

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. А. САФАРЯН, В. А. САРАДЖЕВ

К ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В последнее время в приборах автоматики и информационно-измерительной техники нашли широкое применение линейные магнитоэлектрические преобразователи (ЛМП), служащие в качестве исполнительных органов к устройствам индикации и регистрации.

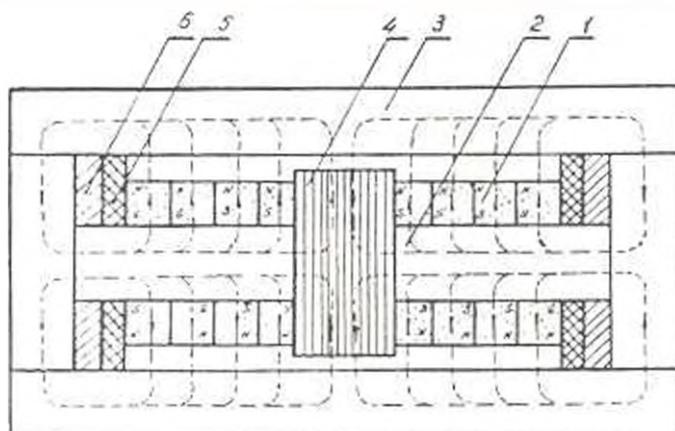


Рис. 1.

В данной статье последуются ЛМП, конструкция которого приведеца на рис. 1. Кольцевые постоянные магниты 1 с радиальным намагничиванием собираются на стержневом магнитопроводе 2 из магнитомягкого материала (армко). Стержень с магнитными кольцами устанавливается в яме 3 (тоже из магнитомягкого материала) и фиксируется боковыми стенками яма. На кольцевые магниты надевается подвижная катушка 4, которая перемещается в воздушном зазоре внутри ЛМП. Для уменьшения ударной силы подвижной катушки по краям ЛМП установлены амортизаторы 5 из мягкого материала (фетр), а также антимагнитные латунные кольца 6, которые уменьшают до минимума потоки рассеивания по краям.

Конструкция этого ЛМП позволяет через пазы, проделанные с двух сторон яма, передавать перемещение катушки к органам индикации (стрелка) и регистрации (выступающее перо), а также осуществлять подачу напряжения на подвижную катушку через токопроводы.

Принцип работы ЛМП заключается в следующем: при прохождении тока через обмотку подвижной катушки ее электромагнитное поле, взаимодействуя с полем постоянного магнита, вызывает аксиальное усилие, движущее катушку в одну или другую сторону в зависимости от направления тока.

Данная конструкция более подробно проанализирована в [1], опробована и благодаря своим повышенным технико-экономическим показателям (большое тяговое усилие, высокий к. п. д., малые габариты) находит широкое применение в следящих системах автокомпенсаторов.

Для расчета магнитной цепи описанного ЛМП важное значение имеет определение закона распределения магнитной индукции по всей длине рабочего зазора. Для этой цели используется теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами [2, 3, 4]. При этом отличительной особенностью схемы замещения является наличие поперечно включенных источников магнитной энергии, установленных через равные промежутки вдоль всей цепи.

В данной статье рассматриваются некоторые вопросы по теории цепей с равномерно распределенной поперечной намагничивающей силой (и. с.).

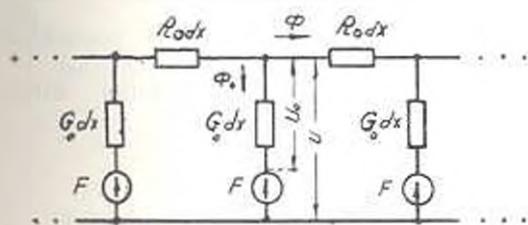


Рис. 2.

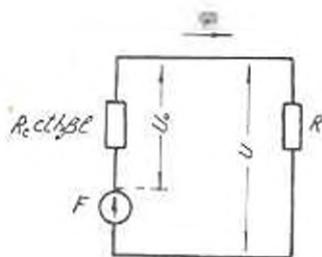


Рис. 3.

