

УДК 621.313.3

А.Н. Малыш

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

*В статье рассматриваются способы получения трехфазного переменного тока повышенной частоты. Показаны преимущества совмещенных электрических машин, используемых для преобразования частоты.*

*электрические машины, преобразование энергии, преобразователь частоты*

### Введение

**Постановка проблемы.** Трехфазный переменный ток повышенной частоты может быть получен двумя способами. По первому из них для этой цели используются статические преобразователи частоты, по второму – электромашинные преобразователи частоты [17]. Статические преобразователи частоты выполняют по схеме, показанной на рис. 1.

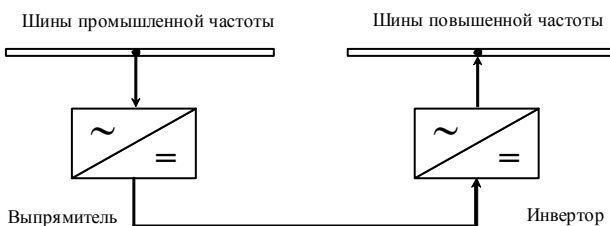


Рис. 1. Схема статического преобразователя частоты

В схеме, показанной на рис. 1, осуществляется двукратное преобразование напряжения: на первом этапе – получение из переменного напряжения постоянного и на втором этапе – получение из постоянного напряжения переменного напряжения повышенной частоты. Основным преимуществом первого способа преобразования частоты является отсутствие вращающихся, а значит изнашивающихся частей преобразователей. Вместе с тем, для получения требуемой (синусоидальной) формы кривой напряжения на выходе инвертора необходимо ставить дорогостоящие громоздкие фильтры.

Электромашинные преобразователи частоты выполняют по схеме, показанной на рис. 2.

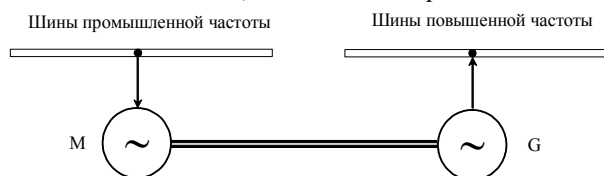


Рис. 2. Схема электромашинного преобразователя частоты

В схеме, показанной на рис. 2, также осуществляется двукратное преобразование энергии. На пер-

вом этапе электрическая энергия преобразуется в механическую, а на втором этапе механическая энергия преобразуется в электрическую. В схеме используется асинхронный электродвигатель М, осуществляющий привод синхронного генератора повышенной частоты Г. Основным преимуществом схемы, приведенной на рис. 2, является возможность получения на выходе преобразователя напряжения повышенной частоты синусоидальной формы. Существенным недостатком схемы является невозможность стабилизации частоты, поскольку частота вращения приводного асинхронного двигателя всегда отличается от синхронного значения, а тем самым частота на выходе генератора зависит от величины скольжения, определяемой значением нагрузки. Кроме того, в схеме, показанной на рис. 2, имеются вращающиеся, а значит изнашивающиеся агрегаты. Этой схеме также свойственны недостатки, связанные с провалами напряжения, которые имеют место при пуске асинхронного двигателя.

**Анализ литературы.** Исследование режимов работы статических и электромашинных преобразователей энергии, используемых в различных вариантах получения трехфазного переменного тока повышенной частоты, посвящены работы [5, 6, 8].

Так, в [5] анализировалась работа электрических машин при резкопеременных нагрузках, в [6] изучались переходные режимы, в [8] рассматривались автономные режимы работы. Однако в этих и в других работах не анализировалась возможность использования в одной установке и приводного двигателя и преобразователя частоты, что особо существенно для автономных систем электроснабжения, приобретающих в последнее время все большую популярность. Совмещение в одном агрегате нескольких функций рассматривалось в [7, 13, 14]. Однако в этих работах вопрос об использовании совмещенной электрической машины в качестве автономного источника энергии не ставился.

**Цель статьи** – сравнительный анализ способов получения трехфазного переменного тока повышенной частоты.

### Результаты исследований

Возвращаясь к схеме электромашинного преобразователя системы (рис. 2), представляется заманчивой возможность совместить в одной электрической машине двигатель и генератор, уменьшив тем самым потери, массу и габариты исходной схемы. Схема совмещенного преобразователя частоты приведена на рис. 3.

Совмещенный преобразователь частоты сочетает в себе асинхронный двигатель и собственно преобразователь частоты. Статорные обмотки двигателя 1 и преобразователя 5 присоединены к сети с частотой  $f_1$ . Короткозамкнутая обмотка ротора 3 является двигательной обмоткой, обмотка ротора 4 принадлежит преобразователю частоты.

