ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXVII, №1, 1974 Серия технических наук

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Б. М. МАМИКОНЯН

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОДНОГО КЛАССА

Трансформаторные преобразователи перемещений нашли широкое распространение в информационно-измерительной технике благодаря своей простоте, большой выходной мощности и отсутствию подвижного электрического контакта. Они применяются, в основном, в качестве:

1) датчиков различных механических величин;

2) компенсирующих преобразователей в электромеханических приборах автоматического уравновешивания.

Основным требованием, предъявляемым к трансформаторным преобразователям (ТП) первой группы, является высокая чувствительность при малых габаритах. Это обусловлено тем, что преобразователь часто работает непосредственно на малочувствительный указатель или исполнительное устройство.

Иные требования к ТП второй группы. Наличие в электромеханических приборах автоматического уравновешивания высокочувствительного электронного усилителя смягчает требования к чувствительности ТП. Здесь, в первую очередь, от ТП требуется высокая линейность характеристики преобразования и точность; иначе теряет смысл применение в этих приборах метода уравновешивающего преобразования.

С целью лучшего удовлетворения перечисленным требованиям, обычно ТП как первой, так и второй группы выполняют дифференциальными. Это позволяет: повысить чувствительность, расширить линейный участок характеристики преобразования, ослабить действие электромеханических сил на подвижную часть, уменьшить влияние внешних магнитных полей. Согласование нуля дифференциального ТП с нулем преобразуемого перемещения обеспечивается наличием двух выходных обмоток, включенных встречно. Невозможность выполнения совершенно одинаковыми как магнитных, так и электрических цепей двух половин дифференциальных ТП обусловливает наличие на выходе преобразователя некоторого начального напряжения, трудность регулировки и компенсации которого является, пожалуй, основным недостатком ТП.

В лаборатории электрических измерений механических величин кафедры «Электротехника и автоматика» Ленинаканского филиала ЕрПИ разработан новый класс ТП. Отличительной особенностью этих

преобразователей является выполнение магнитопровода в виде четырехплечевого магнитного моста, на одной диагонали которого намотана обмотка возбуждения, а на другой—единственная выходная обмотка. Предусматривая воздушные зазоры в диагоналях или плечах магнитного моста и помещая в них подвижные сердечники или короткозамкнутые витки, или же выполняя подвижной какую-либо часть магнитного моста, удалось создать несколько конструкций ТП линейных и угловых перемещений. Имея всего одну выходную обмотку, эти преобразователи обладают основным свойством дифференциальных ТП: имеют согласованную с нулем преобразуемого перемещения нуль, однако от них выгодно отличаются отсутствием начального напряжения на выходе. Последнее обусловлено тем, что при отсутствии преобразуемого перемещения магнитный мост уравновешен, в выходной диагонали отсутствует магнитный поток, и э.д.с. выходной обмотки равна нулю.

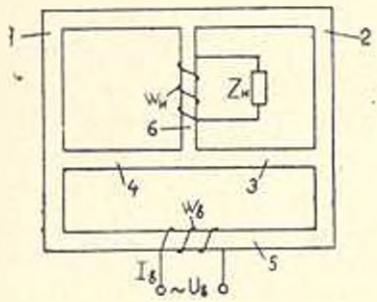

Рис. 1. Четырехплечий магнитный мост

В основе этих ТП лежит изображенный на рис. 1 четырехплечий магнитный мост с плечами 1, 2, 3, 4, со входной диагональю 5 и выходной диагональю 6. На входной диагонали намотана обмотка возбуждения $w_в$, подключенная к источнику переменного тока с напряжением $U_в$. На выходной диагонали намотана выходная обмотка $w_н$, к которой подключена нагрузка $Z_н$. Принципиальные схемы ТП с мостовыми магнитопроводами отличаются от схемы рис. 1 наличием воздушных зазоров либо в плечах, либо в диагоналях магнитного моста, в результате чего магнитные сопротивления соответствующих участков оказываются зависящими от преобразуемой механической величины. Целью данной статьи является установление основных соотношений для магнитной и электрических цепей ТП с мостовыми магнитопроводами, общих для всех конструкций, поэтому за основу берется схема рис. 1.

При синусоидальном изменении н.с. можно считать, что потоки во всех участках магнитопровода изменяются также по синусоидальному закону, так как в ТП магнитная индукция в магнитопроводе не должна выходить за пределы прямолинейного участка кривой намагничивания. Это позволяет при расчете использовать символический метод. Под действием переменных магнитных потоков в сердечнике возникают потери мощности на гистерезис и вихревые токи, в результа-

те чего на любом стальном участке магнитопровода переменный поток $\dot{\Phi}$ отстает по фазе от переменной н.с. $\dot{F}$, и потоки в различных участках магнитной цепи могут находиться в различных фазах. Поэтому целесообразно магнитное сопротивление стальных участков магнитной цепи рассматривать как комплексную величину [1]:

$$Z_{\text{м}}=\frac{\dot{F}}{\dot{\Phi}}=R_{\text{м}}+jX_{\text{м}}=\rho_R\frac{l}{S}+j\rho_X\frac{l}{S}=\frac{l}{S}\rho_z e^{j\varphi_{\text{м}}}=z_{\text{м}}e^{j\varphi_{\text{м}}},$$

