

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ  
И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ  
В МАШИННО-ВЕНТИЛЬНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ**

А. А. СКРИПИЛЕВ, Б. Е. ТРОФИМЕНКО, А. В. ЦУКУБЛИН

(Представлена объединенным научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В настоящее время в автономных установках все чаще применяются системы электроснабжения переменным током. Однако, при переходе к системам переменного тока возникает целый ряд проблем, одной из важнейших среди которых является проблема получения постоянной частоты при переменной скорости вращения вала.

Получить постоянную частоту при изменяющейся скорости вращения можно различными методами, в данной статье рассматриваются особенности работы одного из возможных вариантов стабилизации частоты автономного источника с помощью машинно-вентильного преобразователя частоты. Силовая схема преобразователя показана на рис. 1. На

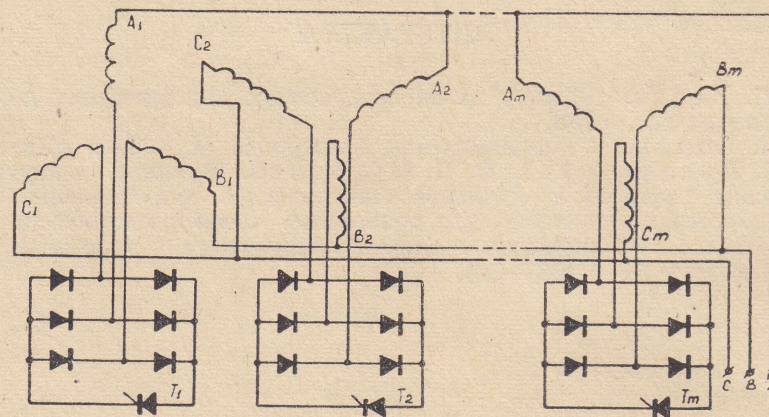


Рис. 1. Принципиальная схема машинно-вентильного преобразователя частоты.

статоре синхронного генератора размещено  $m$  трехфазных обмоток, расположенных под углом  $\frac{360}{m}$  электрических градусов, которые поочередно подключаются к нагрузке через определенные интервалы времени посредством замыкания концов трехфазных обмоток генератора через выпрямительный мост.

При питании потребителей от синхронного генератора соизмеримой мощности, что зачастую имеет место в автономных установках, весьма важным при проектировании генератора является определение коэффи-



циентов преобразования фазного тока, напряжения и коэффициента мощности.

При определении указанных коэффициентов в данной работе приняты следующие допущения:

1. Фазные напряжения синхронного генератора синусоидальны и симметричны.

2. Вентили — идеальные ключи.

3. Коммутация вентилей происходит мгновенно, т. е. угол коммутации вентилей  $\gamma=0$ .

Для определения коэффициентов преобразования необходимо определить спектры фазных токов и напряжений генератора и нагрузки. Спектр выходного напряжения можно найти, используя математический аппарат коммутационных функций. Данный метод позволяет представить выходное напряжение в виде произведения фазного напряжения генератора и некоторой коммутационной функций, зависящей от режима работы преобразователя.

Фазные напряжения генератора в общем виде запишутся:

$$\begin{aligned} u_{A_e}(t) &= U_m \sin \left[ \omega_1 t + \alpha_1 - \frac{e-1}{m} \cdot 2\pi \right], \\ u_{B_e}(t) &= U_m \sin \left[ \omega_1 t + \alpha_1 - \frac{3(e-1)+m}{3m} \cdot 2\pi \right], \\ u_{C_e}(t) &= U_m \cdot \sin \left[ \omega_1 t + \alpha_1 - \frac{3(e-1)+2m}{3m} \cdot 2\pi \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_m$  — максимальное значение фазного напряжения синхронного генератора;

$\omega_1$  — круговая частота напряжения генератора;

$\alpha_j$  — начальная фаза кривой фазного напряжения генератора, принятой за базовую относительно начала координат;

$m$  — число переключаемых трехфазных обмоток генератора;

$e$  — порядковый номер трехфазных обмоток генератора.

Разложение в гармонический ряд коммутационной функции может быть записано в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} f_e(t) &= \frac{1}{m} + \frac{2}{k\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi}{m} \cos k \times \\ &\times \left( \omega_k t + \alpha_k - \frac{e-1}{m} \cdot 2\pi \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega_k$  — круговая частота коммутационной функции;

$\alpha_k$  — начальная фаза коммутационной функции.

