

Г.Л. АРЕШЯН, С.Е. АСТВАЦАТРЯН

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ФЕРРИТОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ (ФП) В РЕЖИМЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА В ШИРОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЙ

Գիտակվում են ֆերիտային կերպափոխիչի սուաթի նմանակի ազանդանի լայնաբերական-ինսուլուային կերպափոխման անցումային պրոցեսները՝ համաձայն № 375 հեղինակային իրավունքի: Ստացվում են ֆերիտային կերպափոխիչի երկրորդային ազանդանի անալիտիկ արտահայտությունները: Որոշված է առաջնային խնարզների կրիտիկական ստացվածի հավախությունը:

Рассматриваются переходные процессы в ФП при преобразовании аналогового сигнала в широтно-модулированный в соответствии с авторской заявкой № 375. Получены аналитические выражения для параметров вторичного сигнала. Определена критическая максимальная частота первичных импульсов.

Ил. 2. Библиогр.: 1 назв.

According to the Patent № 375 the transient processes of ferrite converters (FC) converting an analogue signal to pulse-width modulation (PWM) have been investigated. The analytical expressions for the second signal parameters are obtained. The critical maximum frequency for the first parameters is defined.

Ил. 2. Ref. 1.

Функциональное преобразование входного аналогового сигнала дифференциального трансформатора на ферритовом сердечнике в широтно-модулированный основывается на эффекте насыщения феррита [1]. При подаче на одно плечо первичной обмотки трансформатора преобразователя прямоугольного напряжения происходит возрастание тока в контуре, содержащем R и L, до значения, при котором наступает насыщение феррита. За этот промежуток времени возрастает магнитный поток, сцепленный с первичной и вторичной обмотками. В результате во вторичной обмотке возникает ЭДС, которая существует все это время, пока происходит возрастание магнитного потока. После наступления насыщения ферритового сердечника ЭДС во вторичной обмотке не наводится, т.к. магнитный поток практически остается постоянным, а в первичной цепи практически остается активное сопротивление первичной обмотки и транзисторного преобразователя, которые и обуславливают величину тока в этой обмотке до того момента, пока имеется первичное напряжение.

Покажем, что среднее значение вторичной ЭДС остается неизменным и не зависит от высоты прямоугольного импульса, подаваемого на первичную обмотку трансформатора, т.е. не зависит от величины первичного напряжения. Описанные процессы имеют место при определенном ограничении, налагаемом на величину

частоты управления подаваемых от генератора прямоугольных импульсов. Диапазон рабочих частот этих импульсов ограничен сверху максимальной критической частотой, которая зависит от параметров системы.

Дается математическое описание переходных процессов в системе ФП при определенных упрощенных предположениях. Получены аналитические выражения, позволяющие определить необходимые критерии для нормального функционирования системы.

1. *Постановка задачи.* Рассмотрим замкнутый ферритовый сердечник с поперечным сечением S_c (m^2) и средней длиной силовой линии l_c (m). Материал сердечника имеет зависимость $B = f(H)$ (рис.1), причем кривая намагничивания идеализирована. Точка насыщения обозначена B_H (Bc/m^2) и H_H (A/m)

