

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Ф. ОБЕРГАН, К. А. ХОРЬКОВ  
Ш. С. РОЙЗ

Одной из важнейших проблем электропривода переменного тока в настоящее время является создание регулируемого электропривода. Частотное управление электродвигателями переменного тока (асинхронными, синхронными), как наиболее экономичное, начинает широко внедряться в промышленность. Поэтому создание источников переменного тока с регулируемой частотой соответствует современным требованиям развития электромашиностроения.

Нами спроектирована, изготовлена и исследуется модель преобразователя с регулируемой частотой. Принципиальная схема преобразователя, поясняющая его принцип работы, представлена на рис. 1.

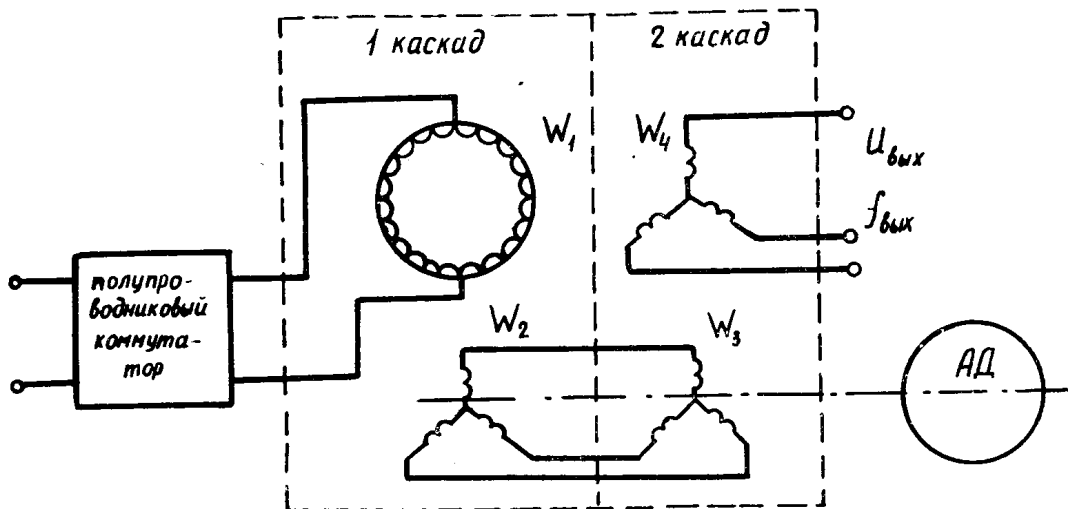


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя с регулируемой частотой.

Следует отметить, что имеются преобразователи фиксированной повышенной частоты [1, 2, 3].

Отличительной особенностью описываемого преобразователя является возможность регулирования частоты с помощью полупроводникового коммутатора, расположенного на входе преобразователя.

Данный преобразователь является двухкаскадным и бесконтактным. Обмотки  $W_1$  и  $W_2$  относятся к первому каскаду, обмотки  $W_3$  и  $W_4$  — ко второму. Оба каскада совмещены в одном магнитопроводе,

при этом выполнены все условия совмещения двух электрических машин в одном магнитопроводе. Вращение преобразователя осуществляется с помощью асинхронного двигателя.

Вращающееся магнитное поле обмотки  $W_1$  получается с помощью полупроводникового коммутатора, при этом скорость вращения поля задается необходимой частотой выхода.

При протекании тока  $I_1$ , по обмотке  $W_1$  создается н. с.  $F_1$ . Последняя создает вращающийся с помощью полупроводникового коммутатора магнитный поток  $\Phi_1$  с числом полюсов  $2 P_1$ . Ротор преобразователя вращается со скоростью  $n$ , и в обмотке  $W_2$  с числом полюсов  $2 P_1$  наводится э.д.с. с частотой.

$$f_2 = \frac{P_1 (n \pm n_1)}{60}, \quad (1)$$

где  $n_1$  — скорость вращения потока  $\Phi_1$  относительно статора. Знак (+) относится к встречному вращению потока  $\Phi_1$  и ротора, (—) — к согласному.

