

ВОПРОСЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Кандидат техн. наук, доцент **Сафаров А.М.**
(Ташкентский государственный транспортный университет)
Кандидат техн. наук, доцент **Саттаров Х.А.**
(Ташкентский университет информационных технологий)
Доцент **Жураева К.К.**
(Ташкентский государственный транспортный университет)

ISSUES OF CALCULATION OF THE MAGNETIC CIRCUIT OF CURRENT CONVERTERS FOR DEVICES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF ELECTRICAL TRANSPORT

Ph.D. (Tech.), Associate Professor **Safarov A.M.**
(Tashkent State University of Transport)
Ph.D. (Tech.), Associate Professor **Sattarov Kh. A.**
(Tashkent University of Information Technologies)
Associate Professor **Jurayeva K.K.**
(Tashkent State University of Transport)

Расчет магнитной цепи, электромагнитный преобразователь тока, система электроснабжения, электрический транспорт, магнитный поток, магнитное напряжение, коэффициент затухания, степень нелинейности магнитного потока.

Calculation of magnetic circuit, electromagnetic current converter, power supply system, electrical transport, magnetic flux, magnetic voltage, attenuation coefficient, degree of nonlinearity of magnetic flux.

В статье рассматриваются вопросы расчета магнитной цепи электромагнитных преобразователей токов бесконтактного типа, основанные на магнитомодуляционном эффекте. Получены аналитические выражения магнитной цепи ферромагнитных соединительных элементов с преобразуемым током разработанного преобразователя тока. Показано, что магнитное напряжение вдоль магнитной цепи непостоянно и имеет минимальное значение в точке магнитной нейтрали, а магнитный поток распределен нелинейно и меняет свой знак в точке магнитной нейтрали. При этом степень нелинейности магнитного потока и непостоянства магнитного напряжения возрастает с увеличением коэффициента затухания магнитного потока.

The article deals with the calculation of the magnetic circuit of contactless electromagnetic current converters based on the magnetomodulation effect. Analytical expressions of the magnetic circuit of ferromagnetic connecting elements with the converted current of the developed current converter are obtained. It is shown that the magnetic voltage along the magnetic circuit is unstable and has a minimum value of the magnetic neutral, and the magnetic flux is distributed non-linear and changes its sign at the magnetic neutral point, with the increase of the damping coefficient of the magnetic flux of the impermanence of magnetic tension and the degree of nonlinearity of the distribution of magnetic flux along the length of the magnetic circuit increases.

Система энергообеспечения электрического транспорта состоит из ряда важных элементов, без которых невозможно создание вспомогательных цепей измерения и контроля, управления и регулирования, защиты и автоматики. Одним из таких элементов является преобразователь (датчик) тока.

Данная статья посвящена исследованию основных характеристик с учетом нелинейности кривой намагничивания магнитных материалов, используемых в качестве магнитных цепей электромагнитных преобразователей тока [1,2,3].

Идеальный преобразователь тока должен обладать рядом особенностей: обеспечивать безопасность обслуживающего персонала, т.е. гальваническую развязку, возможность измерять как постоянный, так и пере-

менный токи с высокой точностью для широкого диапазона измеряемого тока. Наиболее распространенные технологии не позволяют создать устройство для преобразования тока, отвечающее этим требованиям, а их разработка является актуальной проблемой. Авторами разработаны несколько вариантов преобразователей тока [4], основанных на магнитомодуляционном эффекте [5].

Для этого выделим фрагмент модулируемой части преобразователя (рис.1), для которого необходимо найти аналитические выражения, связывающие между собой магнитный поток в ферромагнитном элементе и магнитные напряжения вдоль длины этого элемента, создаваемые преобразуемым током I_x .

