

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА В НАПРЯЖЕНИЕ С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Кандидат техн.наук, доцент **Сафаров А.М.**
(Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта)
Кандидат техн.наук, доцент **Саттаров Х.А.**
(Ташкентский университет информационных технологий)

DEVICES FOR CONVERTING CURRENT TO VOLTAGE WITH EXTENDED FUNCTIONAL OPPORTUNITIES

Ph. D. (Tech.), Associate Professor **Safarov A.M.**
(Tashkent Institute of Railway Engineering)
Ph. D. (Tech.), Associate Professor **Sattarov K.A.**
(Tashkent University of Information Technologies)

Преобразование тока, несимметричность токовой нагрузки, нелинейность кривого намагничивания, преобразователи тока.

Current conversion, current load asymmetry, nonlinearity magnetization curve, current converters.

В работе предложена конструкция устройства для преобразования тока в напряжение с расширенными функциональными возможностями, предназначенного для выявления несимметричности трехфазных токов как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока. Произведены теоретические исследования зависимости выходного сигнала преобразователя от изменения кривого намагничивания магнитного материала под взаимодействием двух полей, создаваемых модулирующим током, протекающим по модулирующей обмотке, и переменного магнитного поля с напряженностью и создаваемых при протекании постоянного тока по шинам постоянного поля с напряженностью. Показано, что нелинейность зависимости действительно является принципиальным фактором, ответственным за появление э.д.с., несущей информацию об преобразуемом постоянном токе.

In the article proposed the design of the device for converting current into voltage with advanced functionality, designed to detect the asymmetry of three-phase currents in both DC and AC circuits. Theoretical researches of the dependence of output signal of the converter on change in the magnetization curve of magnetic material under the interaction of two fields created by the modulating current flowing through the modulating winding and an alternating magnetic field with intensity and created when direct current flows along the DC field buses with intensity are shown, and it is shown that the nonlinearity of the dependence indeed, it is the principal factor responsible for the emergence of an electrical driving force that carries information about the transformation DC voltage.

Условия эксплуатации систем тягового электро-снабжения характеризуются несимметричностью токов и несинусоидальностью напряжения, вследствие которого в состав устройств автоматического распределения активных и реактивных нагрузок между включёнными в параллельную работу различного силового оборудования (двигателя, генератора, выпрямителя и т.д.), а также разнообразных устройств токовой защиты, должны входить преобразователи тока (ПТ).

Однако питание силового оборудования от несимметричной системы электроснабжения приводит к сокращению их срока службы и досрочного выхода из строя. В этой связи вопросы выявления и уменьшения несимметричности трехфазных токов в системе тягового электроснабжения являются актуальными.

В настоящее время для выявления несимметричности трехфазных токов используются ПТ, имеющие различные конструкции, основанные на различных физических эффектах (на магнитомодуляционном эффекте, эффекте Холла, трансформаторном эффекте и т.д.).

В работе [1] предложено устройство защиты трехфазной нагрузки от обрыва фазы, которое состоит из нагрузки на концах выводов, подключенных к первич-

ным обмоткам трансформатора тока. Обмотки расположены на общем магнитопроводе и соединены в треугольник. Вторичная обмотка трансформатора подключена к реле. Трансформатор тока содержит в цепи первичных обмоток контакты от реле. Кроме того, реле содержит привод с механизмом расцепления. Все узлы совместно образуют так называемое устройство защитного отключения (УЗО).

Недостатком устройства является то, что оно снабжено дополнительно двумя первичными обмотками, а сердечник трансформатора тока охватывает все три обмотки, что приводит к снижению точности определения несимметричности токов в обмотках, а также усложняет монтаж устройства.

Авторами разработано устройство для преобразования тока в напряжение с расширенными функциональными возможностями [2]. Оно предназначено для выявления несимметричности трехфазных токов как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока и для выявления неравномерности токовой нагрузки в параллельных ветвях проводов различного силового оборудования. Конструктивная схема приведена на рисунке 1,а.

