

## ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТЫ

А. И. СКОРОСПЕШКИН, М. Л. КОСТЫРЕВ, Э. Ф. ОБЕРГАН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Широкое распространение частотного управления в промышленности связано с разработкой надежных и экономичных преобразователей с регулированием частоты и напряжения на выходе. Статические ионные и полупроводниковые преобразователи, несмотря на очевидные преимущества перед вращающимися машинными, имеют ряд существенных недостатков [1], устранение которых приводит к значительному усложнению как силового инвертора, так и схемы управления. Включение в прямую цепь регулирования уравнивающих реакторов и сглаживающих дросселей, необходимых для устойчивой работы инвертора, делает преобразователь звеном инерционным. Получить хорошую форму напряжения на выходе в широком частотном диапазоне можно, лишь существенно усложнив схему управления инвертором и включив на выход фильтр, перестраиваемый при изменении частоты и коэффициента мощности нагрузки.

В ряде случаев более удачное решение можно получить, применив машинно-вентильную систему. В системах с асинхронным преобразователем или синхронным генератором повышенной частоты и статическим преобразователем без звена постоянного тока на выходе [1] инвертор должен быть рассчитан на максимальную мощность выхода. Кроме того, в таких системах форма напряжения и тока на выходе сильно искажены. В бесконтактной асинхронизированной синхронной машине с инвертором на выходе [2] мощность, поступающая на выход с инвертора, равна мощности скольжения. Поэтому при большом частотном диапазоне требуемая мощность инвертора будет приближаться к мощности выхода.

Предлагаемая бесконтактная асинхронизированная синхронная машина с управляемым полупроводниковым коммутатором (УПК) на входе (рис. 1) при определенных условиях может быть свободна от этого недостатка. Так как два машинных каскада могут в десятки раз усилить сигнал от УПК, то предложенная схема может выполнять функции электромашинного усилителя регулируемой частоты (ЭМУ-РЧ).

Основная мощность на выход ЭМУ-РЧ передается с вала. Это особенно важно для решения таких проблем, как, например, разработка генератора стабильной частоты при переменной скорости вращения вала для питания авиационных электросистем.

В настоящей работе излагаются вопросы теории и результаты опытных исследований предложенной схемы.



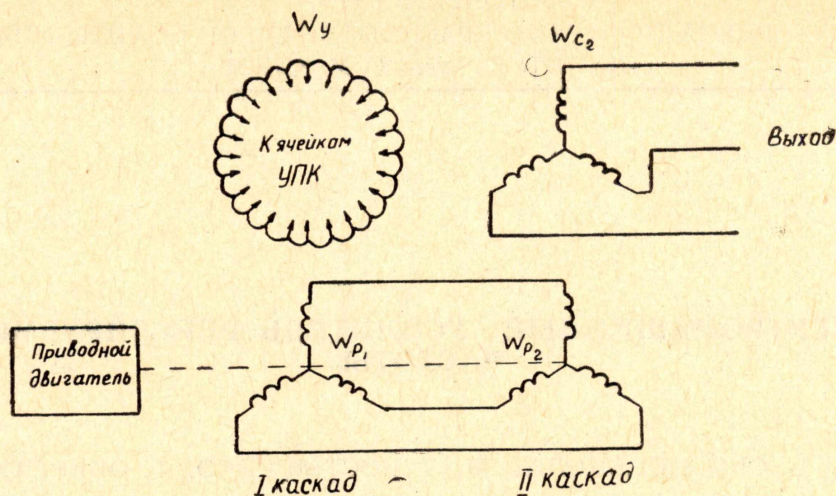


Рис. 1. Схема электромашиного усилителя регулируемой частоты.

При непрерывном последовательном переключении ячеек УПК магнитное поле управления будет вращаться со скоростью  $n_y$  об/сек.

При вращении ротора со скоростью  $n$  об/сек. ЭМУ-РЧ дает частоту на выходе

$$f_{\text{вых}} = (p_2 \pm p_1) n \pm p_1 n_y, \quad (1)$$

$p_1$  и  $p_2$  — число пар полюсов I и 2 каскадов.

