



UDC 631.33

THE STUDY OF STATIC CHARACTERISTICS OF HIGH CURRENT ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER

Amirov Sulton Fayzullaevich¹, Safarov Abdurauf Malikovich², Rustamov Dilshod Shavkatovich³

¹doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply of Railways of the Tashkent Institute of Railway Engineers, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

Tel: 71 299-07-84;

²candidate of technical sciences, assistant professor of the Department of Power Supply of Railways of the Tashkent Institute of Railway Engineers; Tashkent city, Republic of Uzbekistan

Tel: 97 712-40-25;

³doctor of philosophy (PhD), assistant professor of the Department of Power Supply of Railways of the Tashkent Institute of Railway Engineers, Tashkent city, Republic of Uzbekistan

Tel: 97 712-47-62, E-mail: rustamov_d1976@mail.ru.

Abstract: The results of the study of static characteristics, sensitivity and the degree of non-linearity of the static characteristic of high-current electromagnetic converters are determined, the dependence of the static characteristic on the absolute value of the magnetic field strength of the converted current is shown, the laws of the distribution of magnetic flux in parallel rods and the magnetic voltage between them along the length of the rods are determined, i.e. Mathematical models of modulation magnetic circuits are developed taking into account the distribution of their electrical and magnetic parameters..

Keywords: current transducer, electromagnetic, static characteristic, sensitivity, degree of nonlinearity of static characteristic.

Аннотация: Мақолада электромагнитли катта ток ўзгартгичларининг статик характеристикалари, сезгирлигини ўрганиш натижалари келтирилган ва статик характеристиканинг нозичиқилик даражаси ўзгарттирилувчи токнинг магнит майдони кучланишининг абсолют қийматига боғлиқлиги кўрсатилган, параллел стерженларда магнит оқимлари ва улар орасида стержен узунлиги бўйлаб магнит кучланишлар тақсимланиш қонуниятлари аниқланган, яъни модуляцияловчи магнит занжирларнинг электр ва магнит параметрларининг тарқоқлигини инобатга олинган ҳолда математик моделлари ишлаб чиқилган.

Таянч сўзлар: электромагнитли ток ўзгартгичи, статик характеристика, сезгирлик, статик характеристиканинг нозичиқилик даражаси.

Аннотация: Приведены результаты исследования статических характеристик, чувствительности и определена степень нелинейности статической характеристики электромагнитных преобразователей больших токов, показана зависимость статической характеристики от абсолютного значения напряженности магнитного поля преобразуемого тока, определены законы распределения магнитного потока в параллельных стержнях и магнитного напряжения между ними по длине стержней, т.е. разработаны математические модели модуляционных магнитных цепей с учетом распределенности их электрических и магнитных параметров.

Ключевые слова: преобразователь тока, электромагнитный, статическая характеристика, чувствительность, степень нелинейности статической характеристики.

В современной системе тягового электроснабжения для осуществления мониторинга и диагностики цепей, запуска схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов устройств применяются вторичные системы управления и регулирования, измерения и контроля, релейной защиты и автоматики с различными

преобразователями тока, к которым предъявляют разные требования по основным характеристикам [1,2,3].

Анализ существующих преобразователей тока показал, что наиболее полно этим требованиям отвечают электромагнитные преобразователи тока, использующие гальваномагнитный и магнитомодуляционный эффекты.

Авторами разработано несколько вариантов электромагнитных преобразователей больших токов (ЭМПБТ), один из которых, построенный с использованием гальваномагнитного эффекта, приведен в [4]. Он состоит из двух С-образных магнитопроводов 1 и 2 (рис.1), соединенных между собой ферромагнитными перемычками 3 и 4, параллельность которых обеспечивается с помощью клиньев 5 и 6 из изоляционного материала. ЭХ 7 расположены в воздушном зазоре между перемычками 3 и 4 и соединены между собой последовательно-согласно (рис. 1, б). На магнитопроводах 1 и 2 расположены входные обмотки 8, которые в зависимости от величины преобразуемого тока могут быть выполнены в виде одной шины 9.

