

Т. ЛАУСМАА

ДРОССЕЛЬ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ КАК МАГНИТНЫЙ КЛЮЧ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В НЕПРЕРЫВНОЙ ФОРМЕ

Как известно, на диодах возможно реализовать операции непрерывной (аналоговой) логики и поэтому они нашли широкое применение для реализации функциональных преобразователей [1, 2]. При этом идеальный диод можно рассматривать как двухпозиционный ключ в координатах (u, i) без потерь и накопления энергии. Аналогичный ключ в координатах (Ψ, i) представляет собой дроссель с прямоугольной кривой намагничивания. Так как дроссель с любой реальной кривой намагничивания можно в некотором приближении рассматривать как систему из линейных индуктивностей и дросселей с прямоугольной кривой намагничивания, то последние можно интерпретировать как ту абстрактную часть реального дросселя, которая способна накапливать информацию (благодаря нелинейности), но не энергию. Оказывается, что соответственным образом соединенные дроссели с прямоугольной кривой намагничивания также реализуют операции непрерывной логики, но естественно уже не на входных напряжениях, а на соответствующих им фиктивных поттокосцеплениях. При этом, очевидно, входные напряжения должны быть переменными, а режим — стационарным. Из сравнения схем функциональных преобразователей с переменным входом и выходом, основанных на диодах или дросселях, явствует, что схемы на дросселях имеют то преимущество, что в них нет потери активной энергии (требуется только наличие накопителей энергии магнитного поля). В настоящей работе рассмотрению подлежат такие соединения дросселей, которые позволяют применять их в функциональных преобразователях.

Сперва введем следующие упрощения.

1. Не учитываем влияние гистерезиса.
2. Рассмотрим каждую обмотку дросселя как состоящую из одного витка.
3. Пренебрежем активными сопротивлениями обмоток и рассеянием.
4. Магнитные потоки насыщения $\pm \Phi_s$ примем равными для всех рассматриваемых дросселей.

Таким образом аппроксимированный дроссель обозначим через D и будем рассматривать его как бесконтактный двухпозиционный ключ, где

- а) насыщенный дроссель ⁽⁺⁾ представляет собой замкнутый контакт (положение «1», где знак положения зависит от направления насыщения);
- б) ненасыщенный дроссель представляет собой разомкнутый контакт (положение «0»).

Дроссель D , подмагниченный при помощи идеального источника постоянного тока, обозначим через M («магнитный ключ») и в схеме будем применять для него символ, изображенный на рис. 1.

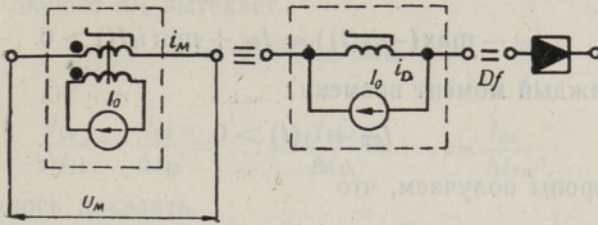


Рис. 1.

Рассмотрим теперь следующее симметричное соединение для ключей M (рис. 2), предполагая, что система входных напряжений*

$$U_1(t) = \{u_{1k}(t)\}$$

составлена из периодических напряжений с периодом T .

Предположим также, что

$$I_{0k} > 0, \tag{1}$$

$$\Psi_S \geq \max_{t_k} \left\{ \int_{t_k}^{t_k+T} u_{1k}^+(t) dt \right\}, \tag{2}$$

$$u^+(t) = \max_{Df} \{u(t), 0\}.$$

Назовем рассматриваемое соединение для ключей M блоком дизъюнкции и обозначим его через БД.

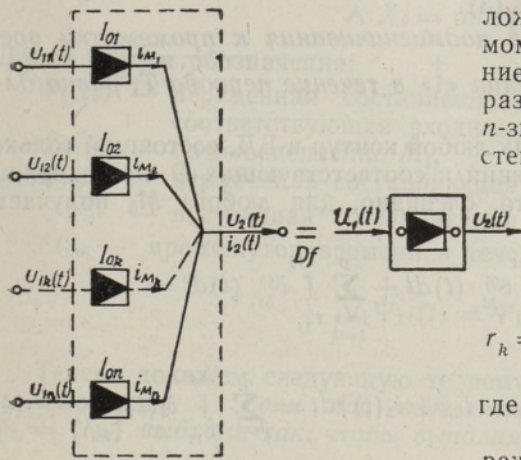


Рис. 2.