В наиболее экономичном режиме [3] согласного вращения ротора и поля II каскада и встречного вращения ротора и поля I каскада частота на выходе

$$f_{\text{вых}} = (p_2 + p_1) n + p_1 \cdot n_y. \quad (2)$$

Ячейки УПК допускают большую частоту переключения. Поэтому можно получить большую скорость поля управления (500 об/сек. и более), а значит, и большой диапазон частот на выходе при постоянной скорости вращения ротора. Так как регулирование частоты не связано с изменением скорости ротора, быстродействие ЭМУ-РЧ определяется лишь электромагнитными постоянными времени обмоток и, как показывают опытные исследования, находится на уровне коллекторных ЭМУ соответствующей мощности. В более совершенных образцах следует ожидать большей, по сравнению с коллекторными ЭМУ, добротности, так как основное усиление приходится на практически безинерционный УПК.

Обмотка управления ЭМУ-РЧ отличается от якорной обмотки машины постоянного тока лишь тем, что ее отводы подключены не к пластинам коллектора, а к ячейкам УПК. Поэтому при отсутствии значительного влияния вихревых и коммутационных токов магнитный поток управления, аналогично потоку реакции якоря машины постоянного тока, направлен вдоль оси, проходящей через открытые ячейки. В цепи управления э. д. с. не наводится, и при изменении скорости потока управления по обмотке управления протекает неизменный ток. Небольшие изменения среднего значения тока с частотой  $f_y$  обусловлены лишь изменением уровня пульсаций.

Уравнениям равновесия н. с. и э. д. с. I каскада, идеального ЭМУ-РЧ, соответствует векторная диаграмма на рис. 2. В идеальной машине отсутствуют потоки рассеяния, активные сопротивления обмоток и потери в стали равны нулю, реакция токов коммутации несущественна. Диаграмма построена в осях, вращающихся синхронно с магнитным полем I каскада.



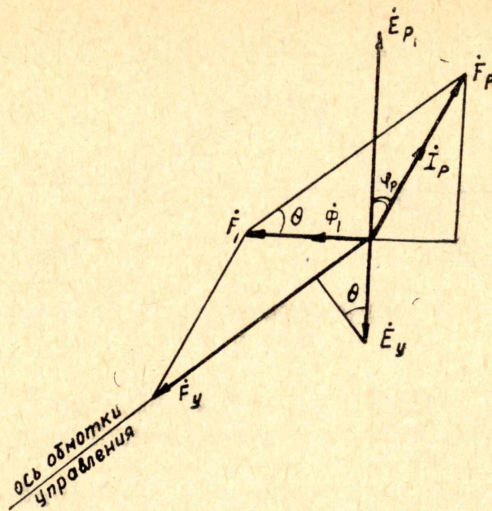


Рис. 2. Векторная диаграмма I каскада идеального ЭМУ-РЧ.

При включении активной нагрузки в ротор или на выход усилителя результирующий магнитный поток  $\Phi_1$  отклоняется на угол  $\theta$  от оси управления. В цепи управления появляется э. д. с.

$$E_y = E_{y \text{ макс}} \cdot \sin \theta \quad (3)$$

Используя известное выражение для э. д. с. при синусоидальном магнитном поле, получим

$$E_y = 2\pi W_y' \Phi_1 \cdot p_1 \cdot n_y \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$W_y'$  — число последовательных витков обмотки управления с учетом обмоточного коэффициента.

Уравнение цепи управления в установившемся режиме запишется в виде

$$U_y \pm E_y = I_y \cdot r_y \quad (5)$$

$I_y$  — ток в цепи управления,

$r_y$  — активное сопротивление обмотки управления и ячеек УПК.

Полярность  $E_y$  зависит от направления вращения поля управления относительно ротора. В наиболее благоприятном энергетическом режиме э. д. с.  $E_y$  направлена встречно напряжению источника (знак «—» в формуле 5).