На рис. 2 показана схема замещения половины исследуемого магнитопровода с распределенными параметрами. Эту схему можно охарактеризовать как однородную магнитную линию с равномерно распределенной вдоль всей линии постоянной поперечной и. с. в виде кольцевых магнитов и с нагрузкой, включенной в конце линии. На схеме и в тексте статьи приняты следующие обозначения:

R_0 и G_0 — соответственно продольное магнитное сопротивление и поперечная магнитная проводимость, приходящиеся на единицу длины линии („первичные параметры линии“);

R — магнитное сопротивление нагрузки;

F — постоянная поперечная и. с.;

Φ — продольный магнитный поток;

Φ_0 — поперечный магнитный поток, приходящийся на единицу длины линии;

U — „магнитное напряжение“ (разность скалярных магнитных потенциалов) в различных сечениях линии;

$U_0 = U - P$ — результирующее магнитное напряжение, непосредственно определяющее величину поперечного магнитного потока Φ_0 ;

x — расстояние данной точки линии от конца, т. е. от места включения нагрузки;

U_1 и Φ_1 — соответственно магнитное напряжение и продольный магнитный поток в начале линии;

U_2 и Φ_2 — то же в конце линии;

U и Φ — то же в любой точке линии.

Очевидно, рассматриваемая однородная магнитная линия является аналогом однородной («длинной») линии постоянного тока с постоянной э. д. с., равномерно распределенной вдоль всей линии. Так как такого рода линия не рассматривалась в литературе, то в данной статье поставлена задача исследовать законы распределения всех интересующих нас величин вдоль линии. С целью облегчения проведения аналогии с линией постоянного тока сохранены традиционные термины (например, напряжение) и положительные направления.

Из рассмотренной схемы замещения легко получить дифференциальные уравнения:

$$-\frac{dU}{dx} = R_0 \Phi; \quad -\frac{d\Phi}{dx} = G_0 U. \quad (1)$$

Решение этих уравнений для установившегося режима имеет вид [5, 6]:

$$U_x = \frac{1}{2} (U_{02} + R_c \Phi_2) e^{-\beta x} + \frac{1}{2} (U_{02} - R_c \Phi_2) e^{-\beta l + \beta x};$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \left(\Phi_2 + \frac{U_{02}}{R_c} \right) e^{-\beta x} - \frac{1}{2} \left(\Phi_2 - \frac{U_{02}}{R_c} \right) e^{-\beta l + \beta x}, \quad (2)$$

где $R_c = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}}$ — волновое (характеристическое) сопротивление линии;

$\beta = \sqrt{R_0 G_0}$ — коэффициент затухания («вторичные параметры линии»).

То же решение может быть выражено и через гиперболические функции:

$$U_x = U_{02} \operatorname{ch} \beta x + R_c \Phi_2 \operatorname{sh} \beta x;$$

$$\Phi = \Phi_2 \operatorname{ch} \beta x - \frac{U_{02}}{R_c} \operatorname{sh} \beta x. \quad (3)$$

Если длина l , то при $x=l$, т. е. в начале линии, продольный магнитный поток $\Phi = \Phi_1 = 0$. Таким образом,

$$\Phi_2 \operatorname{ch} \beta l - \frac{U_{02}}{R_c} \operatorname{sh} \beta l = 0,$$

откуда

$$\Phi_2 = \frac{U_{02}}{R_c} \operatorname{th} \beta l. \quad (4)$$

Подставляя это значение в первое из уравнений (3), после несложных преобразований получим

$$U_{01} = \frac{U_{02}}{\operatorname{ch} \beta l}. \quad (5)$$

Произведя ту же подстановку в уравнении (2), получим:

$$\begin{aligned} U'_0 &= \frac{U_{02}}{2} (1 - \operatorname{th} \beta l) e^{\beta x} - \frac{U_{02}}{2} (1 + \operatorname{th} \beta l) e^{-\beta x}; \\ \Phi &= \frac{\Phi_2}{2} (1 - \operatorname{cth} \beta l) e^{\beta x} + \frac{\Phi_2}{2} (1 + \operatorname{cth} \beta l) e^{-\beta x}. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как в этих выражениях вторые члены представляют собой волны U_0 и Φ , распространяющиеся от конца линии к началу, а первые члены—волны U_0 и Φ , распространяющиеся от начала линии к концу, то, взяв отношение первых членов ко вторым при $x=l$, получим коэффициенты отражения волн от начала линии.

