

Тийу САККОС

СТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХТАКТНОМ МАГНИТНОМ УДВОИТЕЛЕ ЧАСТОТЫ

Двухтактный магнитный удвоитель частоты (МУЧ) состоит из двух элементарных МУЧ [1], включаемых относительно нагрузки последовательно (рис. 1) или параллельно. Благодаря крутопадающей внешней характеристике двухтактный МУЧ может использоваться в качестве источника стабилизированных переменного или постоянного токов, например, для питания маломощных плазмотронов. Однако работа таких удвоителей до сих пор изучена сравнительно мало. Так, в [2] рассматривался двухтактный МУЧ последовательного типа и в [3] — параллельного типа только в режимах холостого хода и короткого замыкания. Вопросы регулирования выходных величин и работа МУЧ во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки остаются пока нерешенными. В настоящей статье для решения этих вопросов более подробно анализируется двухтактный МУЧ последовательного типа.

При анализе предполагается, что сердечники имеют прямоугольную безгистерезисную кривую намагничивания, активное сопротивление всех обмоток бесконечно мало, причем $\omega_1 = \omega_0 = \omega_2 = 1$, и нагрузка активна. Питание схемы — синусоидальное двухфазное, со сдвигом во времени на четверть периода, причем $U_{1m} \leq 2\Phi_s \omega_1 \omega$ (Φ_s — магнитный поток насыщения сердечников).

При таких условиях в работе двухтактного МУЧ в зависимости от величины сопротивления нагрузки при фиксированном значении тока подмагничивания принципиально возможны следующие состояния сердечников: а) один сердечник насыщен, три остальных не насыщены; б) два сердечника насыщены, два не насыщены; в) три сердечника насыщены, один не насыщен; г) все сердечники насыщены; д) все сердечники не насыщены.

Последние три режима в этой схеме практически не реализуемы. Так, при режиме в один источник питания закорачивается и возникающий ток короткого замыкания выводит один сердечник из насыщенного состояния, т. е. возникает режим б. По той же причине не может существовать режим г, а режим д имеет место только тогда, когда $r_2 = 0$. Следует иметь в виду и то, что в режиме б два насыщенных сердечника обязательно относятся один к первому и другой — ко второму элементарному двухсердечниковому МУЧ.

Обозначим насыщенное состояние сердечника цифрой «1» и ненасыщенное — цифрой «0». Тогда в зависимости от величины сопротивления нагрузки r_2 при неизменном токе подмагничивания I_0 состояния сердечников чередуются согласно табл. 1.

Таблица 1

Величина r_2	Интервал	Номер сердечника			
		I	II	III	IV
$r_{2кр} \leq r_2 \leq \infty$ (рис. 2)	$0 \leq \omega t \leq \pi/2$	0	1	1	0
	$\pi/2 \leq \omega t \leq \pi$	1	0	1	0
$r_{2п} \leq r_2 \leq r_{2кр}$ (рис. 3)	$\alpha \leq \omega t \leq \beta$	0	1	1	0
	$\beta \leq \omega t \leq \gamma$	0	0	1	0
	$\gamma \leq \omega t \leq \pi/2 + \alpha$	0	1	1	0
	$\pi/2 + \alpha \leq \omega t \leq \pi/2 + \beta$	1	0	1	0
	$\pi/2 + \beta \leq \omega t \leq \pi/2 + \gamma$	1	0	0	0
	$\pi/2 + \gamma \leq \omega t \leq \pi + \alpha$	1	0	1	0
$0 \leq r_2 \leq r_{2п}$ (рис. 4)	$\alpha \leq \omega t \leq \gamma$	0	0	1	0
	$\gamma \leq \omega t \leq \pi/2 + \alpha$	0	1	1	0
	$\pi/2 + \alpha \leq \omega t \leq \pi/2 + \gamma$	1	0	0	0
	$\pi/2 + \gamma \leq \omega t \leq \pi + \alpha$	1	0	1	0

