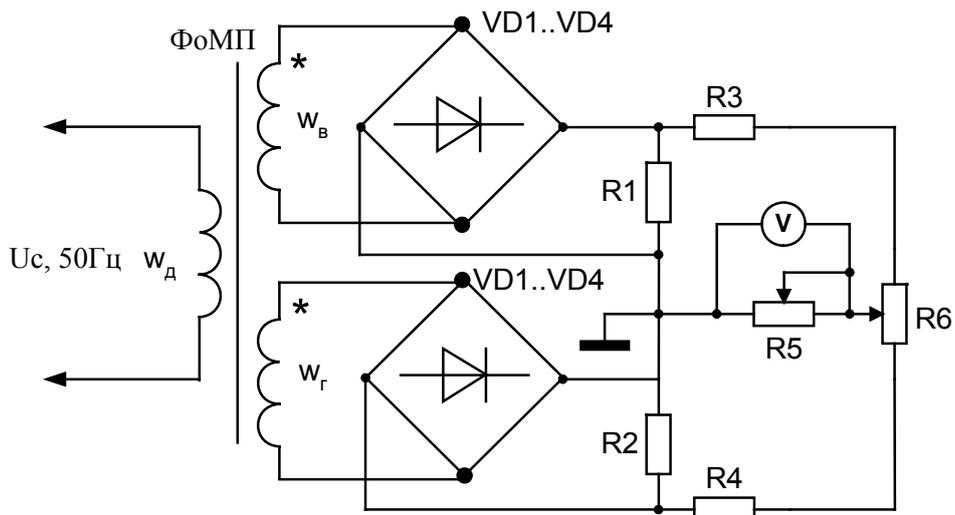


Рисунок 6 — Схема для изменения коэффициентов аппроксимирующих прямых, вариант 1

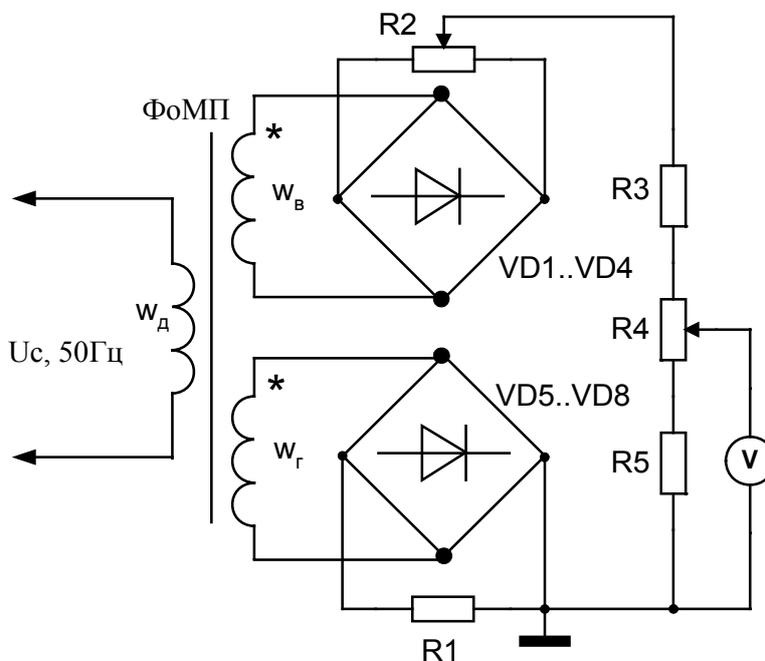


Рисунок 7 — Схема для изменения коэффициентов аппроксимирующих прямых, вариант 2

Второй принцип, вызвавший необходимость двух измерительных обмоток  $W_2$  и  $W_B$  — возможность начального уравнивания измерительной схемы  $\Phi_oMP$ . Если измеряемый вес  $F_u$  находится в таре весом  $F_n$ , воздействие веса  $F_n$  на  $\Phi_oMP$  вызовет выходной сигнал, который в схеме рис. 6 можно скомпенсировать. Это обеспечит два положительных обстоятельства:

1. Можно устранить влияние начального нелинейного участка градуировочной характеристики  $\Phi_oMP$  на погрешности измерений;
2. С помощью соответствующих схемных решений для каждого  $\Phi_oMP$  в системе координат с началом в точке  $0_1$  (рис. 8) можно изменять крутизну преобразования измерительной цепи  $\Phi_oMP$ .