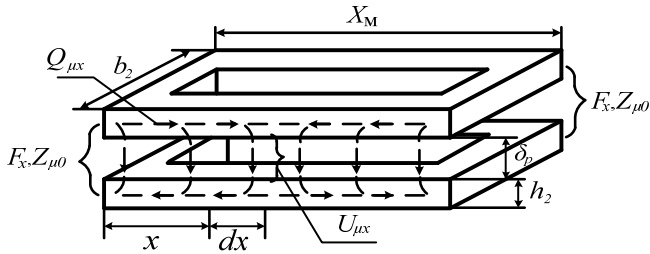


Рис. 1. Фрагмент модулируемой части преобразователя

Для расчета данной магнитной цепи используем метод наложения, т.е. сначала определим частные значения магнитных потоков и напряжений, создаваемых отдельно от левого и правого источников МДС, а потом алгебраическим сложением находим общие их значения [6,7].

Схема замещения фрагмента магнитной цепи преобразуемого тока приведена на рис.2.

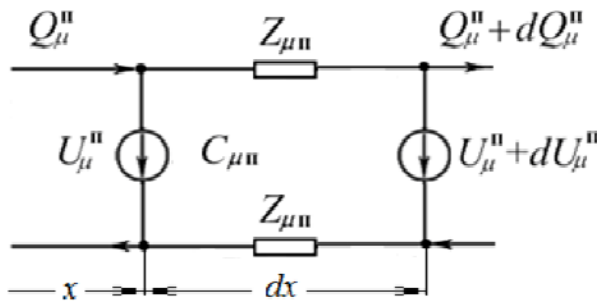


Рис. 2. Схема замещения фрагмента магнитной цепи преобразуемого тока

Дифференциальные уравнения составлены на основании законов Кирхгофа (Учебник для вузов «Теоретические основы электротехники», Санкт-Петербург, 2006) для элементарного участка магнитной цепи dx , которые имеют вид:

$$Q_{\mu x}^n - U_{\mu x}^n C_{\mu n} dx - Q_{\mu x}^n - dQ_{\mu x}^n = 0$$

или

$$\frac{dQ_{\mu x}^n}{dx} = -U_{\mu x}^n C_{\mu n}, \quad (1)$$

$$-U_{\mu x}^n + Q_{\mu x}^n dx + U_{\mu x}^n + dU_{\mu x}^n + Z_{\mu n} Q_{\mu x}^n dx = 0$$

или

$$\frac{dU_{\mu x}^n}{dx} = -2Z_{\mu n} Q_{\mu x}^n, \quad (2)$$

где $Q_{\mu x}^n, U_{\mu x}^n$ – магнитный поток и магнитное напряжение, создаваемые источником МДС левой секции преобразователя с преобразуемым током I_x , т.е.

$$F_x = I_x w_x; Z_{\mu n} = \frac{1}{2\mu\mu_0 b_2 h_2}, C_{\mu n} = \mu_0 \frac{2b_2}{\delta_p}$$

значения магнитного сопротивления и магнитная емкость, приходящиеся на единицу длины x элемента.

Дифференцируя (2) и подставляя в него (1), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 U_{\mu x}^n}{dx^2} = 2Z_{\mu n} C_{\mu n} U_{\mu x}^n. \quad (3)$$

Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$U_{\mu x}^n = A_1 e^{\gamma_3 x} + A_2 e^{-\gamma_3 x}, \quad (4)$$

где $\gamma_3 = \sqrt{2Z_{\mu n} C_{\mu n}}$ – коэффициент распространения магнитного потока в магнитной цепи; A_1, A_2 – постоянные интегрирования.

Дифференцируя (4) и подставив в (2), находим выражение магнитного потока, т.е.:

$$Q_{\mu x}^n = -\frac{\gamma_3 A_1}{2Z_{\mu n}} e^{\gamma_3 x} + \frac{\gamma_3 A_2}{2Z_{\mu n}} e^{-\gamma_3 x}. \quad (5)$$

Коэффициенты A_1 и A_2 определяются из следующих граничных условий:

$$U_{\mu x}^n \Big|_{x=0} = F_x - Q_{\mu x}^n \Big|_{x=0} \cdot Z_{\mu 0}, \quad (6)$$

$$U_{\mu x}^n \Big|_{x=X_M} = Q_{\mu x}^n \Big|_{x=X_M} \cdot Z_{\mu T}, \quad (7)$$

где $Z_{\mu 0}$ – магнитное сопротивление левой секции преобразователя; $Z_{\mu T}$ – магнитное сопротивление правой секции преобразователя.