Исходные уравнения:

$$\left. \begin{aligned}
 e_I - e_{II} &= -U_{1m} \sin \omega t, \\
 e_{III} - e_{IV} &= -U_{1m} \cos \omega t, \\
 e_I + e_{II} - e_{III} - e_{IV} &= i_2 r_2, \\
 \Sigma F_I &= i_{11} + I_0 + i_2 = \int_{l_I} H_I dl, \\
 \Sigma F_{II} &= -i_{11} + I_0 + i_2 = \int_{l_{II}} H_{II} dl, \\
 \Sigma F_{III} &= i_{12} + I_0 - i_2 = \int_{l_{III}} H_{III} dl, \\
 \Sigma F_{IV} &= -i_{12} + I_0 - i_2 = \int_{l_{IV}} H_{IV} dl.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Учитывая, что для ненасыщенного сердечника $\Sigma F = \int_l H dl = 0$ и для насыщенного $e = -\frac{d\psi}{dt} = 0$, из системы уравнений (1) получаем приведенные в табл. 2 уравнения напряжений, э. д. с. и токов для отдельных состояний двухтактного МУЧ.

На основе полученных выражений на рис. 2—4 нанесены кривые э. д. с., напряжений и токов, а также кривые изменения магнитной индукции в сердечниках для одного элементарного МУЧ.

При $r_2 \geq r_{2кр}$ двухтактный МУЧ работает в режиме б, причем состояния сердечников меняются за каждый полупериод напряжения питания (рис. 2). Если $r_2 < r_{2кр}$, то в работе двухтактного МУЧ наряду с режимом б возникает еще и режим а (рис. 3 и 4), причем длительность каждого режима зависит от величины сопротивления нагрузки r_2 .

Для определения граничных значений r_2 , соответствующих переходам от одного режима к другому, рассмотрим работу двухтактного МУЧ при $r_{2п} \leq r_2 \leq r_{2кр}$. В этом случае режим а существует в интервалах $\beta \leq \omega t \leq \gamma$ (рис 3), причем $\beta = \pi/2 - \gamma$. Учитывая, что i_{11} обращается в нуль в те моменты времени, когда $\omega t = \beta = \pi/2 - \gamma$, из урав-

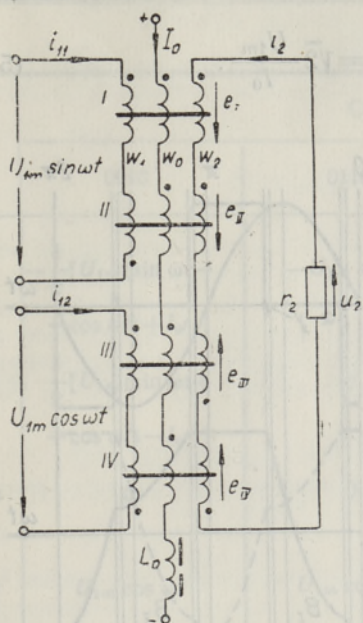


Рис. 1.

нения для i_{11} (состояние 0110 в табл. 2) можно определить зависимости $\beta = f(r_2)$ и $\gamma = f(r_2)$

$$\sin \beta + \cos \beta = \sin \gamma + \cos \gamma = \frac{I_0 r_2}{U_{1m}}. \quad (2)$$

Зависимость угла α , соответствующего моменту перехода сердечников из ненасыщенного состояния в насыщенное, от β и γ следует из условия, что среднее за период значение э. д. с. одного сердечника должно равняться нулю. Например, для первого сердечника

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} e_I d\omega t = 0, \quad (3)$$

откуда с учетом (2) получим

$$\alpha = \arcsin \left[\left(1 + \beta - \frac{\pi}{4} \right) \cos \beta - \left(1 - \beta + \frac{\pi}{4} \right) \sin \beta \right]. \quad (4)$$

С увеличением r_2 продолжительность режима a сокращается и начиная с $r_{2кр}$ режим a в работе МУЧ отсутствует. Если $r_2 = r_{2кр}$, то $\beta = \gamma = \frac{\pi}{4}$ (рис. 2) и согласно (2)