Асинхронный двигатель имеет обмотки 1 и 3, выполненные с числом пар полюсов  $p_1$ , обмотки преобразователя частоты 2, 4, выполненные с числом пар полюсов  $p_2$ . Асинхронный двигатель вращает ротор машины против направления вращения намагничивающей силы  $F_2$ , создаваемой обмоткой 2. При этом в обмотках ротора 4 наводится ЭДС с частотой  $f_2 > f_1$ . Выходная частота  $f_2$  при входной частоте  $f_1$  определяется по формуле

$$f_2 = \frac{p_1 \pm (1 - S) \cdot p_2}{p_1} \cdot f_1, \quad (1)$$

где  $S$  – скольжение приводного асинхронного двигателя; знак «+» отвечает встречному, а знак «-» – согласному направлению вращения ротора и действию намагничивающей силы  $F_2$ .

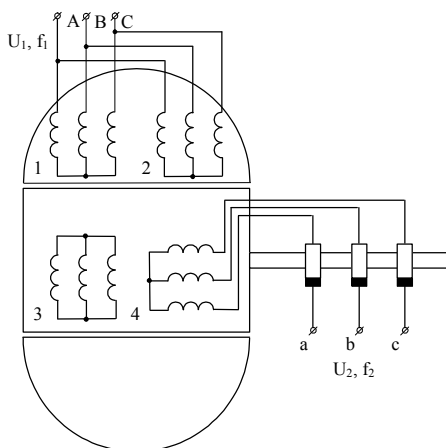


Рис. 3. Схема совмещенного преобразователя частоты

Совмещенные электрические машины, выполняя те же функции, что и обычные электрические машины, имеют по сравнению с ними ряд достоинств. Так, при совмещении функций двух электрических машин, существенно уменьшается общая длина вала, а его диаметр либо не изменяется, либо несколько больше диаметра вала однокорпусной машины. При этом увеличивается жесткость вала и уменьшается его прогиб, что повышает прочность конструкции. Совмещенная машина более технологична в производстве. Это достигается за счет со-

кращения числа операций и их объема в процессе механической обработки и сборки, проще скомпоновать машину в целом, легче получить требуемую величину воздушного зазора. В совмещенной машине лучше условия вентиляции, она более удобна в эксплуатации. При одинаковом расходе активных материалов (стали и меди) масса совмещенной электрической машины меньше массы агрегатов в традиционной схеме примерно на 13 – 18%.

Совмещенным электрическим машинам посвящено большое количество исследований. Это, прежде всего работа [14] по простым асинхронным преобразователям частоты, работы [3, 10] в области бесконтактных асинхронных преобразователей частоты, работы [7, 13], посвященные проблеме устранения взаимодуктивной связи между обмотками «отдельных машин». В работах [14, 18] исследовались асинхронно-синхронные преобразователи, а в работах [12, 13, 15, 16, 20, 21] исследовались вопросы теории, связанные с совмещением обмоток машин. В работах [11, 19] исследовались вопросы, связанные с решением проблемы самовозбуждения в асинхронных преобразователях частоты. По данным этих и других [9, 10] исследований в зависимости от конструктивных особенностей и выполняемых функций проведена классификация совмещенных электрических машин (рис. 4).

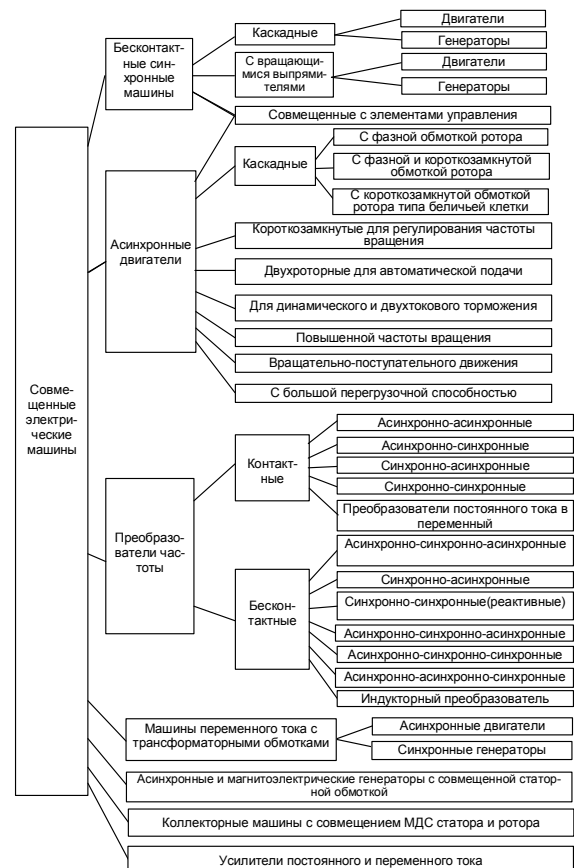


Рис. 4. Классификация совмещенных электрических машин

Технические характеристики выпускаемых промышленностью преобразователей частоты приведены в табл. 1.