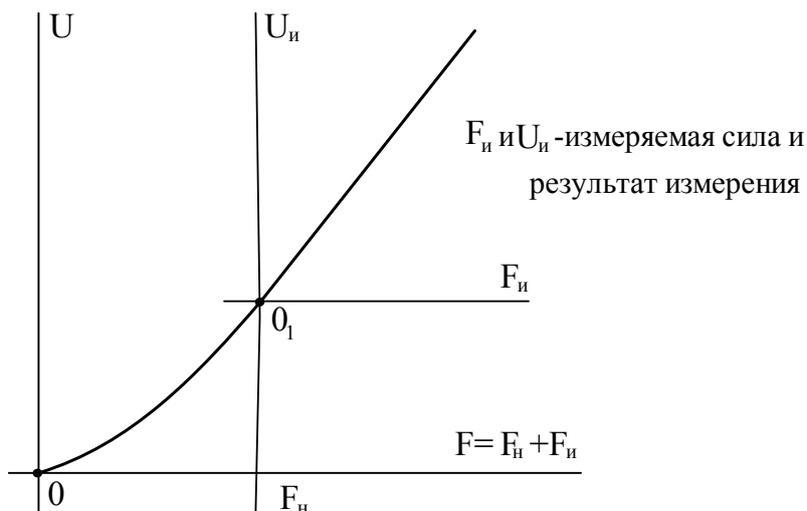


Рисунок 8 — Начальное уравнивание и переход к системе координат с началом в точке  $O_1$

Изменять крутизну характеристики преобразования каждого ФoМП. Если в измерительной цепи используются несколько ФoМП и их выходные напряжения суммируются следующим способом (рис. 9).

Для инвертирующего суммирующего усилителя (рис. 8), если операционного усилителя  $k \rightarrow \infty$ , то при  $U_1 \neq 0$ ;  $U_2 \neq 0$ ;  $U_3 \neq 0$ ;  $U_{a0} \rightarrow 0$ , в таком случае  $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$ ;  $I_2 = \frac{U_2}{R_2}$ ;

$I_3 = \frac{U_3}{R_3}$ ; и  $I = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$ . Модуль выходного напряжения схемы (рис. 8)

$$U_{\text{вых}} = I_1 R_4 = R_4 \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right) = U_1 \frac{R_4}{R_1} + U_2 \frac{R_4}{R_2} + U_3 \frac{R_4}{R_3},$$

где  $\frac{R_4}{R_1}, \frac{R_4}{R_2}, \frac{R_4}{R_3}$  — коэффициенты преобразования (передачи) напряжения по соответствующим входам усилителя (рис. 9).