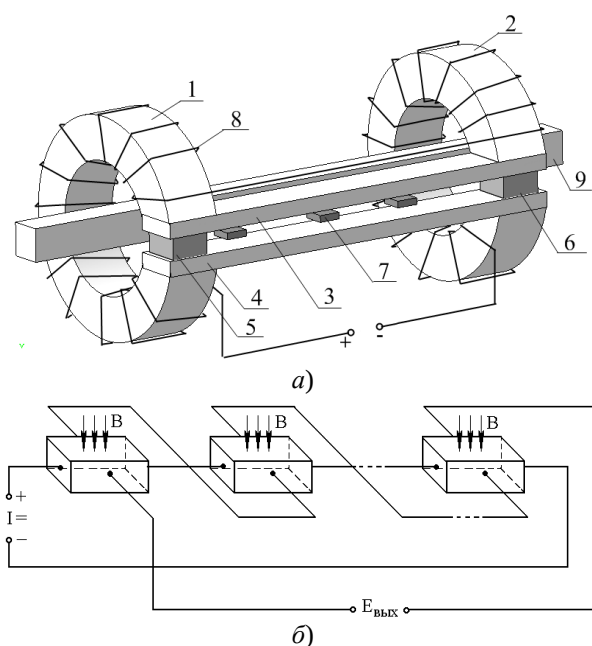


Рис. 1. ЭМПБТ с использованием гальваномагнитного эффекта.

При подаче преобразуемого тока во входные обмотки в С-образных сердечниках создаются МДС $U_{\mu 1}$ и $U_{\mu 2}$, практически равные по величине и встречные по направлению. Под действием этих МДС в магнитопроводах образуются магнитные потоки $Q_{\mu 1}$ и $Q_{\mu 2}$, направленные также взаимно встречно, предотвращающие насыщение магнитопровода 1 и 2. Лишь незначительные части этих потоков $Q_{\mu 01}$ и $Q_{\mu 02}$, величины которых определяются МДС $U_{\mu 1}$ и $U_{\mu 2}$ и магнитным сопротивлением воздушного зазора между ферромагнитными перемычками 3 и 4, замыкаются через воздушный зазор в согласном направлении. Этот магнитный поток $Q_{\mu 0} = Q_{\mu 01} + Q_{\mu 02}$, пропорциональный преобразуемому току, пронизывает ЭХ 7 и в результате этого на выходе ЭХ появляется ЭДС, пропорциональная магнитному потоку $Q_{\mu 0}$, которая определяется по формуле:

$$E_{\text{ВЫХ}} = K_h I_x \frac{Q_{\mu 0}}{S_{\mu \delta}} n. \quad (1)$$

Из последнего уравнения видно, что величина $E_{\text{вых}}$ пропорциональна входному току, а чувствительность определяется количеством ЭХ (n), включенных последовательно.

ЭМПБТ с успехом может применяться для преобразования очень больших, даже сверхбольших токов. Другой вариант ЭМПБТ, построенный с использованием магнитомодуляционного эффекта [5], показан на рис.2. Он состоит из двух С-образных параллельно расположенных секций магнитопровода 1 и 2 с вырезами (в виде стержневой пары) по профилю (рис.2), соединенных между собой двумя ферромагнитными соединительными элементами 3 и 4, выполненными с прямоугольными вырезами (в виде стержневой пары), параллельность которых сохраняется с помощью клинов из изоляционного материала 5 и 6, токопроводящей шины 7, модулирующей обмотки 8, расположенной равномерно на каждой стержневой паре С-образных секций и соединительного элемента, трех измерительных (выходных) обмоток 9, 10, 11, охватывающих одновременно стержневые пары двух С-образных секций и соединительных элементов.

На одном из ферромагнитных соединительных элементов с прямоугольным вырезом (в виде стержневой пары) 3 равномерно намотана модулирующая обмотка 8 (рис.3, а), имеющая два составляющих витка, соединенных между собой последовательно-согласно, питающихся переменным напряжением U_m и создающих модулирующий переменный магнитный поток Φ_m , изменение которого по времени от каждой составляющих витков равно и противоположно по направлению. Поэтому на выходе выходной обмотки 11 не появляется ЭДС.