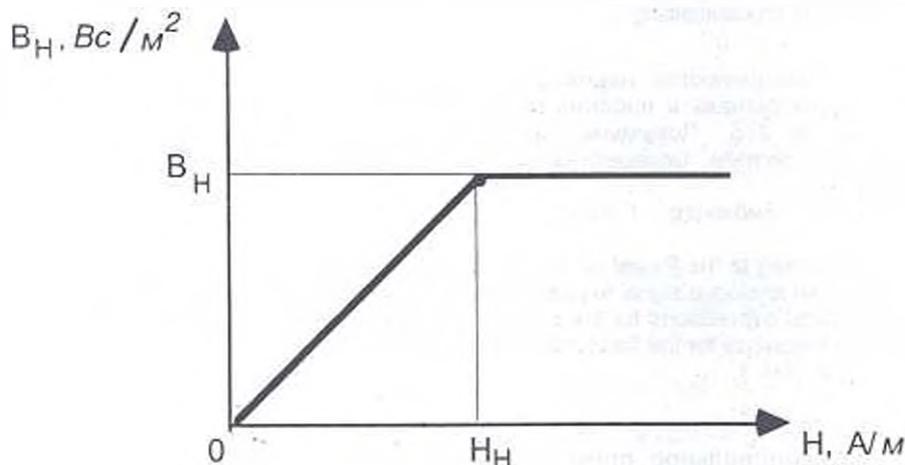


Рис. 1

При $H \leq H_H$ функция $B = \mu H$ -линейно зависящая, где μ ($Bc/Aм$) = B_H / H_H . При $H \geq H_H$ наступает насыщение, при котором $B = B_H = const$.

Произведем теоретическую оценку процессов, происходящих в одном плече первичной обмотки с числом витков w_1 и во вторичной обмотке с числом витков w_2 . Рассмотрим сначала простейший случай, когда на первичную обмотку подается напряжение из серии (или на феррит воздействует серия) прямоугольных импульсов одинаковой полярности. Показаны напряжения $U_{a1}(t)$ и $U_{b1}(t)$ (рис.2а), подаваемые на первое и второе плечо первичной обмотки трансформатора ФП, где U_n -амплитуда импульсов; T - длительность этих импульсов.

Прямоугольные импульсы U_a и U_b сдвинуты относительно друг друга на время T . С целью ограничения потребляемой мощности в режиме широтно-импульсного модулятора и упрощения

математического метода исследования рассматривается режим, когда вторичная обмотка разомкнута. Динамические процессы в феррите обусловленные действием изменяющегося во времени тока в первичной обмотке, разделим на 3 этапа:

Первый этап - при ненасыщенном сердечнике и воздействии тока в промежутке времени $0 \leq t \leq t_1$.

Второй этап - при насыщенном сердечнике и воздействии тока в промежутке времени $t_1 \leq t \leq t_2 = T$.

Третий этап - при отсутствии напряжения на обмотке в промежутке времени $t_2 = T \leq t \leq t_3$.

2. Уравнения переходных процессов. На первом - начальном этапе, когда $L = L_0 = \text{const}$ и ток первичной обмотки возрастает от 0 до $i_{\text{пр}}$, имеем $0 \leq i(t) \leq i_{\text{пр}}$, где $i_{\text{пр}}$ - ток, при котором наступает полное насыщение ферритового сердечника.

Функция $i(t)$ для первого этапа может быть представлена в виде

$$i(t) = \frac{U_0}{r_0} (1 - e^{-\alpha t}) = \frac{U_0}{r_0} \left(\alpha t - \frac{(\alpha t)^2}{2!} + \frac{(\alpha t)^3}{3!} - \dots \right).$$

Для упрощения анализа переходных процессов в феррите, при действии тока $i(t)$, пренебрегаем членами второго и более высокого порядков. После преобразования с учетом сделанных допущений получим окончательное решение дифференциального уравнения

$$i(t) = \frac{U_0}{r_0} \alpha t = \frac{U_0}{L_0} t, \quad (1)$$

где

$$\alpha = r_0 / L_0. \quad (2)$$

Определим значение t_1 , при котором наступает насыщение феррита:

$$t_1 = I_{\text{пр}} L_0 / U_0 = \Phi_H / U_0, \quad (3)$$

где Φ_H - потокоцепление в первичной обмотке при насыщенном магнитопроводе.

Определим величину $\alpha = r_0 / L_0$, исходя из того, что второй член разложения $(\alpha t)^2 / 2!$ меньше 1% относительно первого αt при $t = t_1$: $(\alpha t_1)^2 / 2 \leq 0.01$ или $(\alpha t_1) \leq 0.02$. С учетом (2) и (3) запишем $r_0 / L_0 = \Phi_H / U_0 \leq 0.02$ или