Нагрузкой обмотки ротора  $W_1$  является обмотка  $W_3$  второго каскада с числом полюсов  $2 P_2$ . Переменный ток, протекая по обмотке  $W_1$  создает поток  $\Phi_3$ , вращающийся относительно ротора со скоростью

$$n_2 = \frac{60 f_2}{P_2}. \quad (2)$$

В зависимости от порядка чередования фаз обмотки  $W_3$  поток  $\Phi_3$  относительно статора будет вращаться со скоростью

$$n_3 = n + n_2. \quad (3)$$

Знак (+) относится к согласному вращению потока и ротора; (—) — к встречному.

С учетом (1), (2), (3) выражения для частот на выходе запишутся в следующем виде:

$$f_{1\text{вых}} = \frac{(P_2 + P_1) n}{60} \pm \frac{P_1 n_1}{60}, \quad (4a)$$

$$f_{2\text{вых}} = \frac{(P_2 - P_1) n}{60} \pm \frac{P_1 n_1}{60}. \quad (4б)$$

Частота э.д.с. выходной обмотки будет, таким образом, определяться выражениями (а), (4б).

Знак плюс в скобках в (4а) соответствует обратному порядку чередования фаз обмоток  $W_2$  и  $W_3$ , знак минус в (4б) — прямому.

Из знаков ( $\pm$ ) в (4а) (+) относится к встречному направлению вращения поля обмотки  $W_1$  и ротора, (—) — к согласному, в (4б) (—) — встречному, (+) — к согласному.

Для анализа работы преобразователя необходимо определить базисные и критические частоты выхода.

За базисные частоты выхода можно принять частоты при неподвижном потоке  $\Phi_1$ . Из выражений (4а) и (4б) при  $n_1=0$  находим:

$$f_{1б\text{вых}} = \frac{(P_2 + P_1) n}{60}, \quad (5a)$$

$$f_{2б\text{вых}} = \frac{(P_2 - P_1) n}{60}. \quad (5б)$$

За критические частоты выхода принимаем частоты, при которых выходная мощность преобразователя равна нулю. Одна критическая частота выхода  $f_{1кр\text{вых}} = 0$  при мощности выхода  $P_{\text{вых}} = 0$  полу-

чается при прямом порядке чередования фаз обмоток  $W_2$  и  $W_3$  и скорости вращения поля  $\Phi_1$   $n_1=2n$  при встречном вращении поля обмотки  $W_1$  и ротора (согласно 4б,  $\frac{P_2}{P_1}=3$ ).

Другая критическая скорость, при которой  $P_{\text{вых}}=0$ , получится при согласном вращении поля обмотки  $W_1$  и ротора (согласно 4б) при  $n_1=n$

$$f_{2 \text{ кр вых}} = \frac{(P_2 - P_1) n}{60} + \frac{P_1 n_1}{60} = \frac{P_2 n}{60} \quad (6)$$

Аналогичное выражение получится из (4а) при согласном вращении поля обмотки  $W_1$  и ротора при  $n=n_1$ .

Для анализа режимов работы построим зависимости частот выхода и выхода  $f_{\text{вых}} = f(f_{\text{вх}})$ . Отношение  $\frac{P_2}{P_1}$  примем равным 3. Изменение

скорости вращения потока обмотки  $W_1$  определяется формулой

$$n = \pm (0 \div 1) n.$$

Зависимости  $f_{1 \text{ вых}}$   $f_{2 \text{ вых}} = f(f_{\text{вх}})$  представлены на рис. 2. Из рисунка можно определить режим работы преобразователя для различных диапазонов частот (рисунок соответствует изготовленной модели). Для диапазона аб первый каскад работает в режиме преобразователя (поток обмотки  $W_1$  вращается встречно направлению ротора); второй каскад работает в режиме генератора (направление потока обмотки  $W_3$  и ротора встречное). В диапазоне вс первый и второй каскады работают в режиме генератора. В диапазоне cd первый каскад работает в режиме генератора, второй — электромагнитного тормоза. В диапазоне de оба каскада работают в режимах преобразователя. Для диапазонов аб и вс принимается прямой порядок чередования фаз обмоток  $W_2$  и  $W_3$ , для cd и de — обратный.