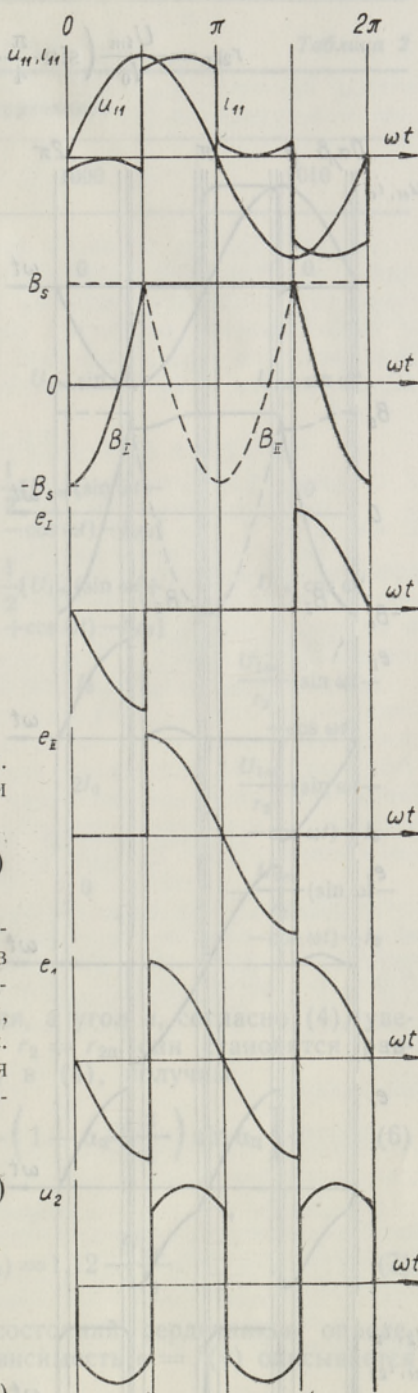


Рис. 2.

$$r_{2kp} = \frac{U_{1m}}{I_0} \left(\sin \frac{\pi}{4} + \cos \frac{\pi}{4} \right) = \sqrt{2} \frac{U_{1m}}{I_0} \quad (5)$$

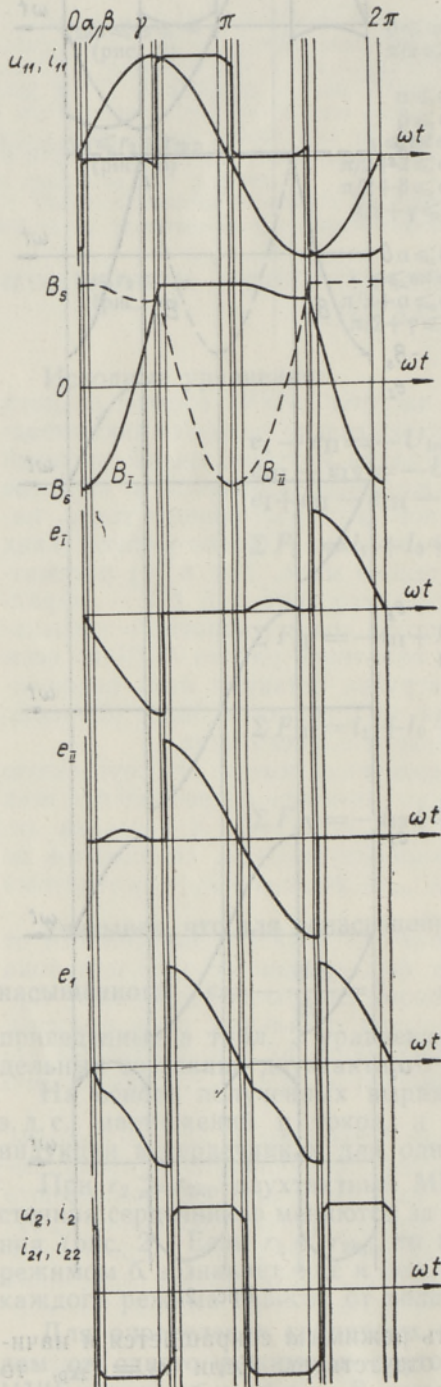


Рис. 3.