$$r_0 / L_0 \leq 0.02 U_0 / \Phi_H. \quad (4)$$

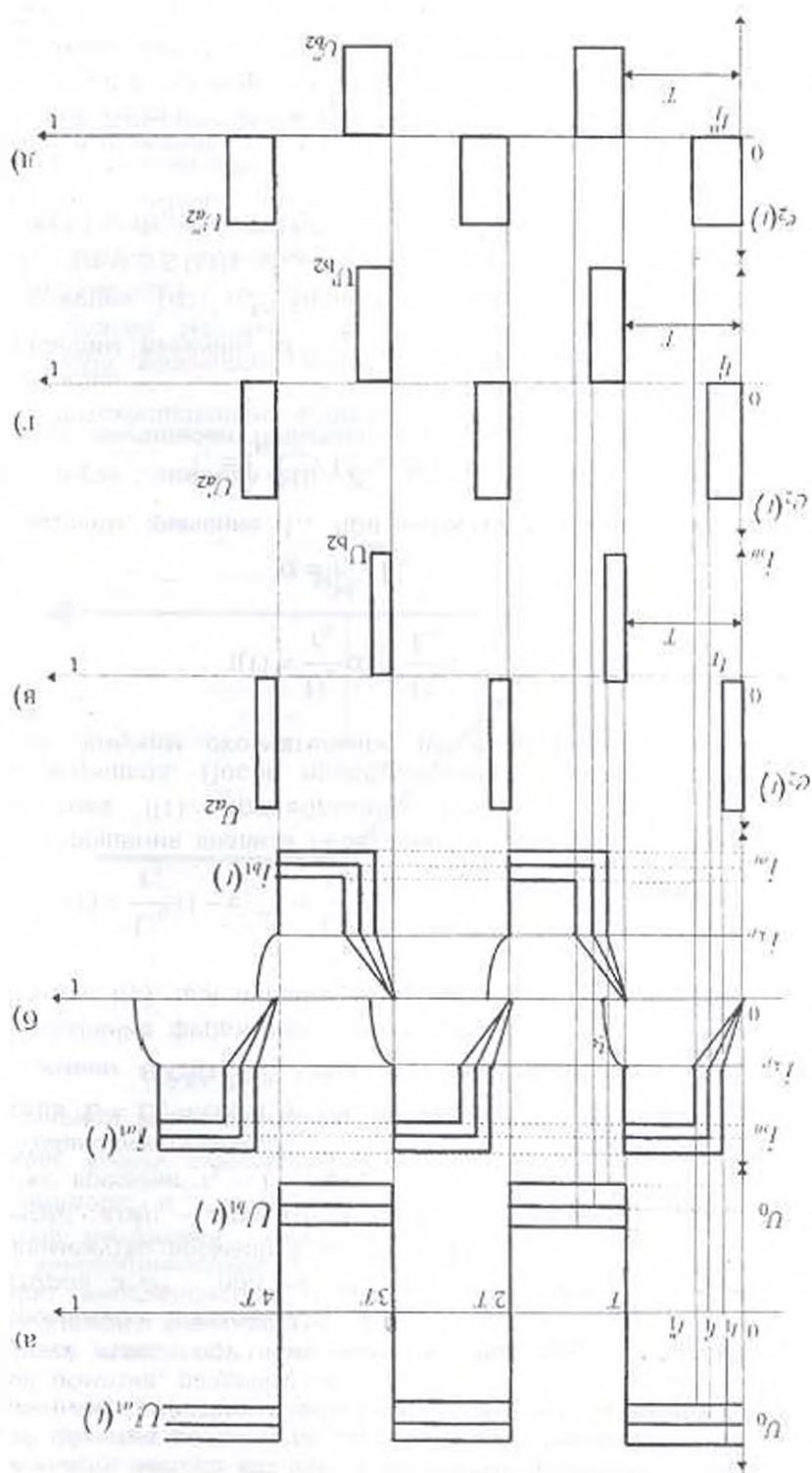
Тогда выражение (1) будет решением дифференциального уравнения только при условии (4)

На втором этапе, когда $\Phi = \text{const}$, дифференциальное уравнение имеет вид $U = r \cdot d\Phi / dt$, где $d\Phi / dt = 0$

Тогда

$$U_0 = r_0 I_{\text{пр}} \quad (5)$$

FIG. 2



Ток скачком увеличивается до значения

$$i_m = U_0 / r_0 \quad (6)$$

и остается постоянным до времени t_1 : $i(t) = i_m = \text{const}$ при напряжении U_0 .