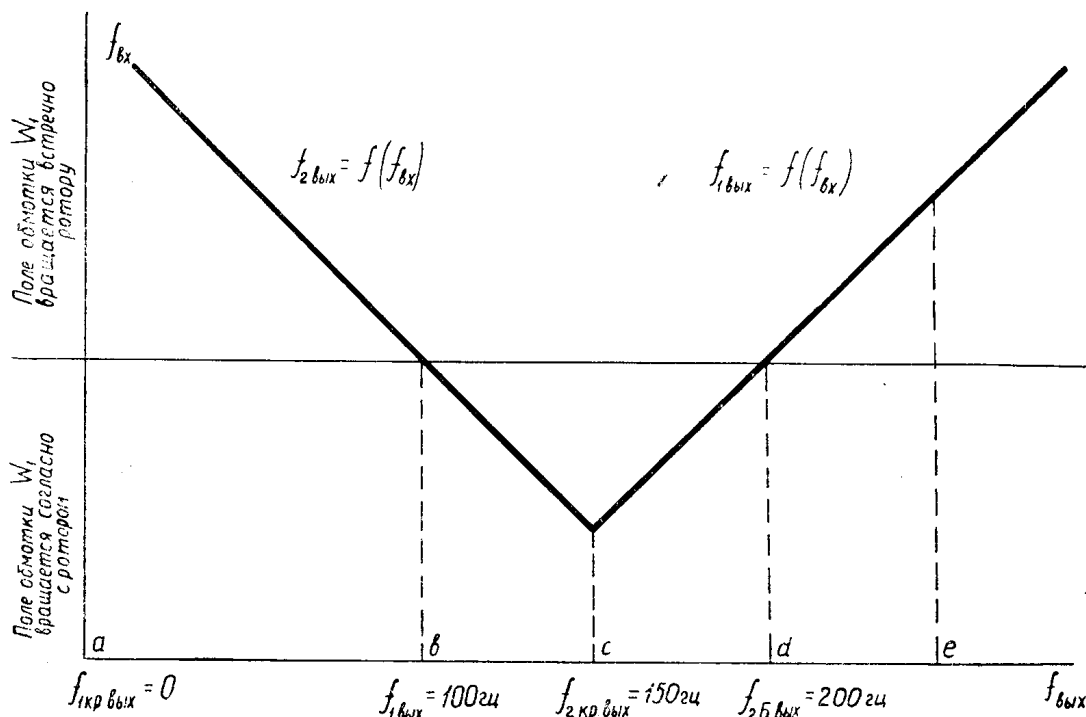


Рис. 2. Зависимости  $f_{1 \text{ вых}}$ ,  $f_{2 \text{ вых}} = f(f_{\text{вх}})$  для изготовленной модели.

Для изготовленной модели, имеющей  $2P_1 = 2$  и  $2P_2 = 6$ , получились следующие значения критических и базисных частот:

$$f_{1 \text{ кр вых}} = 0, f_{2 \text{ кр вых}} = 15 \text{ гц}, f_{1 \text{ б вых}} = 100 \text{ гц}, f_{2 \text{ б вых}} = 200 \text{ гц}.$$

Далее проведено исследование зависимости входной мощности от частоты выхода  $P_1 = f(f_{\text{вых}})$ , полезной мощности приводного двигателя  $P_{\text{дв}} = f(f_{\text{вых}})$  и кпд  $\eta = f(f_{\text{вых}})$ .