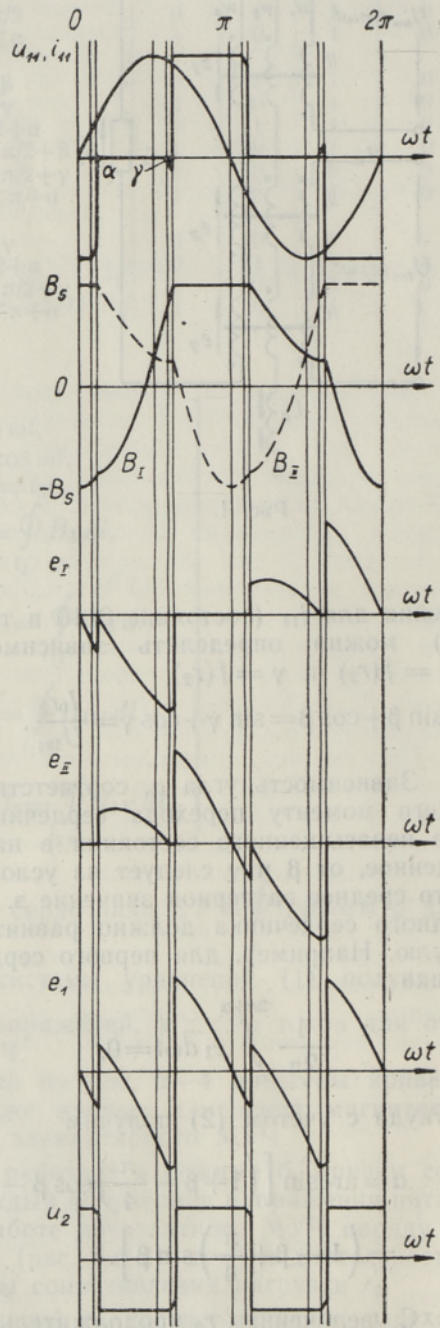


Рис. 4.

Таблица 2

Величина	Состояние сердечников			
	0010	0110	1000	1010
e_I	$-\frac{1}{2}[U_{1m}(\sin \omega t - \cos \omega t) + I_0 r_2]$	$-U_{1m} \sin \omega t$	0	0
e_{II}	$\frac{1}{2}[U_{1m}(\sin \omega t + \cos \omega t) - I_0 r_2]$	0	$U_{1m} \sin \omega t$	$U_{1m} \sin \omega t$
e_{III}	0	0	$\frac{1}{2}[U_{1m}(\sin \omega t - \cos \omega t) - I_0 r_2]$	0
e_{IV}	$U_{1m} \cos \omega t$	$U_{1m} \cos \omega t$	$\frac{1}{2}[U_{1m}(\sin \omega t + \cos \omega t) - I_0 r_2]$	$U_{1m} \cos \omega t$
i_2	$-I_0$	$-\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t + \cos \omega t)$	I_0	$\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t - \cos \omega t)$
i_{11}	0	$\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t + \cos \omega t) - I_0$	$2I_0$	$\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t - \cos \omega t) + I_0$
i_{12}	$2I_0$	$\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t + \cos \omega t) + I_0$	0	$-\frac{U_{1m}}{r_2}(\sin \omega t - \cos \omega t) + I_0$

С уменьшением r_2 угол β уменьшается, а угол α , согласно (4), увеличивается и при некотором значении $r_2 = r_{2п}$ они становятся равными, т. е. $\alpha = \beta = \alpha_{п}$. Подставив $\alpha_{п}$ в (4), получим

$$\alpha_{п} = \arcsin \left[\left(1 + \alpha_{п} - \frac{\pi}{4} \right) \cos \alpha_{п} - \left(1 - \alpha_{п} + \frac{\pi}{4} \right) \sin \alpha_{п} \right], \quad (6)$$