Принимая, что совокупность положений всех M в БД в какой-то момент времени определяет состояние БД в этот момент времени, выразим различные состояния r_k n -значным числом в двоичной системе

$$r_k = (a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_i}, \dots, a_{k_n}),$$

где $a_k = 0$ или 1 .

Докажем, что для стационарного режима БД при данных предположениях справедливы следующие утверждения.

Лемма 1. Если

$$\max(-i_2(t)) < I_{0\Sigma} = \sum_{k=1}^n I_{0k}, \tag{3}$$

то в каждый момент времени в положении «1» ($i_D > 0$) находится только один M , а остальные M находятся в положении «0».

* Все свободные индексы принимают значения $1, \dots, n$.

Доказательство. В силу предположений (1) и (2), очевидно, каждый M может быть только в положении «1» или «0». Предположение (3) дает, что

$$I_{0\Sigma} - \max(-i_2(t)) = I_{0\Sigma} + \min i_2(t) > 0.$$

Поэтому в каждый момент времени

$$I_{0\Sigma} + i_2(t) > 0.$$

С другой стороны получаем, что

$$\sum_{j=1}^n i_{D_j}(t) = I_{0\Sigma} + i_2(t).$$

Отсюда следует, что в каждый момент времени в положении «1» должно быть не меньше одного M . Но из-за возникающего тока короткого замыкания между входными фазами в том же положении не может быть больше одного M . Поэтому в каждый момент времени в положении «1» находится именно один M , что и требовалось доказать.

Итак, при выполнении условия (3) состояние r_k для БД выражается как

$$r_k = \underbrace{(00 \dots 0 \overset{+}{1} 0 \dots 0)}_{k-1}.$$

В дальнейшем рассмотрим работу БД только для такой нагрузки, при которой выполнено условие (3).

Лемма 2. *Отношение тока подмагничивания к промежутку времени, когда M бывает в положении «1» в течение периода T , равно для всех M в БД.*

Доказательство. Так как любой контур в БД, состоящий только из источников входных напряжений и соответствующих D , не содержит источников постоянного тока, то, очевидно, для любого M_k получаем

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^{t_k+T} i_{M_k}(t) dt &= \sum_{i=1}^m \int_{t'_{0i}}^{t''_{0i}} i_{M_k}^{(0)}(t) dt + \sum_{j=1}^p \int_{t'_{1j}}^{t''_{1j}} i_{M_k}^{(1)}(t) dt = \\ &= - \sum_{i=1}^m \int_{t'_{0i}}^{t''_{0i}} I_{0k} dt + \sum_{j=1}^p \int_{t'_{1j}}^{t''_{1j}} (I_{0\Sigma} - I_{0k} + i_2(t)) dt = \sum_{j=1}^p \int_{t'_{1j}}^{t''_{1j}} i_2(t) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где $i_{M_k}^{(0)}$, $i_{M_k}^{(1)}$ — ток M_k в положении «0» и «1» соответственно.

Обозначая

$$\sum_{i=1}^m (t''_{0i} - t'_{0i}) = \Delta t_{0k}, \quad \sum_{j=1}^p (t''_{1j} - t'_{1j}) = \Delta t_{1k},$$

из соотношения (4) получаем, что

$$-I_{0k} \cdot \Delta t_{0k} + (I_{0\Sigma} - I_{0k}) \cdot \Delta t_{1k} = 0. \quad (5)$$

Но так как

$$\Delta t_{0k} + \Delta t_{1k} = T,$$

то из (5) для любого M_k вытекает

$$I_{0k} \cdot T = I_{0\Sigma} \cdot \Delta t_{1k}.$$

Итак,

$$\frac{I_{01}}{\Delta t_{11}} = \frac{I_{02}}{\Delta t_{12}} = \dots = \frac{I_{0k}}{\Delta t_{1k}} = \dots = \frac{I_{0n}}{\Delta t_{1n}}, \quad (6)$$

что и требовалось доказать.