Нами были поставлены опыты с непосредственным измерением угла  $\theta$ . Ось вращающихся щеток механического коллектора (вместо УПК) фиксировалась с помощью оптической системы с чувствительным фотодиодом, включенным в схему, вырабатывающую узкий импульс. Ось потока фиксировалась измерительной секцией в пазах статора. Перед началом измерений проводилось точное ориентирование импульса относительно оси измерительной секции. Угол  $\theta$  отсчитывался по осциллограммам рис. 3. Рассчитанные по формулам (4), (5) и измеренные на опыте значения угла  $\theta$  совпали в пределах точности измерений ( $\pm 3^\circ$ ).

Опыты подтвердили тот факт, что при чисто реактивной нагрузке угол  $\theta$  не изменяется, как это и следует из векторной диаграммы рис. 2. Опыты показали, что при резко замедленной коммутации угол  $\theta$  может достигать значительной величины (до  $30^\circ$ ), что приводит к недопустимо большой величине э. д. с. в цепи управления. Следовательно, УПК должен обеспечить коммутацию, исключаящую наличие поперечного потока.



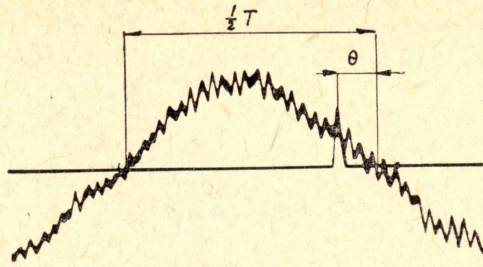


Рис. 3. Осциллограмма для измерения угла  $\theta$ .

Вихревые токи в ЭМУ-РЧ не только вызывают потери в стали, но и создают поперечный поток, также наводящий э. д. с. в цепи управления.

Определим коэффициент усиления по активной мощности идеального ЭМУ-РЧ.

Активная мощность в цепи ротора

$$P_p = m_p \cdot E_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p \quad (6)$$

Действующее значение э. д. с. фазы ротора

$$E_p = \pi \sqrt{2} \Phi_1 \cdot W_p' \cdot f_p. \quad (7)$$

$W_p'$  — число последовательных витков фазы ротора с учетом обмоточного коэффициента.

Мощность в цепи управления.

$$P_y = I_y \cdot E_{y \text{ макс}} \cdot \sin \theta \quad (8)$$

Из векторной диаграммы рис. 2.

$$\sin \theta = \frac{F_p \cdot \cos \psi_p}{F_y}. \quad (9)$$

Амплитуды н. с. обмотки ротора и управления

$$F_p = \frac{0,9 m_p \cdot W_p' \cdot I_p}{P_1}. \quad (10)$$

$$F_y = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_y \cdot W_y'}{P_1}. \quad (11)$$

Из выражений (4), (6—11) определяется коэффициент усиления I каскада.

$$K_{y1} = \frac{P_p}{P_y} = \frac{f_p}{f_y} = \frac{n_y \pm n}{n_y}. \quad (12)$$

Нетрудно убедиться, что коэффициент усиления по активной мощности II каскада в идеальной машине

$$K_{y2} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_p} = \frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_p}. \quad (13)$$

Тогда коэффициент усиления по активной мощности машинной части ЭМУ-РЧ

$$K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} < \frac{f_{\text{ВЫХ}}}{f_y}. \quad (14)$$

При небольшой скорости переключений можно получить большое усиление. С увеличением скорости переключений усиление резко снижается, стремясь к единице. В ЭМУ на переменном токе принято опре-



делять коэффициент усиления по полной мощности. При активно-индуктивной нагрузке усиление ЭМУ-РЧ меньше предельного значения (14), при активно-емкостной нагрузке усиление резко возрастает. Увеличение емкости на выходе или в роторе сверх критической позволяет получить режим самовозбуждения.

Усиление ЭМУ-РЧ можно увеличить с помощью поперечной компенсации, которая заключается в создании такого потока по поперечной оси, который, складываясь с потоком реакции ротора, направлял бы результирующий поток по оси управления. В этом случае э. д. с. в цепи управления не наводится и мощность управления определяется лишь потерями в меди обмотки управления и в стали магнитопровода.