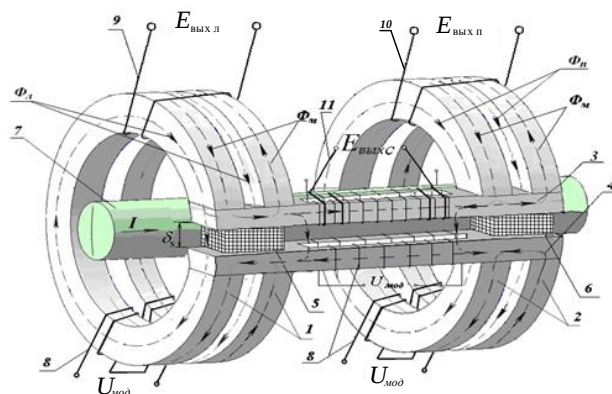


Рис. 2. ЭМПБТ, построенный с использованием магнитомодуляционного эффекта.

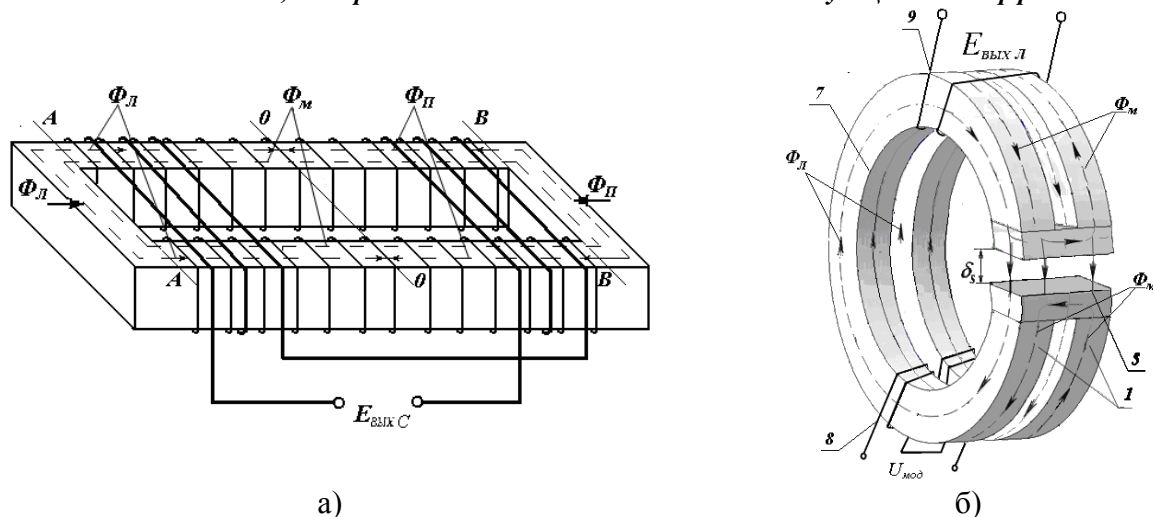


Рис. 3. Расположение модулирующих и измерительных обмоток на стержневых парах соединительных элементов (а) и на С-образных секциях магнитопровода (б)

Аналогичный процесс наблюдается также на двух С – образных магнитопроводах 1 и 2 с вырезами (в виде стержневой пары) по профилю (один из них с модулирующей обмоткой 8 и выходной обмоткой 9 показан на рис.3, б).

ЭМПБТ работает следующим образом. Если по токопроводящей шине 7 пропускается измеряемый постоянный ток I_x , то в левом и правом С-образном магнитопроводах создаются встречно направленные магнитные потоки Φ_L и Φ_Π , которые имеют максимальные значения на отрезках А-А и В-В (там же расположены выходные обмотки 9 и 10), а к середине соединительных элементов 3 и 4 на отрезке О-О – уменьшаются из-за утечки магнитного потока по воздушному зазору. В С-образных магнитопроводах и в центральной части соединительных элементов (на отрезке О-О) эти магнитные потоки равны ($\Phi_L = \Phi_\Pi$) между собой. Выходная обмотка 11 охватывает стержневые пары на двух концах выреза, где имеются разности потоков $\Phi_L - \Phi_\Pi = \Delta\Phi_\Pi$ (отрезок В-В). Направления этих разностных потоков показаны на рис.3, б; по величине они равны ($\Delta\Phi_L = \Delta\Phi_\Pi$) между собой, поскольку на пути потоков Φ_L и Φ_Π одинаковое магнитное сопротивление, как в магнитопроводе, так и по воздушному зазору.