где $R_{\text{м}}$ и $X_{\text{м}}$ — активная и реактивная составляющие магнитного сопротивления;

ρ_R и ρ_X — удельное активное и реактивное магнитные сопротивления;

$\rho_z=\sqrt{\rho_R^2+\rho_X^2}$;

$z_{\text{м}}=\frac{l}{S}\rho_z$ и $\varphi_{\text{м}}=\operatorname{arctg}\frac{\rho_X}{\rho_R}$ — соответственно модуль и фаза комплексного магнитного сопротивления.

Участки магнитной цепи в виде воздушных зазоров создают только активное магнитное сопротивление, так как на этих участках отсутствуют потери на гистерезис и вихревые токи: $Z_{\text{м}\delta}=R_{\text{м}\delta}$. Согласно изложенному, составлена схема замещения магнитного моста (рис. 2), где через $Z_{\text{м}1}$, $Z_{\text{м}2}$, $Z_{\text{м}3}$ и $Z_{\text{м}4}$ обозначены магнитные сопротивления соответствующих плеч, через $Z_{\text{м}b}$ и $Z_{\text{м}н}$ — магнитные сопротивления соответственно входной и выходной диагоналей. В зависимости от конструкции преобразователя магнитное сопротивление $R_{\text{м}\delta}$ воздушного зазора может войти в какое-либо из указанных сопротивлений.

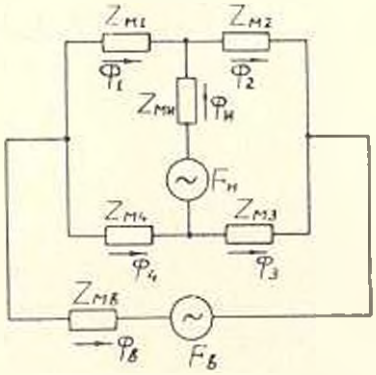

Рис. 2. Схема замещения магнитного моста

Рассмотрим случай $U_b=\text{const}$.

В режиме холостого хода, когда цепь выходной обмотки $w_н$ разомкнута, и выходной величиной преобразователя является э. д. с. $E_н$ этой обмотки, магнитные потоки в диагоналях Φ_b и $\Phi_н$ определяются следующими уравнениями:

$$\dot{\Phi}_b = \frac{\dot{F}_{в.х.х}}{N}\left[(Z_{м1}+Z_{м4})(Z_{м2}+Z_{м3})+(Z_{м1}+Z_{м2}+Z_{м3}+Z_{м4})Z_{мн}\right];$$

$$\dot{\Phi}_н = \frac{\dot{F}_{в.х.х}}{N}(Z_{м1}Z_{м3}-Z_{м2}Z_{м4}), \qquad (1)$$

где

$$\dot{F}_{в.х.х.} = \dot{I}_{в.х.х.}w_b;$$

$\dot{I}_{в.х.х.}$ — ток обмотки возбуждения в режиме холостого хода;

$$N = Z_{м1}Z_{м2}(Z_{м3}+Z_{м4})+(Z_{м1}+Z_{м2})\left[Z_{м3}Z_{м4}+(Z_{м3}+Z_{м4})Z_{мн}\right]+$$
$$+Z_{мн}\left[(Z_{м1}+Z_{м4})Z_{м4}+(Z_{м2}+Z_{м3})(Z_{м1}+Z_{м4}+Z_{мн})\right].$$

Уравнение (1) показывает, что условие равновесия магнитного моста аналогично с условием равновесия моста переменного тока:

$$Z_{м1}Z_{м3} = Z_{м2}Z_{м4}.$$

Выходная э. д. с. преобразователя определяется потоком $\dot{\Phi}_н$:

$$\dot{E}_н = -j\omega w_н \dot{\Phi}_н \qquad (2)$$

и также равна нулю, если магнитный мост уравновешен. В (2) $\omega = 2\pi f$ — круговая частота напряжения питающей сети.

Уравнение (2) описывает характеристику преобразования ТП в режиме холостого хода и позволяет определить его чувствительность в любой точке характеристики

$$K = \frac{dE_н}{dx},$$

где x — преобразуемое перемещение (при известной зависимости магнитного сопротивления соответствующего плеча моста от x).

Ток обмотки возбуждения

$$\dot{I}_{в.х.х.} = \frac{\dot{U}_b}{R_b + j\omega L_b} \qquad (3)$$

в общем случае зависит от преобразуемой величины через комплексную индуктивность L_b обмотки возбуждения, определяемая уравнением

$$L_b = \frac{w_b^2}{N}\left[(Z_{м1}+Z_{м4})(Z_{м2}+Z_{м3})+(Z_{м1}+Z_{м2}+Z_{м3}+Z_{м4})Z_{мн}\right]. \qquad (4)$$

В уравнении (3) R_b — активное сопротивление обмотки возбуждения.