откуда $\alpha_{п} = 7^\circ 21'$ и из (2)

$$r_{2п} = \frac{U_{1m}}{I_0} (\sin \alpha_{п} + \cos \alpha_{п}) = 1,12 \frac{U_{1m}}{I_0}. \quad (7)$$

Для случая $r_2 \leq r_{2п}$ чередование состояний сердечников определяется углами α и γ (рис. 4), причем зависимость $\alpha = f(\gamma)$ описывается условием (3), откуда

$$(1 - \gamma + \alpha) \sin \gamma - (1 + \gamma - \alpha) \cos \gamma = 3 \sin \alpha - \cos \alpha. \quad (8)$$

Согласно (2) уменьшение r_2 вызывает увеличение угла γ , причем, согласно (8), возрастает и угол α . Однако γ увеличивается быстрее, чем α , и поэтому при некотором граничном сопротивлении ($r_2 = r_{2гр}$) $\gamma_{гр} = \pi/2 + \alpha_{гр}$. Подставив в (8) вместо α и γ их граничные значения, получим

$$\cos \alpha_{\text{гp}} = \sin \alpha_{\text{гp}}, \quad (9)$$

откуда $\alpha_{\text{гp}} = \pi/4$; $\gamma_{\text{гp}} = \pi/2 + \alpha_{\text{гp}} = 3\pi/4$ и граничное значение сопротивления нагрузки из (2)

$$r_{2\text{гp}} = \frac{U_{1m}}{I_0} (\sin \gamma_{\text{гp}} + \cos \gamma_{\text{гp}}) = 0.$$

Таким образом, в работе двухтактного МУЧ в зависимости от величины сопротивления нагрузки можно выделить три разных режима работы, отличающихся наличием и чередованием во времени насыщенных и ненасыщенных состояний сердечников. Полученные уравнения для этих режимов служат основой для расчета внешних и регулировочных характеристик, а также энергетических показателей двухтактного МУЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саккос Т. Ю., Исследование регулируемых магнитных удвоителей частоты с самоподмагничиванием, Автореф. канд. дис., Таллин, 1973.
2. Krämer W., Ein neuer Schweißstransformator mit Frequenzwandlung und symmetrischer Netzbelastung, Elektrotechn. Z. 71, Nr. 8/9 (1950).
3. Harriott L. C., Magnetic Frequency Conversion, Proc. National Electronics Conference, Chicago III, 9, 1953.

Институт термодинамики
и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
17/VI 1974

Tiiu SAKKOS

STATSIONAARSED PROTSESSID KAHETAHTILISES MAGNETSAGEDUSKAHEKORDISTIS

Analüüsitakse kahetaktilise magnetsageduskahekordisti tööd muutuva koormuse korral eeldusel, et südämike magneetimiskõver on täisnurkne. Näidatakse, et sõltuvalt koormustakistuse suurusel võib kahetaktilise magnetsageduskahekordisti töös eristada kolme režiimi, mis üksteisest erinevad südämike küllastunud ja küllastamata seisundite esinemise ja ajalise järgnevuse poolest. On leitud koormustakistuse suurused, mille juures toimub üleminek ühest töörežiimist teise.

Tiiu SAKKOS

STATIONARY PROCESSES IN THE TWO-CYCLE MAGNETIC-FREQUENCY DOUBLER

Operation of the two-cycle magnetic frequency doubler in the case the load is changing and the magnetization curve of the cores rectangular, is analysed. It is shown that in dependence on the value of load resistance it is possible to discern between three modes of operation in the operation of the two-cycle magnetic frequency doubler, differing from each other by the presence and alteration of saturated and unsaturated states of the cores. The values of load resistance, corresponding to the transition between the modes of operation, are given.

$$(8) \quad \dots = \gamma \cos(\alpha + \gamma + 1) - \gamma \sin(\alpha + \gamma - 1)$$