Представлена зависимость изменения первичного тока от времени (рис. 2б)

На третьем этапе, когда напряжение скачком уменьшается до нуля, ток резко уменьшается от i_m до $i_{кр}$, далее через запертый транзистор в течение $t_2 - t_1$ - до значения $i(t_2) = 0$.

ЭДС вторичной обмотки равна

$$e_2 = d\psi_2 / dt, \text{ где } \psi_2 = M i(t). \quad (7)$$

С учетом уравнения (1) для первого этапа получим

$$\psi_2 = M U_0 t / L_0. \quad (8)$$

$$e_2(t) = d\psi_2 / dt = M U_0 / L_0 = \text{const} \quad (9)$$

или

$$E_2 = M U_0 / L_0 \quad (10)$$

в течение времени $0 \leq t \leq t_1 = \Phi_H / U_0$.

На втором этапе

$$e_2(t) = 0, \quad (11)$$

т.к. при $t \geq t_1$ $\Phi = \Phi_H = \text{const}$ и

$$\psi_2 = w_1 \Phi_H / w_2 = \text{const}. \quad (12)$$

Даны графики изменений функции $e_2(t)$ (рис. 2в, г, д).

Площадь $S(t_1) = \int_0^{t_1} e(t) dt$, где $e(t) = E_2$. Следовательно,

$$S(t_1) = E_2 t_1. \quad (13)$$

Подставляя в (13) уравнения (10) и (3), получим

$$S(t_1) = M U_0 / L_0 \times \Phi_H / U_0 = M \Phi_H / L_0 \text{ или } S(t_1) = M \Phi_H / L_0. \quad (14)$$

Как следует из (14), площадь ЭДС во вторичной обмотке не зависит от величины U_0 .

3. Длительность импульса первичного напряжения U_0 . Чтобы обеспечить условие достижения тока величины $i_{кр}$, при котором наступает полное насыщение ферритового сердечника, длительность импульса T для первичного напряжения необходимо выбрать больше времени t_1 :

$$T \geq t_1 = \Phi_H / U_0. \quad (15)$$

Величина магнитного потока при этом будет

$$\Phi_H = w_1 S_c B_H. \quad (16)$$

где w_1 - число витков одного плеча первичной обмотки; S (м^2) - сечение магнитопровода, B_H - индукция насыщения.

Пусть $U_{\text{н}} = U_{\text{мин}}$ - минимальное напряжение, с которого начинается стабилизация. Тогда

$$T \geq T_{\text{max}} = \Phi_{\text{н}} / U_{\text{мин}} \quad (17)$$

Частота при $T = T_{\text{max}}$ равна

$$f_{\text{max}} = 1/2T_{\text{max}} = 2U_{\text{мин}} / \Phi_{\text{н}} \quad (18)$$

Исключим $\Phi_{\text{н}}$, заменив его выражением (16):

$$f_{\text{max}} = 2U_{\text{мин}} / w_1 S_c B_{\text{н}} \quad (19)$$

где $U_{\text{мин}}$ - минимальное напряжение первичной обмотки на одном витке, В.

При этом система должна иметь частоту импульсов

$$f_c \leq f_{\text{max}} \quad (20)$$

Выражение (19) устанавливает пропорциональную связь между амплитудой импульсного напряжения на входе ФП и частотой импульсов, при котором наступает полное насыщение ферритового сердечника. Следовательно, ФП может использоваться как датчик длительности импульсов.

4. *Обеспечение линейного изменения тока на первом этапе.* Рассмотрим ферритовый сердечник с кривой намагничивания (рис. 1). Формула для расчета МДС $\theta = \psi(i)$ имеет вид $\theta = w_1 i = l_c / H_{\text{н}}$, где l_c - длина сердечника магнитопровода, м.