От потоков Φ_L , Φ_Π , $\Delta\Phi_L$ и $\Delta\Phi_\Pi$ в выходных обмотках 9, 10, 11 (обмотка 11 состоит из двух частей, расположенных на отрезках А-А и В-В и соединенных между собой последовательно) преобразователя возникают ЭДС, равные соответственно:

$$E_{\text{вых л}} = K_L I_x; \quad E_{\text{вых п}} = K_\Pi I_x; \quad E_{\text{вых с}} = K_c I_x. \quad (2)$$

где: K_L , K_Π , K_c – коэффициенты преобразования ЭМПБТ соответственно левой и правой С-образных секций и соединительных элементов, которые определяются числом витков выходных обмоток.

По условиям эксплуатации коэффициенты K_L и K_Π могут быть установлены: $K_L = K_\Pi$, $K_L > K_\Pi$ или $K_L < K_\Pi$. ЭМПБТ при отключенном источнике модулирующего напряжения ($U_{\text{мод}} = 0$) может быть использован для преобразования переменного тока (по принципу действия измерительного трансформатора тока). При этом зависимость выходного сигнала от входного в каждой части датчика соответственно будет аналогична выше приведенным выражениям $E_{\text{вых л}}$, $E_{\text{вых п}}$ и $E_{\text{вых с}}$.

В данной работе рассматриваются статические характеристики ЭМПБТ, построенные с использованием магнитомодуляционного эффекта.

Статическая характеристика любого измерительного преобразователя – это зависимость между выходной и входной величинами при установившихся их значениях [3]. Для ЭМПБТ входной величиной является постоянный или переменный ток I_x , а выходной величиной – ЭДС, наводимая в измерительной обмотке.

Для исследования основных характеристик ЭМПБТ, в том числе статической характеристики необходимо определить законы распределения магнитного потока в параллельных стержнях и магнитного напряжения между ними по длине стержней, т.е. необходимо разработать математические модели модуляционных магнитных цепей с учетом распределенности их электрических и магнитных параметров.

В работах [7, 8] получены обобщенные математические модели ЭПБТ, работающих как в модуляционном, так и в трансформаторном режимах, которые положены в основу исследования статических характеристик.

1. *Статическая характеристика.* Среднее значение выходной ЭДС определяется согласно [7] следующим выражением:

$$\begin{aligned}
E_{cp} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} e_m dt = -\frac{2w_u S k_1}{\pi} \times \int_0^{\pi/2} \left[\frac{H'_{mm} \omega \cos \omega t}{1 + (H'_x + H'_{mm} \sin \omega t)^2} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{H'_{mm} \omega \cos \omega t}{1 + (H'_x - H'_{mm} \sin \omega t)^2} \right] dt = -\frac{2w_u S k_1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d(H'_x + H'_{mm} \sin \omega t)}{1 + (H'_x + H'_{mm} \sin \omega t)^2} - \\
&\quad - \frac{2w_u S k_1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d(H'_x - H'_{mm} \sin \omega t)}{1 + (H'_x - H'_{mm} \sin \omega t)^2} = \frac{2w_u S k_1}{\pi} [2 \operatorname{Arctg} H'_x - \\
&\quad - \operatorname{Arctg}(H'_x - H'_{mm}) - \operatorname{Arctg}(H'_x + H'_{mm})].
\end{aligned} \tag{3}$$

С целью упрощения анализа выражения (3) выразим его через относительные единицы. Для этого вводим следующее обозначение:

$$E_0 = \frac{2w_u S k_1}{\pi}. \tag{4}$$

С учетом (4) выражение (3) принимает следующий вид [4]:

$$\begin{aligned}
E_{cp}^* &= \frac{E_{cp}}{E_0} = 2 \operatorname{Arctg} H'_x - \operatorname{Arctg}(H'_x - H'_{mm}) - \\
&\quad - \operatorname{Arctg}(H'_x + H'_{mm}) = f(H'_x, H'_{mm}).
\end{aligned} \tag{5}$$

Выражение (5) является уравнением статической характеристики разработанного ЭМПБТ.

