

*В.П. Бондаренко, канд. техн. наук, Т. В. Бондаренко
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ГЛУБОКОРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Существенным недостатком традиционных тиристорных преобразователей приводов постоянного тока является снижение коэффициента мощности при уменьшении частоты вращения, что нарушает нормальную работу установки и питающей сети. Особенно это проявляется в приводах, работающих с частыми пусками и реверсами, при которых токи значительно превышают номинальные значения. Трогание с места в них сопровождается толчком реактивной мощности, достигающим двойной мощности привода. Неслучайно по этой причине было приостановлено внедрение электроприводов по системе ТП-Д на реверсивных прокатных станах и других мощных глубокорегулируемых установках.

Между тем, энергетические показатели тиристорных преобразователей могут быть значительно повышены, если заменить в них традиционные тиристоры на полностью управляемые тиристорные или транзисторные вентили.

Следует отметить, что в 90-е годы на мировом рынке появились мощные биполярные транзисторы типа IGBT с изолированным затвором и полевыми транзисторами в цепях управления [1]. Последнее время фирмами «ABB Semiconductors» и «Mitsubishi» были созданы полностью управляемые тиристоры с вмонтированными в них блоками управления. Это тиристоры типа IGCT на напряжения, исчисляемые киловольтами, и токи, достигающие тысяч ампер. Новые разработки в этом направлении ведутся весьма интенсивно. Быстро изменяется номенклатура полупроводниковых приборов. Их мощности непрерывно растут, а качество повышается. Параллельно с этим внедряются схемные решения, рассчитанные на использование таких вентилях и позволяющие значительно повысить энергетические показатели электроприводов.

С целью анализа работы тиристорных преобразователей приведем некоторые выражения для их основных энергетических коэффициентов.

Как известно [2], полная мощность сети переменного тока с нелинейными элементами может быть представлена суммой четырех составляющих, т.е.

$$S = \sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2 + H^2}, \quad (1)$$

где P_a – активная мощность; Q – реактивная мощность, обусловленная фазовым сдвигом тока относительно напряжения; T_u – мощность искажения, возникающая при наличии в кривой тока гармонических составляющих, отсутствующих в кривой напряжения; H – мощность несимметрии, обусловленная несимметричной нагрузкой.

Исходя из выражения полной мощности запишем уравнения для следующих энергетических коэффициентов:

мощности K_M , который равен отношению активной мощности P_a к полной мощности S , т.е.

$$K_M = \frac{P_a}{S} = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2 + H^2}} =$$

$$= \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}} \times \frac{\sqrt{P_a^2 + Q^2}}{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2}} \times \frac{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2}}{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2 + H^2}} = K_c \cdot K_u \cdot K_H ; \quad (2)$$

сдвига, который равен косинусу угла сдвига основной гармоники тока относительно синусоидального напряжения сети, т.е.

$$K_c = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}} = \cos \varphi ; \quad (3)$$

искажения, который определяется отношением действующего значения основной гармоники сетевого тока $I_{(1)}$ к действующему значению этого тока I_∂ , т.е.

$$K_u = \frac{I_{(1)}}{I_\partial} ; \quad (4)$$

несимметрии, который характеризует степень несимметрии нагрузки, т.е.

$$K_H = \frac{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2}}{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T_u^2 + H^2}} . \quad (5)$$

Работу преобразователей с полностью управляемыми вентилями проанализируем на однофазной схеме выпрямления, работающей на активно-индуктивную нагрузку (рис. 1,а).

В схеме использованы полностью управляемые тиристоры V_1 и V_2 и нулевой диод V_0 . Анализ работы преобразователя проводится без учета коммутационных процессов в вентилях и при идеальном сглаживании выпрямленного тока ($L_d \rightarrow \infty$). Изменяя углы управления α_1 и α_2 (рис.1,б), центры тяжести прямоугольников токов i_{21} i_{22} можно смещать относительно вершин синусоид соответствующих напряжений u_{21} , u_{22} , как в сторону отставания, так и в сторону опережения.