Получены аналитические выражения для  $P_1$ ,  $P_{\text{дв}}$  и  $\eta$ . Проведено сравнение с экспериментальными данными.

Для диапазона *ab*

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ - \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) - \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 - P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega} + \sum P_1, \quad (7)$$

$$P_{\text{дв}} = P_{\psi_4} \left[ 1 + \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) - \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 - P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1}. \quad (8)$$

Для диапазона

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) + \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 - P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega_1 - \omega} + \sum P_1, \quad (9)$$

$$P_{\text{дв}} = P_{\psi_4} \left[ 1 - \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) + \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 + P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1}. \quad (10)$$

Для диапазона *cd*

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ - \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) - \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 + P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega - \omega_1} + \sum P_1, \quad (11)$$

$$P_{\text{дв}} = P_{\psi_4} \left[ 1 + \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 - P_1) - \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 + P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega - \omega_1}, \quad (12)$$

Для диапазона *de*

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 + P_1) + \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 + P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1} + \sum P_1, \quad (13)$$

$$P_{\text{дв}} = P_{\psi_4} \left[ 1 - \frac{\omega_1 P_1}{\omega (P_2 + P_1) + \omega_1 P_1} \right] + (\sum P_3 + P_{\text{Cu}_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1}, \quad (14)$$

где

$P_{\psi_4}$  — электромагнитная мощность выходной обмотки  $W_4$ ;

$\sum P_3 = P_{\text{Cu}_2} + P_{\text{Ee}_3}$  — потери в обмотке  $W_3$ ;

$P_{\text{Cu}_2}$  — потери в обмотке  $W_1$ ;

$\omega$  — угловая скорость вращения ротора;

$\omega_1$  — угловая скорость вращения поля обмотки

Для любого диапазона к.п.д. преобразователя равен

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_1 + P_{\text{дв}}}, \quad (15)$$