Анализ выражения (5) показывает, что каждому значению тока модуляции I_m , и, следовательно, H'_{mm} соответствует определенное максимальное значение выходной ЭДС в функции $E_{max}^* = f(H'_x)$ при $H'_{mm} = \text{const}$. При этом меняя значения тока в модуляционных обмотках, можно получить семейство статических характеристик ЭМПБТ. Чтобы определить значения E_{max}^* необходимо исследовать функцию преобразования (5) на максимум, т.е.

$$\frac{dE_{cp}^*}{dH'_x} = \frac{2}{1+H'^2_x} - \frac{1}{1+(H'_x-H'_{mm})^2} - \frac{1}{1+(H'_x+H'_{mm})^2} = 0. \tag{6}$$

Отсюда находим:

$$H'_{xmax} = \pm \frac{\sqrt{3} \sqrt{H'^2_{mm} + 1}}{3}. \tag{7}$$

Подставляя (7) в (6), имеем

$$\begin{aligned}
E_{cp,max}^* &= 2 \operatorname{Arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{3} \sqrt{H'^2_{mm} + 1}}{3} \right)' - \operatorname{Arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{3} \sqrt{H'^2_{mm} + 1}}{3} - \right. \\
&\quad \left. - H'_{mm} \right) - \operatorname{Arctg} \left(\pm \frac{\sqrt{3} \sqrt{H'^2_{mm} + 1}}{3} + H'_{mm} \right).
\end{aligned} \tag{8}$$

Следует отметить, что функция $E_{max} = f(H'_x, H'_{mm})$ несет полную информацию об преобразуемом токе, так как H_x функционально связан с преобразуемым током I_x [9].

Подставляя значений H_x и H_{mm} в соответствии с [10,11] в выражение (8) можно построить семейство статических характеристик разработанного ЭМПБТ, работающего в режиме магнитомодуляционного датчика постоянного тока при различных значениях H'_{mm} . На рис. 4 приведено семейство этих статических характеристик, построенных для одной секции С – образных магнитопроводов [12].

Анализ полученных статических характеристик ЭМПБТ свидетельствует о том, что с увеличением тока модуляции I_m , а, следовательно и H'_{mm} , максимальное значение E^* на статической характеристике увеличивается и смещается на графике в сторону увеличения абсолютного значения H'_x . При этом каждому значению H'_{mm} соответствует определенное

значение $H'_{x\max}$, при котором $E^*_{\text{ср}}$ имеет максимальное значение. Расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами составляет 8-13 %.

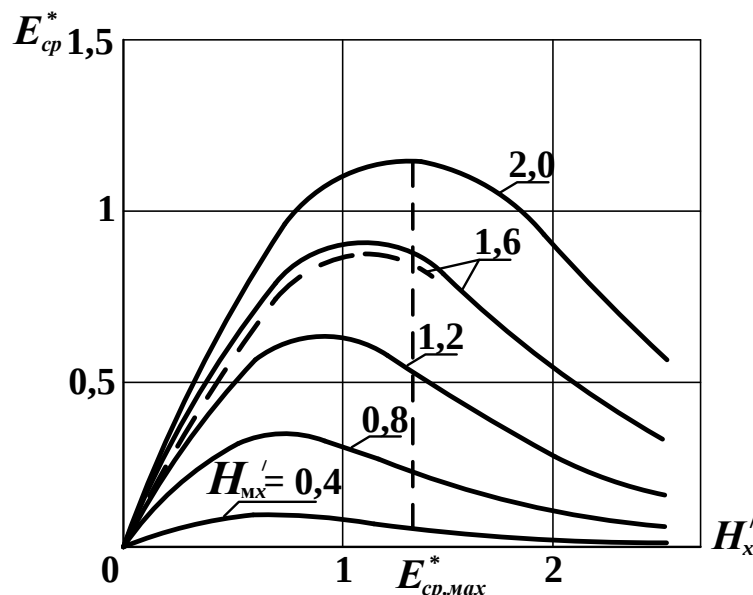


Рис. 4. Семейство статических характеристик разработанного ЭМПБТ при различных значениях $H'_{\text{мм}}$: сплошные – теоретические; пунктирная – экспериментальная.

2. *Чувствительность ЭМПБТ.* Одной из основных характеристик ЭМПБТ является его чувствительность. Различается средняя и текущая чувствительность. Если разделить выражение статической характеристики (5) на H'_x , то получим уравнение средней чувствительности [6], т.е.:

$$S_{\text{ср}} = \frac{E^*}{H'_x} = \frac{1}{H'_x} [2 \text{Arctg} H'_x - \text{Arctg} (H'_x - H'_{\text{мм}}) - \text{Arctg} (H'_x + H'_{\text{мм}})]. \quad (9)$$

Если взять производную от выходной ЭДС E^* ЭМПБТ по входной величине H'_x , то будем иметь уравнение текущей чувствительности [3], т.е.:

$$S_{\text{т}} = \frac{dE^*}{dH'_x} = \frac{2}{1 + H'^2_x} - \frac{1}{1 + (H'_x - H'_{\text{мм}})^2} - \frac{1}{1 + (H'_x + H'_{\text{мм}})^2}. \quad (10)$$

На рис. 5 и рис. 6 приведены кривые средней и текущей чувствительности исследуемого ЭМПБТ при разных значениях $H'_{\text{мм}}$, построенных на основе полученных выражений (9) и (10).