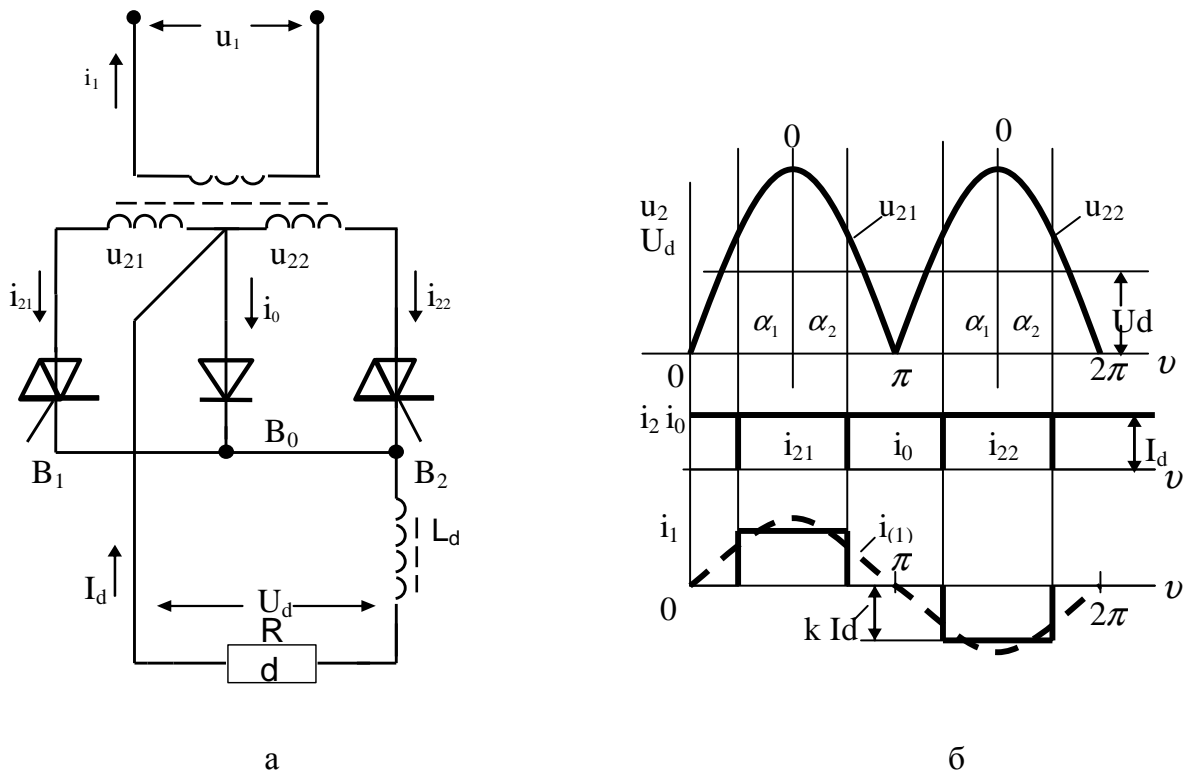


Рис. 1. Схема (а) и временные диаграммы (б) токов и напряжений преобразователя

Среднее значение выпрямленного напряжения при таком управлении без учета коммутационных процессов определится как

$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \left[\int_{-\alpha_1}^0 \cos v dv + \int_0^{\alpha_2} \cos v dv \right] = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2). \quad (6)$$

Здесь U_2 – действующее значение вторичного напряжения.

Для данной схемы $K_n = 1$ и $K_M = K_c \cdot K_u$. Желая получить $K_c = 1$, принимаем $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Тогда

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \sin \alpha = U_{dm} \sin \alpha. \quad (7)$$

Коэффициент искажения K_u можно вычислить по формуле (4). Для этого определяются действующие значения первой гармоники сетевого тока $I_{(1)}$ и соответствующие им действующие значения этого тока при различных величинах α . С этой целью график первичного тока i_1 разлагается в ряд Фурье и по коэффициентам ряда $a_{(1)}$ и $b_{(1)}$ определяется амплитуда первой гармоники сетевого тока, т.е.

$$I_{(1)m} = \sqrt{a_{(1)}^2 + b_{(1)}^2} . \quad (8)$$

Запишем выражения гармонических составляющих первичных токов в функции угла α [3]:

$$i_{(1)\alpha} = \frac{4kId}{\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \sin \nu + \frac{1}{3} \cos 3\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \sin 3\nu + \frac{1}{5} \cos 5\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \sin 5\nu + \dots \right], \quad (9)$$

где k – коэффициент трансформации.

Амплитуда первой гармоники сетевого тока

$$I_{(1)m} = \frac{4kId}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right).$$

Действующее значение первичных токов при изменении α

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{k^2}{\pi} \cdot \int_0^{2\alpha} I_d^2 dx} = \frac{\sqrt{2}k}{\sqrt{\pi}} I_d \sqrt{\alpha} \quad (11)$$

В таблице приведены результаты вычислений, выполненных по формулам (4), (7), (10) и (11), величин $I_{(1)m}$, I_{∂} , k_u и $\frac{U_d}{U_{dm}}$ при разных значениях α .