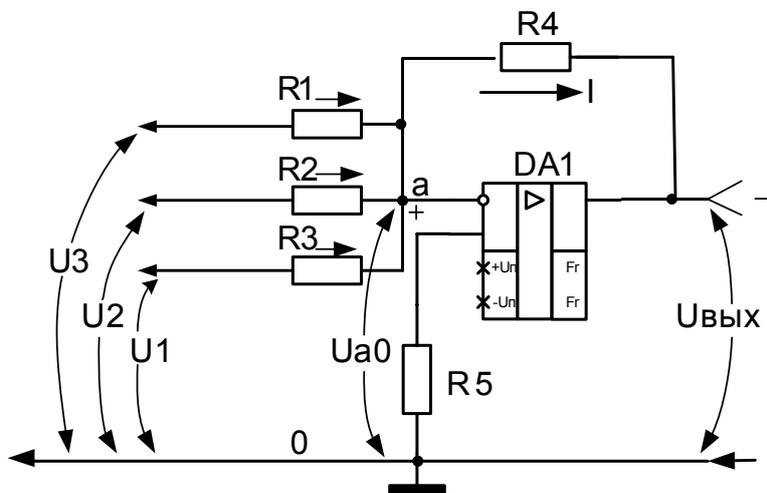


Рисунок 9 — Схема измерительной цепи для суммирования характеристик трех ФoМП

Устанавливая соответствующее отношение сопротивлений, можно регулировать коэффициенты передачи каждого входа усилителя.

На рис. 10 приведена принципиальная электрическая схема измерительной цепи для суммирования выходных напряжений трех ФoМП с измерительными обмотками, соединенными по схеме рис. 10. Резисторами  $R_2, R_5, R_8$  обеспечивают регулировку характеристик преобразования каждого ФoМП, резистором  $R_{15}$  — регулировку крутизны преобразования измерительной цепи.

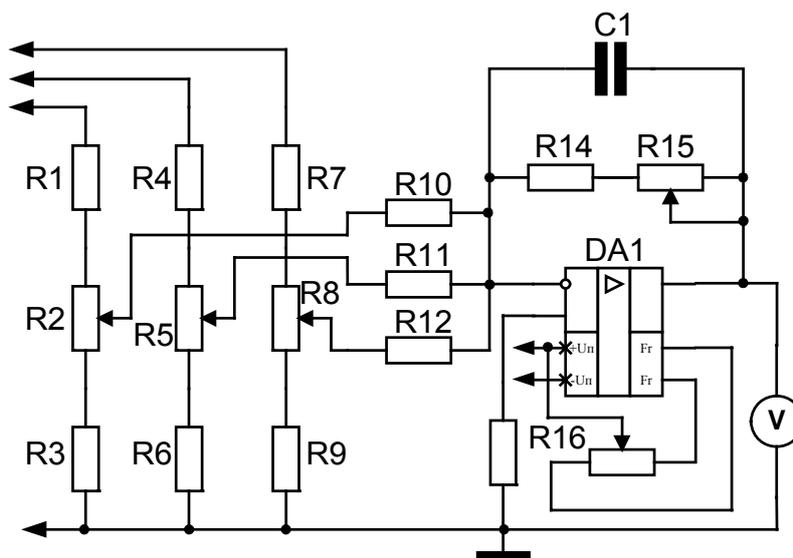


Рисунок 10 — Схема измерительной цепи для суммирования выходных напряжений трех ФoМП

Третий принцип — дифференциальный метод измерений обеспечивает:

- высокую повторяемость результатов измерений одной и той же величины;
- лучшую линейность характеристик преобразования;
- из всех возможных схем лучшую стабильность нулевой отметки.

**Выводы.** 1. Разработаны способы линеаризации компонент схем дифференциального измерительного преобразователя и компенсации составляющих погрешностей.

2. Разработаны математические зависимости и ограничения, реализующие принципы получения линейной системы измерительной цепи ферромагнитного первичного преобразователя типа ФoМП за счет применения двух измерительных обмоток.

### Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков. — М.: Наука, 1971. — 1032с.
2. Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. 3-е издание, переработанное, дополненное. М.: В.Ш., 1986. — 352 с.
3. Чичикало Н.И. Структурно-алгоритмические принципы построения ИИС напряженно-деформированных объектов. — Донецк: РИА ДонГТУ, 1998. — 178с
4. Ларин В.Ю. Основы построения приборов и систем с ферри и ферромагнитными преобразователям. — Донецк: Норд-Пресс, 2007. — 367 с.
5. Бауман Э. Измерение сил электрическими методами. — М.: Мир, 1978. — 430 с.

Здано в редакцію:  
16.03.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Чичикало Н.І.