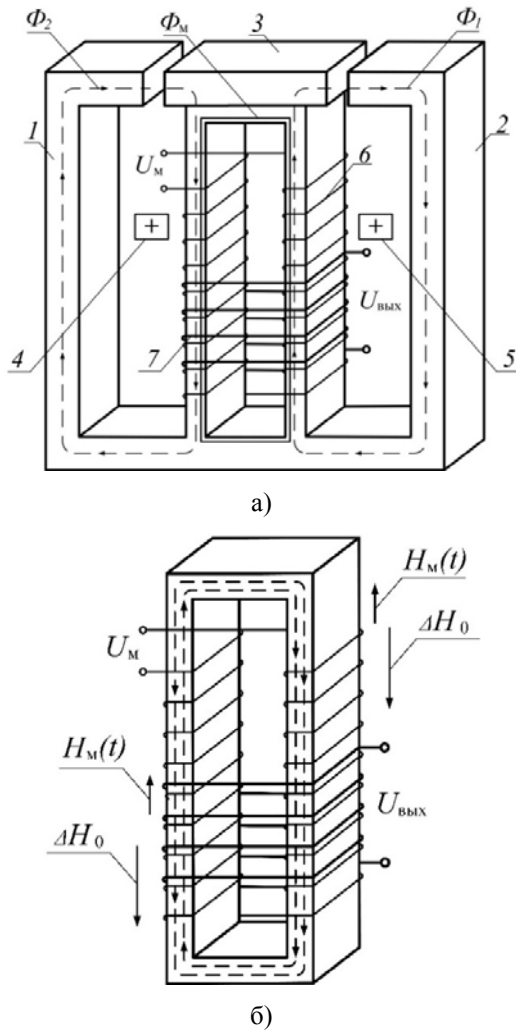


Рис.1. Конструктивная схема

Устройство состоит из крайних стержней 1 и 2, центрального стержня 3 с вырезом, двух токоведущих шин 4 и 5, охваченных этими стержнями, модулирующей обмотки 6, питаемой от источника модулирующего напряжения, и выходной обмотки 7, охватывающей вырез вместе с модулирующей обмоткой.

Принцип работы устройства основан на взаимодействии двух полей: создаваемого модулирующим током, протекающим по модулирующей обмотке 6 переменного магнитного поля с напряженностью $H_M(t)$, и создаваемого при протекании постоянного тока по шинам 4 и 5 постоянного поля с напряженностью ΔH_0 (направления их показаны на рис.1,б). Напряженность постоянного поля определяется как разность напряженностей $H_{0л}$ и $H_{0п}$ (на рис.1,б они не приведены), создаваемых, соответствующими токами шин 4 и 5 в стержне 3. Следовательно, в случае равенства напряженностей $H_{0л}$ и $H_{0п}$ напряженность $\Delta H_0 = H_{0л} - H_{0п} = 0$. В этом случае сигнал на выходе выходной обмотки 7 отсутствует. Однако, как только появляется напряженность ΔH_0 , отличающаяся от нуля, в стержне 3 происходит наложение напряженностей постоянного ΔH_0 и переменного $H_M(t)$ модулирующего токов.

В общем случае суперпозиция напряженностей этих полей в стержне 3 дается выражением [3]:

$$H_{\Sigma}(t) = \Delta H_0 + H_M(t). \quad (1)$$

Вектор магнитной индукции B , действующей внутри намагничиваемых сердечников, можно найти на основе зависимости

$$B = \varphi([H_{\Sigma}]). \quad (2)$$

Здесь φ - вектор функции, описывающей анизотропные и нелинейные свойства сердечников; квадратные скобки указывают на многозначность функции, обусловленную гистерезисными явлениями.

Э.д.с., наводимую в выходной обмотке, можно найти на основе закона электромагнитной индукции:

$$e(t) = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = w_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (3)$$

где w_2 - число витков выходной обмотки; $\Phi = Bs$ - магнитный поток в сердечниках; s - суммарная площадь поперечного сечения сердечников преобразователя.