Технические характеристики  
выпускаемых промышленностью преобразователей частоты

Тип	Генератор				Двигатель		Габаритные размеры, мм, R <sub>x</sub> V <sub>x</sub> H	Масса, кг
	P, кВт	U, В	f, Гц	cos φ	U, В	P, кВт		
АЧ-75-55М	55	420	75	0,7	220/380	62	2000x848x890	1310
ПЧ-75-10	10	275	75	0,8	220/380	14,5	1000x500x450	280
АПЧ-100-4,5	4,5	230	100	0,8	220/380	6,0	1120x466x421	186
АЧ-100-4,5	4,5	390	100	0,8	220/380	6,6	1084x466x438	180
ПЧ-100-14	14	345	100	0,8	220/380	20	1000x500x450	280
АЧ-100-40М	40	330	100	0,8	220/380	45	1745x697x760	766
АЧ-100-55М	55	354	100	0,8	220/380	61	1950x744x760	895
АЧ-100-125М	125	372	100	0,8	220/380	136	2760x848x890	1445
ИЭ-9450	3,2	36	200	0,8	220/380	5,8	570x318x393	65
CF-200 (Румыния)	4,0-5,0	110; 165; 220	200	0,8	220; 380; 500	–	–	–
СН 160 МА 62 (Италия)	8,5	500	200	0,8	500	–	–	159
СН 200R А62 (Италия)	30	500	200	0,8	500	–	–	378
FD 5,5-2 (ФРГ)	5,5	42; 115; 250	200	0,8	220/380	7,6	537x250x388	83
DAS 30/15-2/8 (ФРГ)	15	72; 135; 265	200	0,8	220/380	18,4	870x389x330	205
ПВС-30-200У3	30	220	200	0,8	380	37	D=560, H=932	320
ПВД-8-200У3	8	220	200	0,8	220/380	–	D=542, H=801	255
ПВД-16-200У3	16	220	200	0,8	220/380	–	D=568, H=914	370
ПВД-8-300У3	8	220	300	0,8	220/380	–	D=542, H=801	255
ПВД-16-300У3	16	220	300	0,8	220/380	–	D=568, H=914	370
CF-300 (Румыния)	4,0-5,0	110; 165; 220	300	0,8	220; 380; 500	–	–	–
ПЧ-20-М1	20	230	400	0,8	380	–	840x483x820	360
АМГ-20-М1	0,435	120	400	0,7	380	0,91	500x310x440	90
АМГ-20-Б1	0,435	120	400	0,7	220	0,91	500x310x440	90
СН 132 SA142 (Италия)	2,5	500	400	0,8	500	–	–	90
СН 200 LC142 (Италия)	30	500	400	0,8	500	–	–	431
АТО-1-400	1	115; 133; 230	400	0,8	220/380	2,25	545x430x360	130
АТО-50-400	50	133; 230	400	0,8	220/380	72	1460x740x680	1335
АТТ-1-400	1	230	400	0,8	220/380	2,25	545x430x360	130
АТТ-50-400	50	230; 400	400	0,8	220/380	72	1460x740x680	1146
ПСЧ-15	15	133; 400	400	0,6	220/380	18	880x500x650	230
ПСЧ-100	100	133; 230	400	0,6	220/380	115	1500x500x850	1710
АТГ-50-500	50	230	500	0,8	220/380	72	–	–
АМГ-516М6	4,7	44	500	0,7	220/380	8,14	915x430x407	250

Приведенная классификация и сведения о практическом применении подтверждают универсальность диапазона использования совмещенных электрических машин и перспективность их применения в различных системах. Однако их применение сдерживается трудностями, возникающими из-за необходимости ограничения пусковых токов.