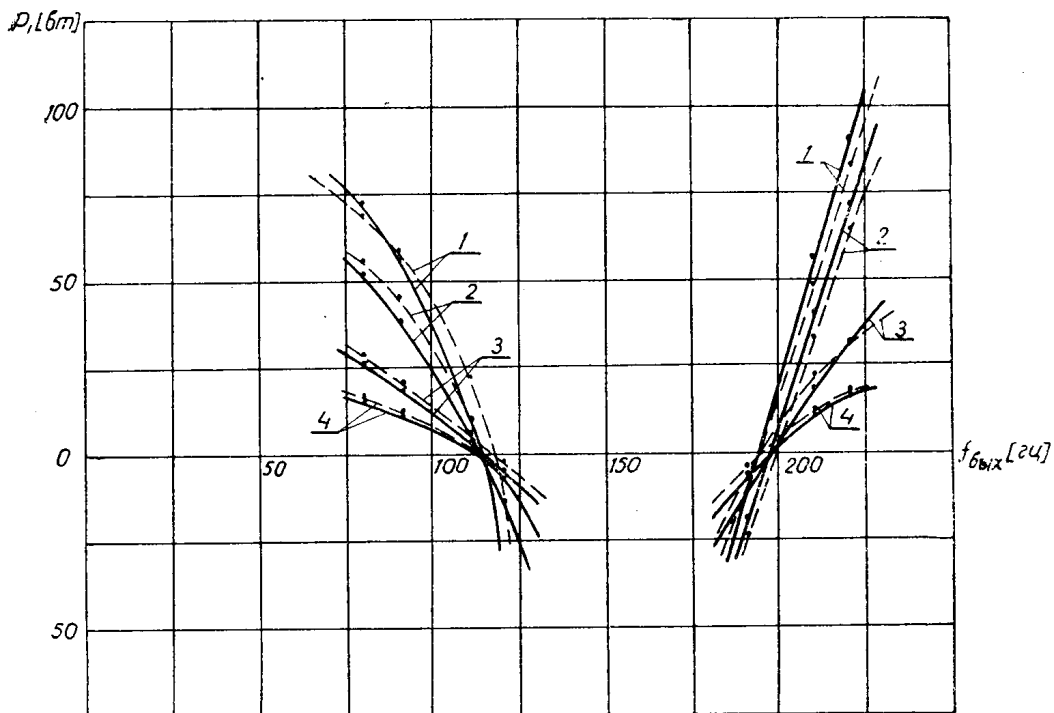
где

$P_{\text{вых}} = P_{\psi_4} \cdot \eta_4$  — выходная мощность преобразователя

$\eta_4$  — к.п.д. обмотки  $W_4$ .

На рис. 3 изображены экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) зависимости  $P_1 = f(f_{\text{вых}})$  при различных мощностях выхода.

Кривые 1 соответствуют мощности выхода 210 вт; 2—180 вт; 3—120 вт, 4—60 вт. На рисунке обращает внимание удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных кривых. Из рисунка может быть определен целесообразный диапазон частот преобразователя. Он находится в пределах 80—120 гц и 180—220 гц для исследуемой модели.



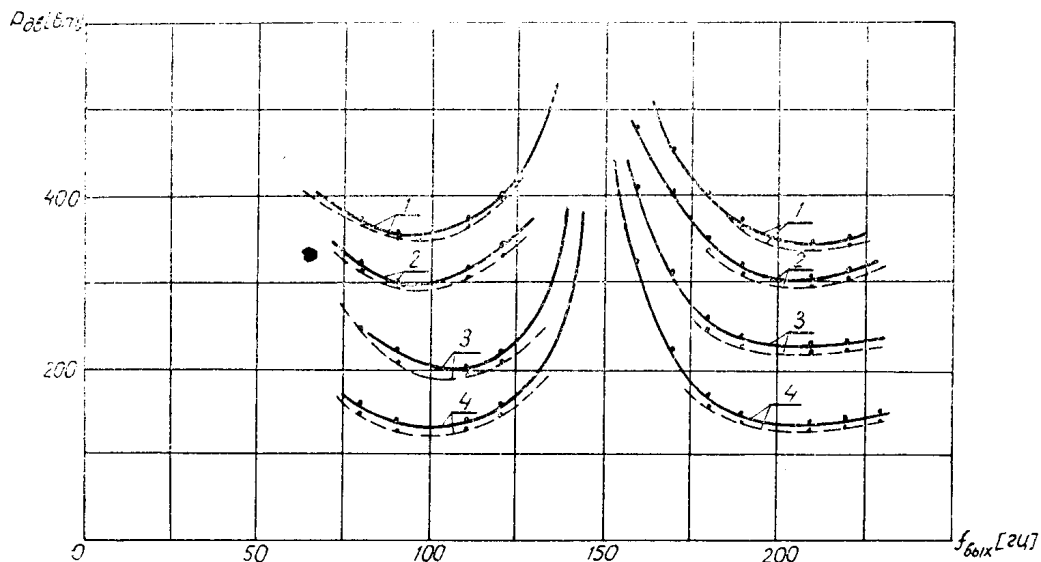
Р и с. 3. Зависимость  $P_1 = f(f_{\text{вых}})$  при различных значениях выходной мощности.

Входную мощность преобразователя можно снизить с помощью емкостей, подключенных на выходе. Для исследуемой модели при емкости  $C = 5 \text{ мкф}$  мощность входа уменьшается более чем в 2 раза (емкость определялась подбором).

При данных условиях мощность полупроводникового коммутатора в 7—10 раз меньше мощности преобразователя.

В диапазонах 120—150 гц и 150—180 гц мощность входа может оказаться отрицательной. Это можно объяснить тем, что в диапазонах bc и cd первый каскад работает в режиме генератора.