Если пренебречь явлениями анизотропии и гистерезиса в сердечниках взамен сложной зависимости (2), можно получить простую, учитывающую только нелинейность основной кривой намагничивания $B = f(H_{\Sigma})$.

Модуль мгновенного значения напряженности суммарного поля найдем из выражения (1):

$$H_{\Sigma} = \sqrt{\Delta H_0^2 + 2\Delta H_0 H_M \cos \alpha + H_M^2}, \quad (4)$$

где α - угол между векторами ΔH_0 и H_M .

Рассмотрим работу преобразователя с взаимно параллельными полями, т.е.:

$$\alpha = 0^0, \quad H_{\Sigma} = \Delta H_0 \pm H_M \quad (5)$$

Для этой цели воспользуемся наиболее распространенным на практике магнитным модулятором (феррозондом) с двумя стержневыми сердечниками [4]. При этом будем считать, что вектор ΔH_0 направлен вдоль продольных осей сердечников и что сердечники и охватывающие их обмотки идентичны.

Магнитная индукция в каждом параллельном сердечнике среднего стержня (3) будет равна:

$$\begin{aligned} B' &= f(\Delta H_0 + H_M); \\ B'' &= f(\Delta H_0 - H_M). \end{aligned} \quad (6)$$

Э.д.с., наводимая в выходной обмотке преобразователя, согласно (3) и с учетом (6) составляет:

$$e(t) = w_2 s \frac{d}{dt} (B' + B''), \quad (7)$$

где s - площадь поперечного сечения одного сердечника.

Покажем, что при $\Delta H_0 = const \neq 0$ (постоянное преобразуемое поле) появление э.д.с., $e(t)$, принципиально возможно лишь при наличии нелинейной зависимости $B(H)$.

Предположим обратное, т.е. будем считать эту зависимость линейной: $B = aH$, где a - постоянный коэффициент. Тогда

$$\begin{aligned} B' + B'' &= 2a\Delta H_0; \\ e(t) &= -2asw \frac{d\Delta H_0}{dt} \Big|_{\Delta H_0 = const} = 0. \end{aligned}$$

Теперь аппроксимируем зависимость $B(H)$ укороченным полиномом третьей степени [5,6]:

$$B = aH - bH^3, \quad (8)$$

где a и b - положительные коэффициенты аппроксимации. Тогда с учетом выражения (7) получим:

$$\left. \begin{aligned} B' &= a\Delta H_0 + aH_m - b\Delta H_0^3 - 3b\Delta H_0^2 H_m - 3b\Delta H_0 H_m^2 - bH_m^3; \\ B'' &= a\Delta H_0 - aH_m - b\Delta H_0^3 + 3b\Delta H_0^2 H_m - 3b\Delta H_0 H_m^2 + bH_m^3; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$B' + B'' = 2a\Delta H_0 - 2b\Delta H_0^3 - \frac{6b\Delta H_0 H_m^2}{.} \quad (10)$$

Подчеркнутый в (10) член характерен тем, что содержит произведение напряженностей преобразуемого разностного постоянного и вспомогательного переменного магнитных полей, он как раз и ответствен за появление э.д.с. в выходной обмотке преобразователя:

$$e(t) \Big|_{\Delta H_0 = \text{const} \neq 0} = 6bsw_2 \Delta H_0 \frac{d}{dt} H_m^2(t) \neq 0. \quad (11)$$

Таким образом, нелинейность зависимости $B(H)$ действительно является принципиальным фактором, ответственным за появление э.д.с., несущей информацию о преобразуемом постоянном токе.

Рассмотрим работу преобразователя с взаимно перпендикулярными полями, т.е.:

$$\alpha = 90^\circ, \quad H_\Sigma = \Delta H_0 \pm H_m \quad (12)$$

Для этой цели воспользуемся магнитным модулятором с трубчатым сердечником в виде параллелепипеда (рисунок не показан).