Настоящее исследование направлено на выяснение причин возмущений, возникающих в системе автономного электроснабжения, в процессе пуска

совмещенной электрической машины, и на получение рекомендаций, использование которых позволяет уменьшить негативные последствия, вызываемые этими возмущениями. Для решения поставленной задачи, необходимо, прежде всего, оценить величину бросков тока и вызываемую ими величину провалов напряжения в процессе пуска асинхронного двигателя. Для получения расчетных соотношений при этом использовалась математическая модель процесса пуска двигателя, мощность которого соиз-

мерима с мощностью генератора, т.е. модель, адекватно отображающая физические процессы, реально происходящие в системе электроснабжения. Моделирование велось с использованием полных уравнений равновесия напряжения, т.е. с учетом активных сопротивлений обмоток двигателя и генератора. В известных исследованиях [1, 2, 4, 5] обычно пренебрегают влиянием активных сопротивлений обмоток электрических машин. Однако, это допущение существенно искажает переходные процессы затухания энергии в автономной системе электроснабжения и, в связи с этим, не может быть использовано в рассматриваемом случае. Анализ полученных расчетных соотношений показал, что избежать негативного влияния возмущений, используя традиционную двухкорпусную схему электромашиного преобразователя частоты, практически невозможно, что, кстати, подтверждают и результаты доработок, проведенных в зенитно-ракетных системах.

Напрашивающееся же очевидное решение об использовании в системе автономного электроснабжения одномашинного совмещенного преобразователя частоты неприемлемо из-за невозможности получения синхронного значения частоты в асинхронном преобразователе. Однако анализ скрытых возможностей системы автономного электроснабжения, связанных с наличием в этой системе автономного источника энергии подсказал и возможный вариант преодоления трудностей, а именно вариант двойного совмещения.

### Вывод

Совмещение в одной установке преобразователя частоты и резервного источника энергии оказывается возможным при условии использования в системе электроснабжения инерционной установки, электрическая машина которой имеет две статорные и две роторные обмотки. Пуск этой электрической машины производится дизелем, что снимает все ограничения, связанные с пуском синхронного двигателя. Первый пуск дизеля проводится с использованием энергии, запасенной аккумуляторной батареей, последующие пуски дизеля проводятся с использованием энергии, запасенной маховиком. Совмещенная электрическая машина при таком варианте двойного совмещения ее функций работает в специфических режимах, обычно не свойственных известным одномашинным преобразователям частоты.

### Список литературы

1. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. – Л.: Энергия, 1979. – 184 с.
2. Алябьев М.И. Уравнения электрических машин переменного тока в физических и относительных единицах // *Электричество*. – 1960. – № 1. – С. 18-26.

3. Бут Д.Н. Бесконтактные электрические машины: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 380 с.
5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1970. – 472 с.
6. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. – М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
7. Загрядцкий В.И. Совмещенные электрические машины. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1971. – 164 с.
8. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.-Л.: Издательство АН СССР, 1962. – 624 с.
9. Казовский Е.Я., Данилевич Я.Б., Кашаровский Э.Г. и др. Аномальные режимы крупных синхронных машин. – Л.: Наука, 1969. – 429 с.
10. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор // *Электричество*. – 1990. – № 11. – С. 17-25.
11. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия. – 1973. – Ч. II. – 648 с.
12. Крылов О.Л. Математическая модель синхронной машины с двумя трехфазными обмотками, сдвинутыми в пространстве // *Электричество*. – 1989. – № 3. – С. 63-69.
13. Луцки В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты. – К.: Техніка, 1993. – 203 с.
14. Попов В.И. Электромагнитное совмещение преобразователей частоты. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
15. Попов В.И. Принцип формирования схем совмещенных обмоток электрических машин // *Электричество*. – 1986. – № 5. – С. 20-27.
16. Попов В.И., Мартынов В.А. Исследование электромагнитных процессов совмещенных электрических машин методом зубцовых контуров // *Электричество*. – 1996. – № 11. – С. 29-38.
17. Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т., Скворцов Ю.А. и др. Системы автономного электроснабжения. Учебник. – МО СССР, 1989. – 386 с.
18. Совмещенные электрические машины для автоматики / Ю.М. Келин, И.П. Копылов, Д.В. Свечарник, Л.М. Шидлович: Под общ. ред. Д.В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
19. Супрун А.Д., Кононов Б.Т., Лысенко М.П. Особенности применения установок гарантированного питания с инерционными накопителями энергии на базе совмещенных электрических машин. Указатель поступления информационных материалов в/ч 11520, 1989, № 3822, вып. 8, серия Б.
20. Шакарян Ю.Г. Вопросы теории синхронной машины с двумя системами статорных обмоток // *Электричество*. – 1996. – № 11.
21. Шапиро Л.Я., Лабунец И.А., Лохматов А.П. Принципы построения многофазных совмещенных обмоток // *Электротехника*. – 1975. – № 10. – С. 1-4.

Поступила в редколлегию 2.04.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.