Рассмотренный режим холостого хода характерен для ТП второй группы, когда выходная э. д. с. $E_н$ используется для компенса-

нии некоторого неизвестного напряжения или э. д. с. Для ТП первой группы характерен нагруженный режим работы. В некоторых случаях и нагруженном режиме могут оказаться также и ТП второй группы. Например, когда приходится использовать не всю выходную э. д. с., а часть ее, то к выходной обмотке подключается делитель напряжения.

При подключении к обмотке $w_н$ нагрузки $Z_н = R_н + j\omega L_н$ через эту обмотку потечет ток $I_н$, режим работы преобразователя изменится, так как начнет сказываться размагничивающее влияние н. с $\dot{F}_н = \dot{I}_н w_н$. Магнитные потоки в диагоналях моста будут определяться уравнениями:

$$\dot{\Phi}_b = \frac{1}{N}\{\dot{F}_b[(Z_{м1}+Z_{м2})(Z_{м3}+Z_{м1})+(Z_{м1}+Z_{м2}+Z_{м3}+Z_{м1})Z_{мb}] -$$

$$- \dot{F}_н(Z_{м1}Z_{м3}-Z_{м2}Z_{м1})\};$$

$$\dot{\Phi}_н = \frac{1}{N}\left\{\dot{F}_b(Z_{м1}Z_{м3}-Z_{м2}Z_{м1}) - \dot{F}_н[(Z_{м1}+Z_{м2})(Z_{м3}+Z_{м1}) +\right.$$

$$\left. + (Z_{м1}+Z_{м2}+Z_{м3}+Z_{м1})Z_{мb}]\right\}.$$

Для определения токов преобразователя составим уравнения равновесия напряжений цепей обмоток w_b и $w_н$.

$$\dot{U}_b = \dot{I}_b(R_b + j\omega L_b) + j\omega \dot{M}\dot{I}_н;$$

$$0 = j\omega \dot{M}\dot{I}_b + \dot{I}_н[R_н + R_н + j\omega(\dot{L}_н + \dot{L}_н)], \tag{5}$$

где $R_н$ и $\dot{L}_н$ — активное сопротивление и комплексная индуктивность выходной обмотки; $\dot{M}$ — комплексная взаимная индуктивность обмоток.

Из уравнений (5) определяются токи:

$$\dot{I}_b = \dot{U}_b \frac{R_н + R_н + j\omega(\dot{L}_н + \dot{L}_н)}{(R_b + j\omega \dot{L}_b)[R_н + R_н + j\omega(\dot{L}_н + \dot{L}_н)] + \omega^2 \dot{M}^2};$$

$$\dot{I}_н = \dot{U}_b \frac{-j\omega \dot{M}}{(R_b + j\omega \dot{L}_b)[R_н + R_н + j\omega(\dot{L}_н + \dot{L}_н)] + \omega^2 \dot{M}^2}. \tag{6}$$

В общем случае как $\dot{I}_н$, так и $\dot{I}_b$ зависят от преобразуемой величины, поскольку от последней зависят $\dot{L}_b$, $\dot{L}_н$ и $\dot{M}$. $\dot{L}_b$ определяется уравнением (4), а $\dot{L}_н$ и $\dot{M}$ связаны с параметрами цепи следующими уравнениями:

$$\dot{L}_н = \frac{w^2}{N}[(Z_{м1}+Z_{м2})(Z_{м3}+Z_{м1}) + (Z_{м1}+Z_{м2}+Z_{м3}+Z_{м1})Z_{мb}];$$

$$\dot{M} = \frac{w_2 w_3}{N} (Z_{м1} Z_{м3} - Z_{м2} Z_{м1}).$$

Поскольку для ТП, работающего в нагруженном режиме, выходной величиной является ток $\dot{I}_н$, то уравнение (6) описывает характеристику преобразования $\dot{I}_н = f(x)$ преобразователя и позволяет определить его чувствительность

$$K = \frac{d\dot{I}_н}{dx}.$$

Ленинаканский филиал ЕрПИ

Поступило 21 VIII 1973

Ռ. Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ

ՑԵՂԱՓՈԽՈՒՄՆԵՐԻ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽԻՉՆԵՐԻ ՄԻԿ ԴԱՍԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ

Ամփոփում

Հոդվածում ստացված են ընդհանուր բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է կատարել կամարյակային մագնիսատար ունեցող տարբեր տիպի տրանսֆորմատորային ձևափոխիչների հաշվարկ։ Դիտված են ձևափոխիչների ինչպես պարապ ընթացքի, այնպես էլ բեռնավորման ռեժիմները։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Буль Б. К.* Основы теории и расчета магнитных цепей. М.—Л., «Энергия», 1964.