Тогда

$$\Phi_{\text{н}} = w_1 S_c B_{\text{н}}, \quad i_{\text{кр}} = l_c H_{\text{н}} / w_1 \quad (21)$$

Индуктивность первичной обмотки (одного плеча) равна

$$L_c = \Phi_{\text{н}} / i_{\text{кр}} = w_1^2 S_c / l_c B_{\text{н}} / H_{\text{н}} \quad (22)$$

С учетом (4) при условии, что $U_{\text{н}} = U_{\text{мин}}$, $r_0 / L_c \leq 0,02 U_{\text{мин}} / \Phi_{\text{н}}$, имеем

$$r_0 \leq 0,02 U_{\text{мин}} L_c / \Phi_{\text{н}} \quad (23)$$

Подставляя в (23) значения $\Phi_{\text{н}}$ по (21) и L_c по (22), получим

$$r_0 \leq 0,02 U_{\text{мин}} w_1 / l_c H_{\text{н}} \quad (24)$$

Таким образом, при формальном анализе можно пользоваться уравнением (24), но в конкретных расчетах необходимо учитывать вариации $H_{\text{н}}$ или $B_{\text{н}}$. Это обстоятельство необходимо учитывать при обосновании выбора рабочего участка на кривой намагничивания $B = f(H)$.

5. *Среднее значение вторичной ЭДС и вторичного напряжения* $U_{\text{ср}}$. $E_{\text{ср}}$ вторичной ЭДС за время длительности импульса T с учетом (14) определяется в виде

$$E_{\text{ср}} = S(i_1) / T = M \Phi_{\text{н}} / L_c T \quad (25)$$

Поскольку $M = w_1 w_2 \lambda_{\text{н}}$, $L_c = w_1^2 \lambda_{\text{н}}$ и $\Phi_{\text{н}} = w_1 S_c B_{\text{н}}$, то после подстановки их в (25), получим обобщенную формулу

$$E_{\text{ср}} = \frac{w_2 S_c}{T} B_{\text{н}} = 2w_2 f_c S_c B_{\text{н}} \quad (26)$$

При разомкнутой вторичной обмотке это значение напряжения будет равно выпрямленному вторичному напряжению (по двухполупериодной схеме выпрямления):

$$U_2 = 2\omega_2 I_1 S_1 B_{11}. \quad (27)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения не зависит от изменения значения преобразуемого напряжения и остается стабильным в процессе преобразования сигнала.

Как видно, существует обратно пропорциональная связь между амплитудой импульсного напряжения на выходе ФП и длительностью импульсов (рис.2). Следовательно, ФП может использоваться не только как датчик длительности импульсов, а также как широтно-импульсный модулятор.

Выводы. В результате динамических процессов в ферритовых преобразователях с учетом сильно выраженного насыщения удалось выяснить суть физических процессов и установить математические зависимости между параметрами системы при ее нормальном режиме работы. Показано, что используя эффект резкого насыщения ферритовых сердечников, можно получить во вторичной обмотке трансформатора прямоугольные импульсы ЭДС, среднее во времени значение которых остается постоянным и не зависит от амплитуды и длительности первичного напряжения в виде прямоугольных импульсов. Получены расчетные формулы для величины активного сопротивления r_1 первичной обмотки, при котором обеспечивается линейность возрастания тока, что необходимо для нормального режима работы системы. Определены ограничения по максимальной частоте импульсов, подаваемых в первичные обмотки трансформаторов. Показано, что при насыщенном магнитопроводе максимальный скачок тока в первичной обмотке равен I_1 / r_1 , что, в свою очередь, накладывает ограничение на верхний предел амплитудного значения прямоугольного импульса напряжения.

Полученные аналитические зависимости между параметрами ферритовых преобразователей [1] дают возможность рационально проектировать такие ФП и обеспечивать их нормальную эксплуатацию в различных рабочих режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РА № 375 А2 1117-5 НОК 08. Տարբերական տրանսֆորմատորի ստորի ազդանշանի լավտրեճական-խնդրապին կերտումիլունան եղանակ

ГИУА

24.10.1997