Коэффициент отражения магнитного напряжения

$$K_U = \frac{(1 - \operatorname{th} \beta l) e^{\beta l}}{(1 + \operatorname{th} \beta l) e^{-\beta l}} = \frac{\operatorname{ch} \beta l - \operatorname{sh} \beta l}{\operatorname{ch} \beta l + \operatorname{sh} \beta l} e^{2\beta l} = \frac{e^{-\beta l}}{e^{\beta l}} \cdot e^{2\beta l} = 1. \quad (7)$$

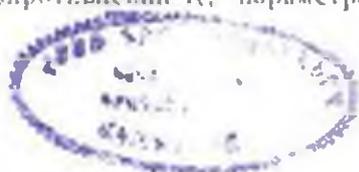
Коэффициент отражения магнитного потока

$$K_\Phi = \frac{(1 - \operatorname{cth} \beta l) e^{\beta l}}{(1 + \operatorname{cth} \beta l) e^{-\beta l}} = \frac{\operatorname{sh} \beta l - \operatorname{ch} \beta l}{\operatorname{sh} \beta l + \operatorname{ch} \beta l} e^{2\beta l} = -\frac{e^{-\beta l}}{e^{\beta l}} e^{2\beta l} = -1. \quad (8)$$

Таким образом, волна U_0 отражается от начала линии с тем же знаком, а волна Φ —с обратным знаком. Иными словами, отражение U_0 и Φ от начала линии происходит так, как отражение волн напряжения и тока от разомкнутого конца линии передачи. Следовательно, для волн U_0 и Φ рассматриваемая магнитная линия находится как бы в режиме холостого хода по отношению к своему началу.

Весьма своеобразным обстоятельством является также тот факт, что волны U_0 и Φ распространяются противоположно тому, что имеет место в обычной линии с генераторным входом (началом линии) и нагрузочным выходом (концом линии). В исследуемом нами случае прямая (падающая) волна распространяется от конца линии к ее началу, а обратная (отраженная) волна—от начала линии к ее концу.

Так как $F = U'_0 - U_{02}$, причем $U_{02} = R_c \Phi_2$, и из (4) $U_{02} = -R_c \Phi_2 \operatorname{cth} \beta l$, то $F = (R + R_c \operatorname{cth} \beta l) \Phi_2$, откуда видно, что при заданной распределенной и, с. F , нагрузочном сопротивлении R , параметрах линии R_c



и G_0 и длине линии l магнитный поток в нагрузке вычисляется по формуле:

$$\Phi_2 = \frac{F}{R + R_c \operatorname{cth} \beta l}. \quad (9)$$

Приходим к выводу, что по отношению к нагрузке вся линия представляет собой активный двухполюсник (эквивалентный генератор) с и. с. F и входным (внутренним) сопротивлением $R_c \operatorname{cth} \beta l$. Соответствующая схема приведена на рис. 3.

Магнитное напряжение на нагрузке, т. е. в конце линии,

$$U_2 = \frac{FR}{R + R_c \operatorname{cth} \beta l}, \quad (10)$$

а магнитное напряжение в начале линии

$$U_1 = \frac{U_2 - F}{\operatorname{ch} \beta l} + F. \quad (11)$$

Заметим также, что результирующее магнитное напряжение U_0 , которое непосредственно определяет величину поперечного магнитного потока Φ_0 , а следовательно, и магнитной индукции в воздушном зазоре B_0 , может быть представлено как падение магнитного напряжения на внутреннем сопротивлении эквивалентного генератора.