Поставляя значения магнитного потока и магнитного напряжения при $x=0$ и $x=X_M$ в соответствии с (4) и (5) в (6) и (7), имеем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\left\{ \left(1 - \frac{\gamma_3 Z_{\mu 0}}{2Z_{\mu n}} \right) A_1 + \left(1 + \frac{\gamma_3 Z_{\mu 0}}{2Z_{\mu n}} \right) A_2 = F_x, \right. \quad (8)$$

$$\left. \left(1 + \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu n}} \right) e^{\gamma_3 X_M} A_1 + \left(1 - \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu n}} \right) e^{-\gamma_3 X_M} A_2 = 0 \right\} \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9) относительно A_1 и A_2 , имеем:

$$A_1 = -\frac{F_x}{2\Delta} e^{-\gamma_3 X_M} + \frac{F_x \gamma_3 Z_{\mu T}}{4\Delta_4 Z_{\mu n}} e^{-\gamma_3 X_M}, \quad (10)$$

$$A_2 = -\frac{F_x}{2\Delta} e^{\gamma_3 X_M} + \frac{F_x \gamma_3 Z_{\mu 0}}{4\Delta_4 Z_{\mu n}} e^{\gamma_3 X_M}, \quad (11)$$

где

$$\Delta_4 = \left(1 + \frac{\gamma_3^2 Z_{\mu 0} Z_{\mu T}}{4Z_{\mu n}^2} \right) sh\beta_3 + \frac{\gamma_3 (Z_{\mu 0} + Z_{\mu T})}{2Z_{\mu n}} ch\beta_3.$$

С учетом (10) и (11) уравнения (3) и (4) принимают следующий вид:

$$U_{\mu x}^n = \frac{F_x}{\Delta_4} \left\{ sh[\gamma_3 (X_M - x)] + \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu n}} ch[\gamma_3 (X_M - x)] \right\}, \quad (12)$$

$$Q_{\mu x}^n = \frac{\gamma_3 F_x}{2\Delta_4 Z_{\mu 3}} \left\{ ch[\gamma_3(X_M - x)] + \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu 3}} sh[\gamma_3(X_M - x)] \right\}. \quad (13)$$

Аналитические выражения для магнитного напряжения и магнитного потока, создаваемые МДС правой секции преобразователя, находятся аналогично.

$$U_{\mu x}^n = \frac{F_x}{\Delta_4} sh(\gamma_3 x) + F_x \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu 3} \Delta_4} ch(\gamma_3 x), \quad (14)$$

$$Q_{\mu x}^n = \frac{\gamma_3 F_x}{2Z_{\mu 3} \Delta_4} ch(\gamma_3 x) + F_x \frac{\gamma_3^2 Z_{\mu T}}{4Z_{\mu 3}^2 \Delta_4} sh(\gamma_3 x). \quad (15)$$

Алгебраическим сложением частных значений соотношений (12)-(15) соответственно получим следующее:

$$U_{\mu x} = U_{\mu x}^n + U_{\mu x}^n = \frac{F_x}{\Delta_4} \left\{ sh[\gamma_3(X_M - x)] + sh(\gamma_3 x) + \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu T}} \times \right. \\ \left. \times \{ ch[\gamma_3(X_M - x)] + ch(\gamma_3 x) \} \right\}, \quad (16)$$

$$Q_{\mu x} = Q_{\mu x}^n - Q_{\mu x}^n =$$

$$= \frac{\gamma F_x}{2Z_{\mu 3} \Delta_4} \left\{ ch[\gamma_3(X_M - x)] - ch(\gamma_3 x) + \frac{\gamma_3 Z_{\mu T}}{2Z_{\mu T}} \times \right. \\ \left. \times \{ sh[\gamma_3(X_M - x)] - sh(\gamma_3 x) \} \right\}. \quad (17)$$