Вычисления коэффициента искажения $K_{и}$ и $\frac{U_d}{U_{dm}}$

α°	0	10	20	30	45	60	75	90
$\frac{I_{(1)m}}{I_d}$	0	0,222	0,443	0,636	0,900	1,102	0,230	1,273
$\frac{I_{\partial}}{I_d}$	0	0,332	0,470	0,569	0,697	0,815	0,912	1,000
$k_u = \frac{I_{(1)m}}{\sqrt{2}I_d}$	–	0,474	0,668	0,792	0,915	0,957	0,957	0,903
$\frac{U_d}{U_{dm}}$	0	0,174	0,342	0,500	0,707	0,866	0,965	1,000

По данным таблицы на рис. 2 построены регулировочная характеристика преобразователя и графики изменения коэффициентов K_c , $K_{и}$, K_m в функции относительного значения выпрямленного напряжения $\frac{U_d}{U_{dm}}$. Там же для сравнения приведены аналогичные графики изменения K_{m0} и K_{c0} типовых преобразователей на традиционных тиристорах с односторонним управлением.

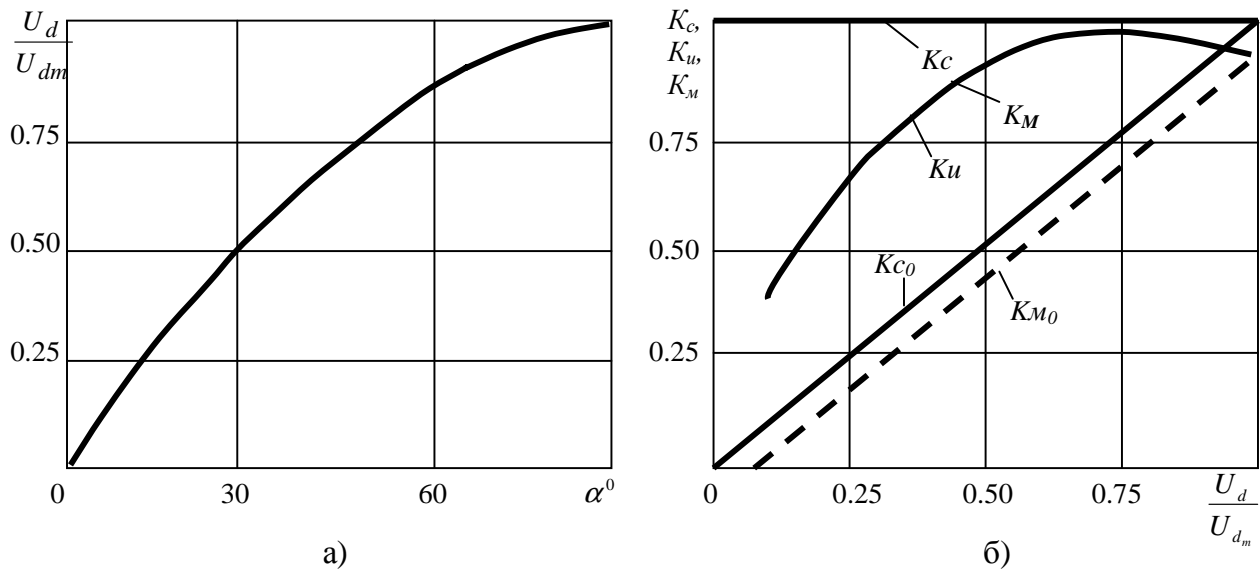


Рис. 2. Регулировочная (а) и энергетические (б) характеристики преобразователя

Как следует из графиков, коэффициент сдвига $K_C = 1$ на всем диапазоне регулирования напряжения, а коэффициенты искажения K_e и мощности K_M изменяются в пределах 0,903 - 0,474. Наибольшее их значение достигает 0,960. В то же время коэффициенты K_{C0} и K_{M0} типовых преобразователей значительно ниже, что объясняется фазовым сдвигом токов при регулировании и искажением их формы.

В трехфазных схемах преобразователей при биполярных тиристорах коэффициенты $K_{И}$ и K_M будут значительно выше, так как диапазон изменения α в них уже и лежит в пределах 60^0 .

Кроме того, соединение первичных обмоток трансформатора в треугольник позволит исключить гармонические составляющие токов, кратные трем, что также будет способствовать повышению $K_{И}$ и K_M

Таким образом, использование в преобразователях регулируемого электропривода биполярных вентилях обеспечит коэффициент сдвига, равный единице, на всем диапазоне регулирования и за счет этого снизит расчетную мощность согласующего трансформатора и других элементов схемы.

Список литературы

1. Закладный О.М., Праховник А.В., Соловей О.И. Энергобережения засобами промислового електропривода. – К.: Кондор, 2005.– 407 с.
2. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляных преобразователей. – М.: Энергия, 1978, – 319 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: ГИТТЛ, 1953 – 607 с.