Экспериментальные (сплошные линии) и аналитические (пунктирные линии) зависимости  $P_{\text{дв}} = f(f_{\text{вых}})$  при различных мощностях выхода 1—120 вт, 2—180 вт, 3—120 вт, 4—60 вт представлены на рис. 4.



Р и с. 4. Зависимость  $P_{\text{дв}} = f(f_{\text{вых}})$  при различных значениях выходной мощности.

Из рисунка следует, что работа двигателя наиболее целесообразна в диапазонах 80—120 гц и 180—220 гц. В этих режимах мощность приводного двигателя несколько выше мощности при работе двигателя на базисных частотах (для нашего случая примерно на 15÷20 проц.).

При частотах 120—150 гц и 150÷180 гц мощность двигателя возрастает довольно резко. Это объясняется тем, что в этих диапазонах первый каскад работает в режиме генератора.

Важным показателем любой электрической машины является величина к.п.д. На рис. 5 приведены расчетные (пунктирные линии) и экспериментальные (сплошные линии) зависимости  $\eta = f(f_{\text{вых}})$ . Из рисунка видно, что в наиболее целесообразном для работы диапазоне частот к.п.д. составляет примерно 48 проц.

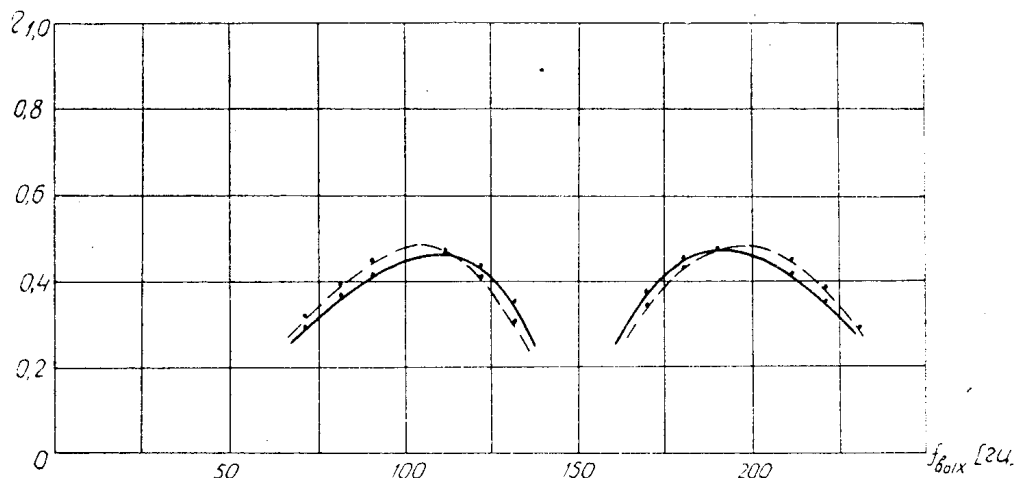


Рис. 5 Зависимость  $\eta = f(f_{\text{вых}})$ .

В целом, в результате исследования преобразователя с регулируемой частотой устанавливается наиболее целесообразный для работы диапазон частот. Он находится в пределах 80÷120 гц и 180—220 гц, что, безусловно, скажется на некоторых ограниченных возможностях его применения.

Определяется необходимая мощность полупроводникового коммутатора. Она составляет примерно 15—20 проц. от мощности преобразователя.

Следует отметить, что исследуемая схема является весьма интересной. При определенных условиях она может работать как усилитель мощности. Работы по исследованию ее свойств и характеристик продолжаются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.
2. М. С. Михайлов-Микулинский. Расчет магнитных цепей электрических машин с двумя вращающимися полями. Электромеханика, № 10, 1962.
3. В. С. Нерсисян. Элементы расчета одномашинных бесконтактных преобразователей частоты. Труды Горьковского политехнического института, том XIX, выпуск 3, 1963.