Будем считать, что вектор ΔH_0 направлен вдоль оси трубки, что трубчатый сердечник однороден и что витки измерительной обмотки строго перпендикулярны виткам тороидальной обмотки переменного тока. При выполнении этих условий и при отсутствии измеряемого поля ($\Delta H_0 = 0$) выходная э.д.с. преобразователя будет равна нулю, поскольку равна нулю продольная составляющая магнитной индукции.

При наличии измеряемого поля ($\Delta H \neq 0$) магнитная индукция в сердечнике в соответствии с выражениями (2) и (6) будет

$$B = f(\Delta H_0^2 + H_m^2)^{1/2}.$$

Аппроксимируя зависимость $B(H)$ укороченным полиномом (8), получаем

$$B = a(\Delta H_0^2 + H_m^2)^{1/2} - b(\Delta H_0^2 + H_m^2)^{3/2}.$$

С учетом изотропности сердечника

$$B_{||} / H_{||} = B_{\perp} / H_{\perp} = B / H,$$

где $||$ и \perp - индексы продольных и поперечных составляющих индукции и напряженности поля, находим

$$B_{||} = \Delta H_0 \frac{B}{H} = a\Delta H_0 - b\Delta H_0^3 - \frac{b\Delta H_0 H_m^2}{.} \quad (13)$$

Подчеркнутый в (13) член содержит произведение напряженностей измеряемого постоянного и вспомогательного переменного магнитных полей; он может быть сопоставлен с аналогичным членом выражения (10).

Э.д.с., наводимая в измерительной обмотке преобразователя, будет

$$e(t) \Big|_{H_0 = \text{const} \neq 0} = bsw_2 \Delta H_0 \frac{d}{dt} H_m^2 \neq 0. \quad (14)$$

Таким образом, и для преобразователя с взаимно перпендикулярными полями нелинейность зависимости $B(H)$ является принципиальным фактором, ответственным за появление э.д.с., несущей информацию об преобразуемом токе.

Устройство может быть использовано в качестве первичного датчика при управлении и регулировании равномерности токовой нагрузки параллельных ветвей силового оборудования (двигателя, генератора, выпрямителя и т.д.) как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

При установке предлагаемого устройства в трехфазных цепях переменного тока модулирующие обмотки отключаются от источника. В этом случае напряжение на выходных обмотках будет пропорционально несимметричности токов двух фаз. При симметричном режиме трехфазной цепи напряжение на выходе будет равно нулю.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет преобразовать разность напряжений постоянных токов в переменное напряжение с высокой точностью и надежностью как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

Литература

1. Патент № 2258993. Устройство защиты трехфазной нагрузки от обрыва фазы/ Джус И.Н.//Бюллетень изобретений. -2005, № 23.
2. А.с. № 1019503 (SU). Устройство для преобразования постоянного тока в переменный/ Зарипов М.Ф., Ахраров Н.А., Сафаров А.М., Петрова И.Ю.// Бюллетень изобретений. -1983, №19.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- Москва: Гардарики, 2006. – 701 с.
4. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969. – 166 с.
5. Зарипов М.Ф., Фикс-Марголина И.Г., Вахитова Х.З. Анализ различных методов аппроксимации кривой намагничивания. - РАН УЗ СССР, 1974, № 3.- С. 8–10.
6. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса // Неразрушающий контроль и диагностика. - 2011. - № 2. - С.3-35.

Сведения об авторах

Сафаров Абдурауф Маликович, к.т.н., доцент кафедры “Электроснабжение железных дорог” Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта,

1000167, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Адилходжаев -1
Тел. +998712990444, +998977124025.

E-mail: sattarov.khurshid@mail.ru.

Саттаров Хуршид Абдишукурович, к.т.н., доцент кафедры “Системы энергообеспечения” Ташкентского университета информационных технологий,

1000167, Узбекистан, г. Ташкент, ул. А. Тимура -108
Тел. +9987112386495, +99807888556.

E-mail: sattarov.khurshid@mail.ru.