Из соотношения (6) следует, что если

$$I_{0k} = I_0,$$

то

$$\Delta t_{1k} = \Delta t_1,$$

что дает

$$I_0 \cdot T = n I_0 \Delta t_1,$$

откуда получаем

$$\Delta t_1 = \frac{T}{n}. \quad (7)$$

Обозначим композиции непрерывной логики (соответственно дизъюнкция и конъюнкция) следующим образом:

$$\bigvee_{i=1}^n X_i = \max_{Df} \{X_i\},$$

$$\bigwedge_{i=1}^n X_i = \min_{Df} \{X_i\}.$$

Далее введем обозначения:

$\Psi_{1j}(t)$ — переменная составляющая фиктивного потокосцепления, соответствующая входному напряжению $u_{1j}(t)$;

$\Psi_{\Sigma j}(t)$ — потокосцепление M_j ;

$\Psi_j(t)$ — переменная составляющая потокосцепления M_j ;

$\bar{\Psi}_j$ — постоянная составляющая потокосцепления M_j ;

Δt_{mk} — промежуток времени в течение T , когда

$$\bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t) = \Psi_{1k}(t).$$

Теперь докажем следующую теорему.

Теорема 1. Если при выполнении условий (1)–(3) система $\Sigma_0 = \{I_{0k}\}$ выбрана так, чтобы выполнялось условие

$$\frac{I_{0k}}{\Delta t_{mk}} = \frac{I_{0\Sigma}}{T}, \quad (8)$$

тогда выход БД выражается через вход следующим образом:

$$u_2(t) = \frac{d}{dt} \left(\bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t) \right). \quad (9)$$

Доказательство. Сначала покажем, что $u_2(t)$, выраженное через (9), для каждого M_k удовлетворяет условию стационарности

$$\int_{t_k}^{t_k+T} u_{M_k}(t) dt = 0. \quad (10)$$

Действительно, из соотношения

$$u_{1k}(t) = u_{M_k}(t) + u_2(t)$$

получаем

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^{t_k+T} u_{M_k}(t) dt &= \int_{t_k}^{t_k+T} u_{1k}(t) dt - \int_{t_k}^{t_k+T} u_2(t) dt = \\ &= - \int_{t_k}^{t_k+T} \frac{d}{dt} \left(\bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t) \right) dt = - \frac{d}{dt} \left(\int_{t_k}^{t_k+T} \left(\bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t) \right) dt \right) = 0, \end{aligned}$$

т. е. выполнено условие стационарности.

Для каждого момента времени действительно следующее соотношение:

$$-u_{1j}(t) + \frac{d}{dt} (\Psi_{\Sigma j}(t)) = -u_{1i}(t) + \frac{d}{dt} (\Psi_{\Sigma i}(t)),$$

откуда интегрируя получаем, что

$$-\Psi_{1j}(t) + \Psi_{\Sigma j}(t) = -\Psi_{1i}(t) + \Psi_{\Sigma i}(t) + C,$$

где C — произвольная постоянная.

Так как

$$\Psi_{\Sigma h}(t) = \Psi_h(t) + \overline{\Psi}_h,$$

то

$$-\Psi_{1j}(t) + \Psi_j(t) = -\Psi_{1i}(t) + \Psi_i(t). \quad (11)$$

Для M_k в положении «1» получаем

$$\Psi_{\Sigma h}(t) = \Psi_h(t) + \overline{\Psi}_h = \Psi_s = \bigvee_{i=1}^n \Psi_{\Sigma i}(t) = \bigvee_{i=1}^n (\Psi_i(t) + \overline{\Psi}_i). \quad (12)$$

Но из предположения (8) и соотношения (6) следует

$$\Delta t_{mk} = \Delta t_{1k}.$$

Таким образом,

$$\overline{\Psi}_j = \overline{\Psi}_0,$$

что дает

$$\Psi_h(t) = \bigvee_{i=1}^n \Psi_i(t). \quad (13)$$

Из соотношений (13) и (11) вытекает теперь, что

$$-\Psi_{1k}(t) = \bigwedge_{j=1}^n (-\Psi_{1j}(t)),$$

откуда

$$\Psi_{1k}(t) = \bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t).$$

Итак,

$$u_2(t) = \frac{d}{dt} (\Psi_{1h}(t)) = \frac{d}{dt} \left(\bigvee_{j=1}^n \Psi_{1j}(t) \right).$$

Теорема доказана.

Из теоремы следует, что если предположение (8) не действительно, то

$$u_2(t) = \frac{d}{dt} \left[\bigvee_{j=1}^n (\Psi_{1j}(t) + \overline{\Psi}_j(\xi_0)) \right].$$

В дальнейшем предполагаем, что для каждого БД выполнены условия (1) — (3) и (8).