Возвращаясь к формулам (6), отметим, что так как магнитный поток в нагрузке $\Phi_2 > 0$ и $\operatorname{cth} \beta l > 1$, то прямая (падающая) волна магнитного потока, распространяющаяся от конца линии к ее началу, всегда положительная, а обратная (отраженная) волна магнитного потока, распространяющаяся от начала линии к ее концу, всегда отрицательная. Учитывая соотношение (5) и то, что $\operatorname{th} \beta l < 1$, можно утверждать, что как прямая, так и обратная волна U_0 всегда отрицательны.

На основании изложенного можно начертить картину распределения продольного магнитного потока Φ и магнитного напряжения U_0 вдоль линии. Прямые волны снабжены индексом φ , обратные — индексом ψ (рис. 4 и 5). Так как $U = U_0 + F$, то кривые U_0 одновременно являются кривыми U по отношению к дополнительной оси абсцисс, которая проходит на величину F ниже основной оси абсцисс. Эта дополнительная ось изображена пунктиром.

Из полученных кривых видно, что продольный магнитный поток в линии возрастает от ее начала к концу, достигая максимума на нагрузке, а напряжение, напротив, падает от начала линии к концу и на нагрузке достигает минимума. Величина же U_0 по абсолютной величине возрастает на всем протяжении от начала линии до конца. Таково же будет и распределение вдоль линии поперечных магнитных потоков Φ_0 и магнитной индукции в воздушном зазоре B_0 . Соответствующая кривая (без учета знака минус) для обеих половин магни-

топровода изображена на рис. 6. Она представляет собой цепную линию.

В самом деле, подставляя в первое из уравнений (3) значение Φ_2 из (4), получим:

$$U_0 = U'_{02} (\operatorname{ch} \beta x - \operatorname{th} \beta x \cdot \operatorname{sh} \beta x) = U'_{02} \frac{\operatorname{ch} \beta l \cdot \operatorname{ch} \beta x - \operatorname{sh} \beta l \cdot \operatorname{sh} \beta x}{\operatorname{ch} \beta l} = \\ = \frac{U'_{02}}{\operatorname{ch} \beta l} \operatorname{ch} \beta (l - x) = U'_{01} \operatorname{ch} \beta (l - x) - U'_{01} \operatorname{ch} \beta x',$$

где U'_{01} — значение магнитного напряжения U'_0 в начале линии; $x' = l - x$ — расстояние данной точки от начала линии.

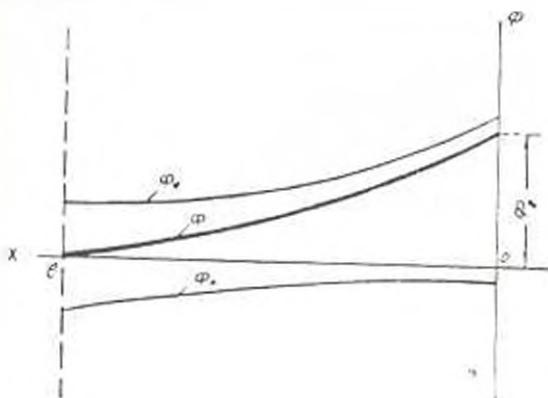


Рис. 4.

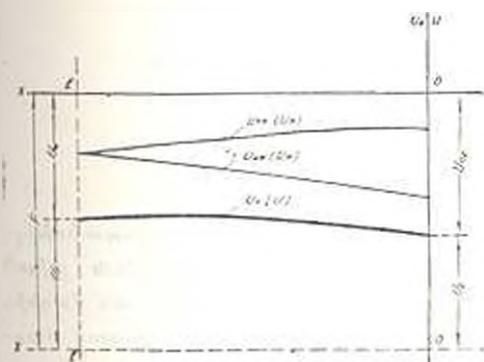


Рис. 5.