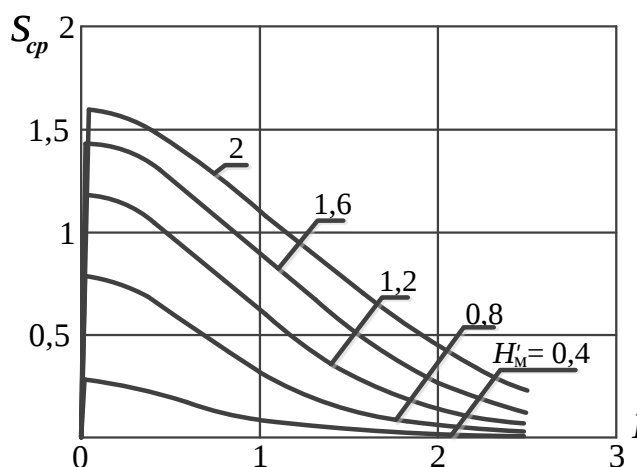


Рис. 5. Кривые средней чувствительности ЭМПБТ при разных значениях $H'_{\text{мм}}$.

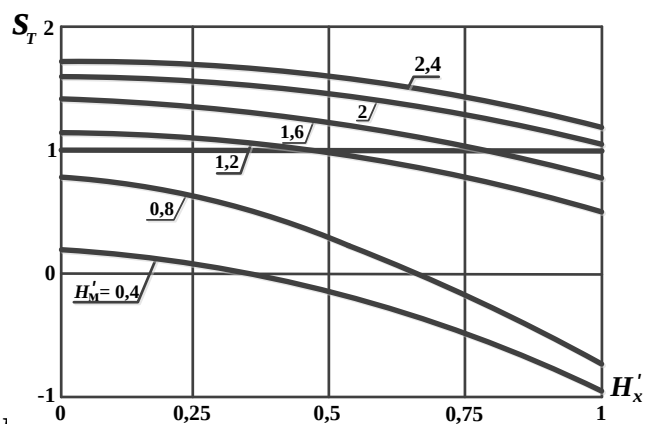


Рис. 6. Кривые текущей чувствительности ЭМПБТ при разных значениях $H'_{\text{мм}}$.

Анализ этих кривых показывает, что при определенных значениях H'_{mm} и фиксированных значениях H'_{mm} средняя и текущая чувствительность имеют максимумы.

3. *Степень нелинейности статической характеристики ЭМПБТ.* Согласно [4], под степенью нелинейности рассматриваемого участка статической характеристики измерительного преобразователя понимается отношение максимального отклонения ординаты характеристик от аппроксимирующей на этом участке её прямой ко всему диапазону изменения ординаты на этом же участке (рис. 7). Величина степени нелинейности будет зависеть от метода аппроксимации рассматриваемого участка статической характеристики. Наибольшее распространение получили три аналитических метода определения степени нелинейности статической характеристики [4]. Мы в данной работе воспользуемся методом, который является наиболее точным для функций, симметричных относительно начала координат, каковыми являются статические характеристики исследуемых ЭМПБТ.