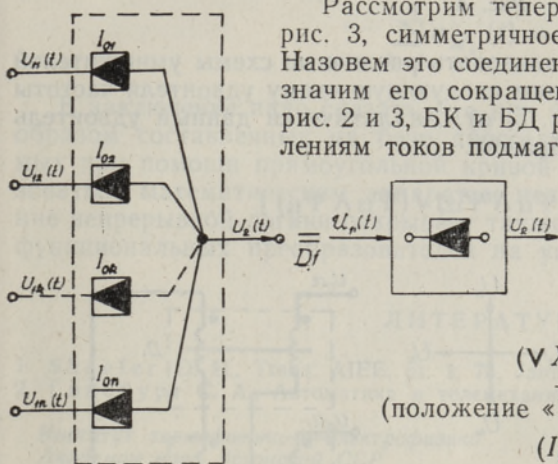


Рис. 3.

Рассмотрим теперь следующее, приведенное на рис. 3, симметричное соединение для ключей М. Назовем это соединение блоком конъюнкции и обозначим его сокращенно через БК. Как видно из рис. 2 и 3, БК и БД различаются только по направлениям токов подмагничивания. Поэтому очевидно, что нужные соотношения для БК можно получить из соответствующих соотношений для БД, если везде сделать взаимную замену

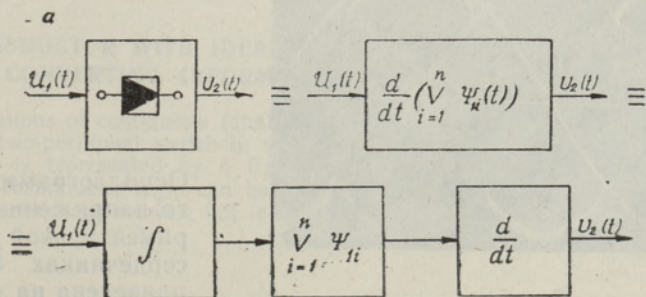
$$(\bigvee X_i) \Leftrightarrow (\bigwedge X_i),$$

$$(\text{положение «1»}) \Leftrightarrow (\text{положение «1̄»}),$$

$$(I_{0k}) \Leftrightarrow (-I_{0k}).$$

Итак, БД и БК выражаются функционально приведенным на рис. 4, а, б образом. Как видно из рисунка, БД и БК можно рассматривать как соединения функциональных звеньев, причем блоки различаются только звеном логической операции.

Пусть дана какая-либо логическая схема, составленная из блоков БД и БК. Подбирая подходящие системы токов подмагничивания, можно получить, что внутрисхемные звенья интегрирования и дифференцирования компенсируются, а если вход данной схемы синусоидален, то можно пренебречь и входными интегральными звеньями. Таким образом, принципиально на базе магнитных ключей М для $\{\Psi_{1h}\}$ можно реализовать любые функции непрерывной логики, представленные при помощи конъюнкции и дизъюнкции.



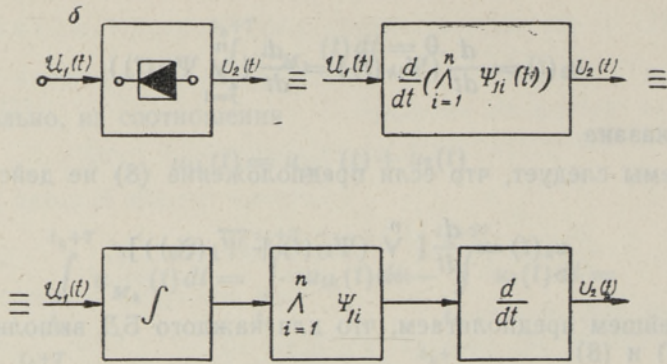


Рис. 4.

Очень удобно на этих M реализовать различные схемы умножителей частоты. Для примера рассмотрим следующую схему удвоителя частоты с синусоидальным входом (рис. 5, а). Аналитически данный удвоитель можно выразить следующим образом:

$$u_H(t) = \frac{d}{dt} [(\Psi_{11} \wedge \Psi_{12}) \vee (\Psi_{13} \wedge \Psi_{14})].$$