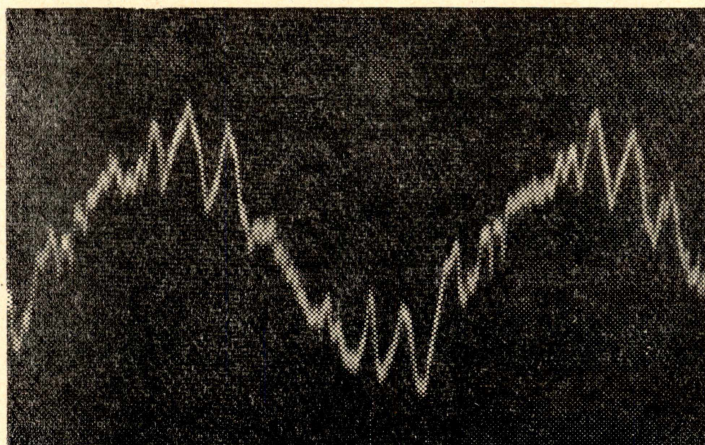


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на неподвижных отводах обмотки управления.

Преимущество ЭМУ-РЧ заключается не только в возможности существенно уменьшить требуемую мощность УПК. Даже при весьма искаженной форме поля управления (рис. 4) удастся получить удовлетворительную форму напряжения на выходе (рис. 5). Это обусловлено свойством распределенной обмотки электрической машины подавлять высшие гармонические. Для получения хорошей формы напряжения на выходе могут использоваться все эффективные средства, применяемые при проектировании обмоток электрических машин. Подключение емкости на выход или в ротор также улучшает форму кривой.

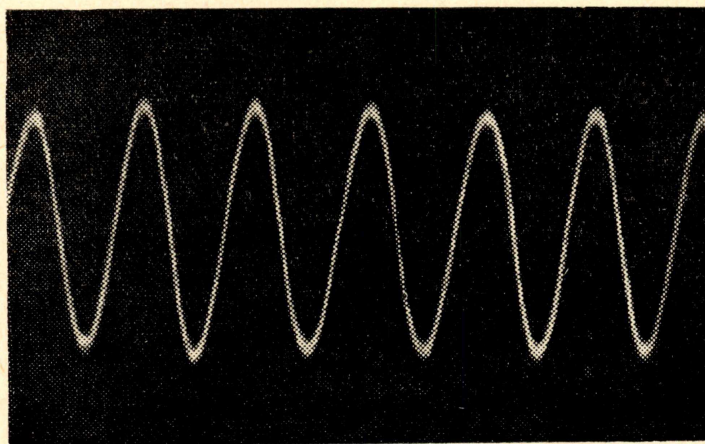


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на выходе ЭМУ-РЧ.



Габариты и вес ЭМУ-РЧ уменьшается за счет экономии конструктивных материалов при совмещении двух каскадов ЭМУ-РЧ в одном магнитопроводе [3].

### Выводы

1. Предлагаемая бесконтактная асинхронизированная синхронная машина с полупроводниковым коммутатором на входе позволяет регулировать напряжение и частоту на выходе в широком диапазоне.

2. При увеличении частоты переключений коммутатора коэффициент усиления ЭМУ-РЧ по активной мощности стремится к единице. Осуществление поперечной компенсации позволит резко уменьшить требуемую мощность полупроводникового коммутатора.

3. Благодаря включению полупроводникового коммутатора на вход ЭМУ-РЧ легко получить хорошую форму напряжения на выходе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Ровинский, В. А. Тикан. Вентильные преобразователи частоты без звена постоянного тока. АН СССР, изд. Наука, 1965.

2. П. А. Кялян. Энергетические соотношения в бесконтактной машине переменного тока, работающей с переменной скоростью вращения. Энергетика, № 11, 1965.

3. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томский политехнический институт, 1960.