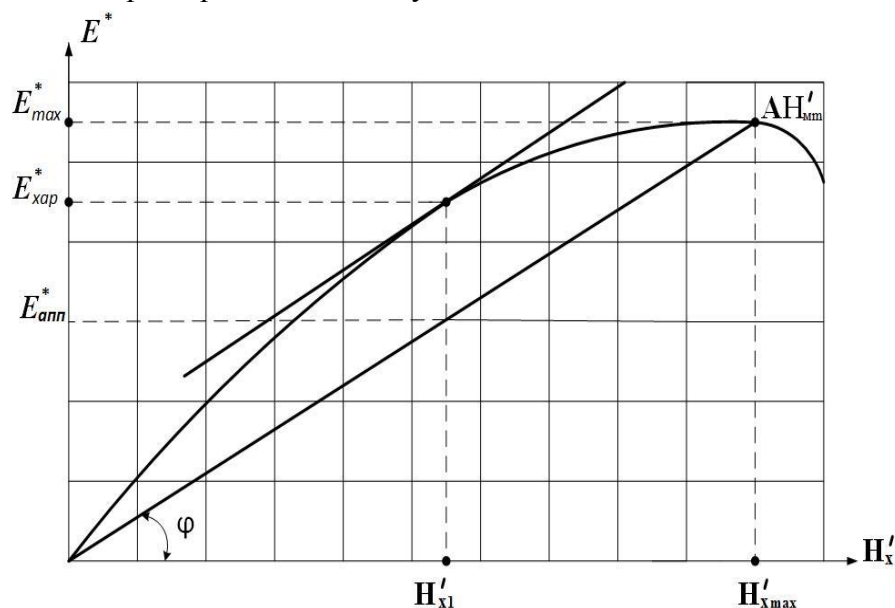


Рис. 7. К определению степени нелинейности статической характеристики разработанных ЭМПБТ.

Согласно этому методу степень нелинейности определяется из следующего выражения (рис 5):

$$\varepsilon, \% = \frac{E_{хар}(H'_{x1}) - k \cdot H'_{x1}}{2E_{max}(H'_{xmax})} 100, \quad (11)$$

где $E_{хар}(H'_{x1})$ – значение выходной ЭДС в точке статической характеристики, где отклонение по ординатам статической характеристики и аппроксимирующей её прямой имеет максимальное значение; $E_{max}(H'_{xmax})$ – максимальное значение выходной ЭДС ЭМПБТ, соответствующее максимальному значению H'_{xmax} ; $E_{апп}(H'_{x1}) = kH'_{x1}$ – уравнение аппроксимирующей прямой статической характеристики ЭМПБТ; $k = \frac{E_{апп}(H'_{x1})}{H'_{x1}} = \frac{E_{хар}(H'_{xmax})}{H'_{xmax}} = \tan \varphi$ коэффициент, характеризующий угол наклона аппроксимирующей прямой.

Значения $E_{хар}(H'_{x1})$, $E_{max}(H'_{xmax})$ и $E_{апп}(H'_{x1})$ соответственно равны:

$$E_{max}(H'_{x1}) = 2\text{Arctg}(H'_{xmax}) - \text{Arctg}(H'_{xmax} - H'_{mm}) - \text{Arctg}(H'_{xmax} + H'_{mm}), \quad (12)$$

$$E_{апп}(H'_{x1}) = H'_{x1} \frac{E_{хар}(H'_{xmax})}{H'_{xmax}} = \frac{H'_{x1}}{H'_{xmax}} [2\text{Arctg}H'_{xmax} - \text{Arctg}(H'_{xmax} - H'_{mm}) - \text{Arctg}(H'_{xmax} + H'_{mm})], \quad (13)$$

$$E_{хар}(H'_{x1}) = 2\text{Arctg}H'_{x1} - \text{Arctg}(H'_{x1} - H'_{mm}) - \text{Arctg}(H'_{x1} + H'_{mm}). \quad (14)$$

Подставляя (10)–(12) в (9), получим следующее выражение степени нелинейности статической характеристики ЭМПБТ[3]:

$$\varepsilon, \% = \left\{ \frac{2 \operatorname{Arctg} H'_{x1} - \operatorname{Arctg}(H'_{x1} - H'_{mm}) - \operatorname{Arctg}(H'_{x1} + H'_{mm})}{[2 \operatorname{Arctg} H'_{x\max} - \operatorname{Arctg}(H'_{x\max} - H'_{mm}) - \operatorname{Arctg}(H'_{x\max} + H'_{mm})]} - \frac{H'_{x1}}{2H'_{x\max}} \right\} \cdot 100. \quad (15)$$

Координату H'_{x1} , при которой отклонение по ординате статической характеристики от аппроксимирующей её прямой имеет максимальное значение, можно определить графическим способом путем проведения касательной к кривой статической характеристики, параллельной к аппроксимирующей прямой ОА. После подстановки в уравнение (13) значения H'_{x1} , $H'_{x\max}$, и H'_{mm} , можно получить значение $\varepsilon, \%$. Например, для статической характеристики с $H'_{x1} = 0,7$, $H'_{x\max} = 1,3$ и $H'_{mm} = 1,6$ степень нелинейности будет $\varepsilon, \% = 2,45 \%$, что допустимо для исследуемых ЭМПБТ.