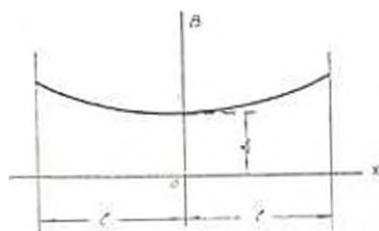


Рис. 6.

Так как поперечный магнитный поток на единицу длины линии Φ_0 и магнитная индукция в воздушном зазоре магнитопровода B_0 пропорциональны U_0 , то будем иметь:

$$\Phi_0 = \Phi_{01} \operatorname{ch} \beta x; \quad B_0 = B_{01} \operatorname{ch} \beta x. \quad (12)$$

Экспериментальная проверка выражения (12), произведенная при помощи теслаамперметра типа Ф4354/1, показала достоверность полученных результатов.

Технические характеристики исследуемого ЛМП, применяемого в качестве преобразующего или исполнительного элемента в устройствах автоматики, будут зависеть от выведенного соотношения (12), которое определяет точность установления подвижной катушки по отметкам шкалы прибора.

Описанный в статье ЛМП имеет по сравнению с ныне существующими исполнительными элементами а 5 раз больше быстродействие (0,5 с вместо 2,5 с), повышенную точность и надежность. На основе такого ЛМП создан автокомпенсатор, защищенный авторским свидетельством [7].

Выводы

1. В статье исследована однородная магнитная линия с распределенными параметрами и с постоянной поперечной намагничивающей силой, равномерно распределенной вдоль всей линии. Найдены законы распределения вдоль такой линии продольных и поперечных магнитных потоков, разности скалярных магнитных потенциалов и магнитной индукции в воздушном зазоре. Последняя распределяется вдоль магнитопровода по закону цепной линии.

2. Все полученные соотношения могут быть соответственно перенесены на электрическую линию с распределенными параметрами и с постоянной поперечной э.д.с.

Поступило 4.11.1976

Ա. Ա. ՍԱԳԱՐՅԱՆ, Վ. Ա. ՍԱՐԱԺՅԵՎ

ԿԵՍԱՆՈՒԹՅԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆԱԿԱՆ ԿԵՐԱՎՈՐՈՒՄԻ
ՏԵԾՈՒԹՅԱՆ ԾՈՒՐԶԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգվածում քննարկված են զծային մագնիսակլեկտրական կերպափոխիչների մագնիսական շղթայի տեսության որոշ հարցեր: Մագնիսական շղթան դիտված է որպես համասարաչափ բաշխված հաստատուն լայնական մագնիսաչափ ուժով համաստուն դիմ, որն ստեղծվում է շառավղային կերպով մագնիսաչափված օղակածն հաստատուն մագնիսներից:

Գտնված են լայնական ու երկաշնական մագնիսական հասրերի և օղային բացակում մագնիսական ինդուկցայի բաշխման օրենքները, ինչպես նաև սկզբնական մագնիսական պոտենցիալների աարրերությունը, արտահայտված հիպերբոլիկ ֆունկցիաներով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сафарян А. А., Тер-Мартirosян М. Г., Хойжаияц Ю. М., Таталян Р. С. Автоматические компенсационные приборы с линейным исполнительным двигателем. «Приборы и системы управления», № 4, 1975.

2. Куликовский Л. Ф., Зарипов М. Ф. Индуктивные преобразователи перемещения с распределенными параметрами. «Энергия», М., 1966.
3. Зарипов М. Ф. Преобразователи с распределенными параметрами М., «Энергия», 1969.
4. Белый М. И. Электромагнитные преобразователи с распределенными параметрами. Ульяновск, 1968.
5. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Часть II. М.—Л., «Энергия», 1966.
6. Зевеке Г. В., Нонкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. М.—Л., «Энергия», 1965.
7. Сафарян А. А., Тер-Миргиросян М. Г., Арутюнян Р. М., Акопян П. С., Ходжа-лиев Ю. М. Автоматический компенсатор. Авт. свид., кл. G01g 17/06, № 5169b2 «Бюллетень открытий и изобретений», № 21, 1976, стр. 152.