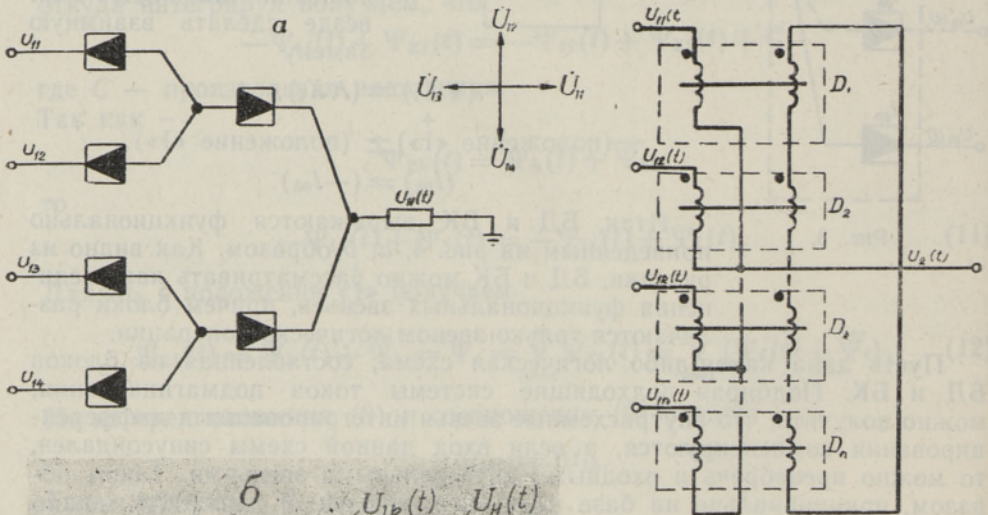


Рис. 6.

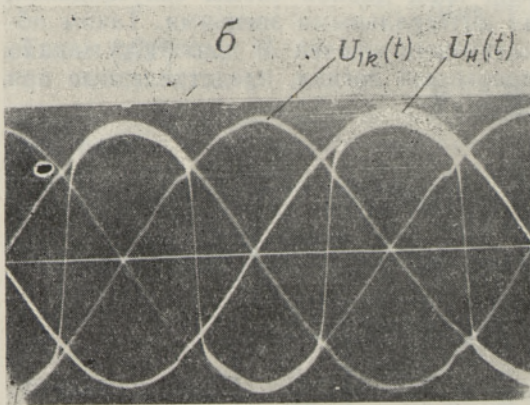


Рис. 5.

Осциллограмма выходного напряжения для экспериментальной схемы на сердечниках 50 НП-0,05 приведена на рис. 5, б.

Интересно отметить, что дроссели D можно использовать и для нахождения арифметической средней входных напряжений, если обмотки подмагничивания всех M , принадлежащих к БД или БК, соединить последовательно и закоротить (рис. 6).

Действительно, для данной схемы получаем

$$u_{1k}(t) - u_{M_k}(t) = u_2(t).$$

Отсюда вытекает

$$u_2(t) = \frac{\sum_{k=1}^n u_{1k}(t) - \sum_{k=1}^n u_{M_k}(t)}{n} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{1k}(t)}{n},$$

так как

$$\sum_{k=1}^n u_{M_k}(t) = 0.$$

В заключение надо сказать, что при анализе схем, соответствующим образом составленных на базе дросселей насыщения, аппроксимируемых при помощи прямоугольной кривой намагничивания, можно пользоваться математическим аппаратом непрерывной логики. Использование непрерывной логики открывает также широкие перспективы синтеза функциональных преобразователей на упомянутых схемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shaefer D. H., Trans. AIEE, pt. 1, 73, January, 679 (1955).
2. Гинсбург С. А., Автоматика и телемеханика, № 2, 115 (1967).

Институт термofизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
11/VI 1970

T. LAUSMAA

TÄISNURKSE MAGNEETIMISKÖVERAGA DROSSEL KUI MAGNETLÜLITI PIDEVA INFORMATSIOONI MUUNDAMISEKS

Nagu teada, saab diodidel realiseerida pideva loogika operatsioone. Seejuures kujutab ideaalne diod endast kahepositsioonilist lüliti teljestikus (u, i). Analogilist lüliti teljestikus (Ψ, i) kujutab endast täisnurkse magneetimisköveraga drossel. Näidatakse, et vastavalt ühendatud täisnurkse magneetimisköveraga drosselitel on samuti võimalik realiseerida pideva loogika operatsioone, kuid nüüd juba mitte sisendpingetel, vaid sisendpingetele vastavatel fiktiivsetel aheldusvoogudel.

T. LAUSMAA

TRANSDUCTOR WITH IDEAL CORE AS MAGNETIC SWITCH FOR CONVERTING INFORMATION IN CONTINUOUS FORM

The operations of continuous (analog) logic can be realized by diodes, the ideal diode representing two-positional switch in coordinates (u, i). An analogous switch in coordinates (Ψ, i) is represented by a transductor with ideal core. It is shown that the operations of continuous logic can be realized by the transductors with ideal cores in the definite connections as well, but in this case on fictitious magnetic flux linkages.