Исследование статических характеристик разработанных ЭМПБТ показало, что с увеличением амплитуды напряженности магнитного поля модуляции (максимальное значение выходной ЭДС) на статической характеристике увеличивается и смещается на графике в сторону увеличения абсолютного значения напряженности магнитного поля (преобразуемого тока), причем каждому значению соответствует определенное значение, при котором имеет максимальное значение.

Исследованием статических характеристик разработанных ЭМПБТ показало, что с увеличением амплитуды напряженности магнитного поля модуляции (H_{mm}) максимальное значение выходной ЭДС (E^*) на статической характеристике увеличивается и смещается на графике в сторону увеличения абсолютного значения напряженности магнитного поля (H_x) преобразуемого тока, причем каждому значению H_{mm} соответствует определенное значение $H_{x\max}$, при котором E^* имеет максимальное значение.

References:

1. Kazakov M.K. Using the current law in discrete form for measuring high direct currents // Electrical Technology. – 1997.- № 3. (Elsevier Science Ltd, Great Britain).
2. Zykin F.A., Kazakov M.K. Development of precision measuring transducers of high direct currents // Tez.nauch. -tehn. sem. «Problemy' e'nergetiki i puti ih resheniya». -Barselona(Ispaniya),1997.
3. Artenev B.G., Poverka I kalibrovka sretstv izmereniy/ Artenev B.G., Lukashev Y. E. - M.: Standartinform, 2006. – 406 s.
4. A.S. № 847464.Ustroystvo dlya preobrazovaniya postoyannogo tokav peremenniy/ Axrarov N.A., Safarov A.M.// Opubl., 15.07.81.Byulleten №26.
5. Patent RUz. №04217. Ustroystvo dlya preobrazovaniya toka/ Amirov S.F., Safarov A.M.,Turdibekov K.X.,Rustamov D.SH.,Xushbokov B.X.// Ofitsialnyy vestnik, 2010. - №8.
6. Atamalyan E.G. Pribori i metodi izmereniya elektricheskix velichin: Uchebnoe posobie. – Moskva: Drofa, 2005. – 415 s.
7. Amirov S.F., Ataullaev N.O., Rustamov D.SH. Sticheskie karakteristiki magnitomodulyatsionnix datchikov toka// Kimyoviy texnologiya. Nazorat va boshqaruv. – Tashkent, 2011 – № 5. – S. 36-41.
8. Safarov A.M., Rustamov D.SH. Analiz staticheskoy karakteristiki elektromagnitnix preobrazovateley postoyannogo toka metodom parametriceskoy strukturnoy sxemi //Resursoberegayushie texnologii na jeleznodorojnom transporte: Sb. nauch. trud. resp. nauchno-texnicheskoy konferensii s uchastiem zarubejnix uchenix. – Tashkent, 2007. – S. 40-42.
9. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., CHEchurin V.L. Teoreticheskie osnovy elektrotexniki: V 3-x t. Uchebnik dlya vuzov. Izd. 4-e – Sankt-Peterburg: Piter, 2006. – tom 1(464 s),tom 2(576 s),tom 3(384 s).
10. Nazarov F.D. Mnogofaznie elektromagnitnie preobrazovateli toka v napryajenie dlya sistem upravleniya ustroystvami elektrosnabjeniya: avtoref. diss. ... k.t.n., Tashkent, TGTU, 2012. - 25 s.
11. Safarov A.M., Rustamov D.SH. K raschetu staticheskoy karakteristiki elektromagnitnogo preobrazovatelya postoyannogo toka // Resursoberegayushie texnologii na jeleznodorojnom transporte: Tez. dokl. Resp. nauchno–texnicheskoy konferensii s uchastiem zarubejnix uchenix. –Tashkent, 2010 – S. 149-151.
12. Rustamov D.SH. Induksionnie datchiki bolshix tokov dlya sistem upravleniya ustroystvami tyagovogo elektrsnabjeniya: dis. d.f. (PhD) – Tashkent, TashGTU, 2018. – 142 s.