С учетом допущений $Z_{\mu T} \rightarrow \infty$, т.е. $Q_{\mu}^n|_{x=X_M} = 0$ и $Q_{\mu}^n|_{x=0} = 0$, выражения (16) и (17) будут иметь вид:

$$U_{\mu x} = \frac{F_x}{\Delta_5} \{ ch[\gamma_3(X_M - x)] + ch(\gamma_3 x) \}, \quad (18)$$

$$Q_{\mu x} = \frac{\gamma_3 F_x}{2Z_{\mu 3} \Delta_5} \{ sh[\gamma_3(X_M - x)] - sh(\gamma_3 x) \}, \quad (19)$$

где $\Delta_5 = ch(\gamma_3 X_M) + \frac{\gamma_3 Z_{\mu 0}}{2Z_{\mu 3}} sh(\gamma_3 X_M)$.

Для анализа и расчета магнитных цепей используем известные выражения:

$$U_{\mu x} = F_x \frac{2ch\left(\frac{1}{2}\beta_3\right)}{\Delta_5} ch\left[\beta_3\left(\frac{1}{2} - x^*\right)\right], \quad (20)$$

$$Q_{\mu x} = F_x \frac{\beta_3 ch\left(\frac{1}{2}\beta_3\right)}{Z_{\mu 3} \Delta_5} sh\left[\beta_3\left(\frac{1}{2} - x^*\right)\right], \quad (21)$$

где $\beta_3 = \gamma_3 X_M$.

На рис. 3 и 4 приведены кривые зависимости $U_{\mu}^* = f(x^*)$ и $Q_{\mu}^* = f(x^*)$ при разных значениях β_3 ,

где $U_{\mu x}^* = \frac{U_{\mu x}}{U_{\mu x}|_{x=0}}$, $Q_{\mu x}^* = \frac{Q_{\mu x}}{U_{\mu x}|_{x=0}}$ и $x^* = \frac{x}{X_M}$.

Анализ полученных выражений (20) и (21) в относительных единицах показывает непостоянство

магнитных напряжений вдоль цепи. Причем его магнитное значение совпадает с точкой магнитной нейтрали, распределение магнитного потока нелинейно с изменением тока в точке магнитной нейтрали, а степень нелинейности магнитного потока и непостоянства магнитного напряжения возрастает с увеличением коэффициента затухания магнитного потока.

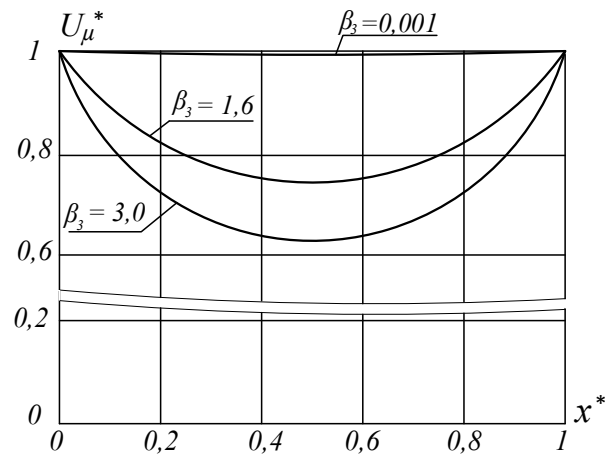


Рис. 3. Кривые зависимости магнитного напряжения $U_{\mu x}^* = f(x^*)$ при разных значениях β_3

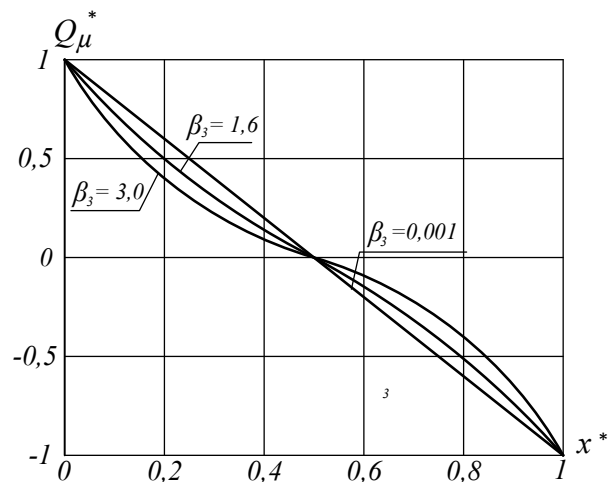


Рис. 4. Кривые зависимости магнитного потока $Q_{\mu x}^* = f(x^*)$ при разных значениях β_3

Напряженности магнитного поля для соответствующих участков преобразуемого тока определяются как:

$$H_x^n = \frac{1}{0,5X_M} Z_{\mu 3} \int_0^{0,5X_M} Q_{\mu} dx = \frac{2f_x ch(0,5\beta_3)}{\Delta_5} [ch(0,5\beta_3) - 1], \quad (22)$$

$$H_x^n = \frac{1}{0,5X_M} Z_{\mu 3} \int_{0,5X_M}^{X_M} Q_{\mu} dx = \frac{2f_x ch(0,5\beta_3)}{\Delta_5} [1 - ch(0,5\beta_3)]. \quad (23)$$

Выражения (16) - (21) являются математическими моделями модулируемой части преобразователя.

Установлено, что полученные математические модели в пределах 3-5% погрешности соответствуют экспериментальным кривым и их можно положить в основу расчета основных характеристик преобразователя.

Литература

1. Roman M. Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering. - USA: Brown Walker Press, 2011.
2. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Рустамов Д.Ш. Электромагнитный датчик тока для систем управления устройствами тягового электроснабжения // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014. - № 2. - С. 26-31.
3. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. - № 2. - С.33-35.
4. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Рустамов Д.Ш., Атауллаев Н.О. Электромагнитные преобразователи больших токов для систем тягового электроснабжения // Ташкент, «Фан ва технология», 2018.
5. Патент РУз. № UZIAP 04217. Устройство для преобразования тока / Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Турдыбеков К.Х., Рустамов Д.Ш., Хушбоков Б.Х. // Официальный вестник. - 2010. - № 8.
6. Сафаров А.М., Саттаров Х.А. Вопросы поискового проектирования преобразователей больших токов // Муҳаммад Ал-Хоразмий авлодлари илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнал. – 2019. - № 20(8). - 99-102 б.
7. Жураева К.К., Рустимова А.Р. Устройство для выявления неравномерности токовой нагрузки систем электроснабжения нетяговых потребителей // Транспорт России: Проблемы и перспективы. Санкт-Петербург. - 2019. - Т. 2. - С. 225-229.

Сведения об авторах

Сафаров Абдурауф Маликович, кандидат техн. наук, доцент; Ташкентский государственный транспортный университет

100167, г. Ташкент, ул. Адилходжаева, 1, ТашИИТ.
Тел. моб. +998977124025, раб. +998712990444
E-mail: bimm2020@mail.ru.

Саттаров Хуршид Абдишукурович, кандидат техн. наук, доцент; Ташкентский университет информационных технологий

100167, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Амир Темур, 108.
Тел. моб. +998907888556
E-mail: sattarov.khurshid@mail.ru.

Жураева Камила Комиловна, PhD (по техническим наукам), доцент; Ташкентский государственный транспортный университет -

100167, г. Ташкент, ул. Адилходжаева, 1, ТашИИТ.
Тел. моб. +998909512773, раб. +998712990444
E-mail: lade00@bk.ru.