Если длительность подключенного состояния каждой трехфазной обмотки генератора к нагрузке равна  $\tau$  и период коммутационной функции  $T_k$ , то нулевые члены в разложении (2) равны:

$$n_0 = \frac{T_k}{\tau} = m, \quad (3)$$

откуда видно, что в разложении коммутационной функции члены с гармониками, кратными числу трехфазных обмоток генератора, отсутствуют.

Выходные фазные напряжения преобразователя представляют собой сумму  $m$  модулированных фазных напряжений:

$$u_A(t) = \sum_{e=1}^m u_{A_e}(t) \cdot f_e(t);$$



$$u_B(t) = \sum_{e=1}^m u_{B_e}(t) \cdot f_e(t); \quad (4)$$

$$u_C(t) = \sum_{e=1}^m u_{C_e}(t) \cdot f_e(t);$$

Подставляя в (4) значения фазных напряжений синхронного генератора (1) и коммутационной функции (2), выполняя необходимые вычисления и преобразования, получаем:

$$\begin{aligned} u_A(t) = & \frac{mU_m}{\pi} \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \sin}{m} [(\omega_1 - \omega_K)t + \alpha_1 - \alpha_K] + \right. \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm - 1} \cdot \sin \frac{qm - 1}{m} \cdot \pi \cdot \sin [(\omega_1 + qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 + (qm - 1)\alpha_K] + \\ & \left. + \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm + 1} \cdot \sin \frac{qm + 1}{m} \cdot \pi \cdot \sin [(\omega_1 - qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 - (qm + 1)\alpha_K] \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где:  $q$  — любое целое положительное число ( $q=1, 2, 3 \dots$ ).

Два других выходных фазных напряжения  $U_B(t)$  и  $U_C(t)$  записываются аналогично со сдвигом фаз  $\frac{2\pi}{3}$  и  $\frac{4\pi}{3}$  соответственно.

Спектр фазного тока нагрузки при известном фазном напряжении (5) и параметрах нагрузки может быть получен следующим образом:

$$\begin{aligned} i_A(t) = & \frac{mU_m}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{Z_H} \cdot \sin [(\omega_1 - \omega_K)t + \alpha_1 - \alpha_K - \varphi_H] + \right. \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm - 1} \cdot \frac{\sin \frac{qm - 1}{m} \pi}{Z'_q} \cdot \sin [(\omega_1 + qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 + (qm - 1)\alpha_K - \\ & \left. - \varphi'_q] + \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm + 1} \cdot \frac{\sin \frac{qm + 1}{m} \pi}{Z''_q} \cdot \sin [(\omega_1 - qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 - \right. \\ & \left. - (qm + 1)\alpha_K - \varphi''_q] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $Z_H$  и  $\varphi_H$  — модуль комплексного сопротивления нагрузки и угол сдвига между выходным током и напряжением на выходной частоте  $\omega_1 - \omega_K$ ;

$$Z_H = \sqrt{R_H^2 + (\omega_1 - \omega_K)^2 L_H^2} = \sqrt{R_H^2 + X^2 L_H};$$

$$\varphi_H = \arctg \frac{(\omega_1 - \omega_K)L_H}{R_H}; \quad (7)$$

$Z'_q, Z''_q, \varphi'_q, \varphi''_q$  — модули комплексных сопротивлений нагрузки и углы сдвига фаз между током и напряжением для высших гармоник.

$$Z'_q = \sqrt{R_H^2 + [\omega_1 + (qm - 1)\omega_K]^2 L_H^2};$$

$$\varphi'_q = \arctg \frac{[\omega_1 + (qm - 1)\omega_K] L_H}{R_H}; \quad (8)$$



$$Z_q'' = \sqrt{R_H^2 + [\omega_1 - (qm + 1)\omega_K]^2 L_H^2};$$

$$\varphi_q'' = \text{arc tg} \frac{[\omega_1 - (qm + 1)\omega_K] L_H}{R_H}; \quad (9)$$

При известном спектре фазного тока нагрузки спектра тока фазы генератора представляется как результат модуляции выходного фазного тока коммутационной функцией [2]:

$$i_{A_e}(t) = i_A(t) \cdot f_e(t);$$

$$i_{B_e}(t) = i_B(t) \cdot f_e(t);$$

$$i_{C_e}(t) = i_C(t) \cdot f_e(t). \quad (10)$$

Так как спектры фазных токов всех обмоток будут одинаковыми, отличающимися лишь фазовым углом, то определим выражение фазного тока обмотки генератора, принятой за базовую, подставляя в выражение (10) значение фазного тока нагрузки и коммутационной функции:

$$i_{A_1}(t) = \frac{U_m \sin \frac{\pi}{m}}{\pi \cdot Z_H} \cdot \sin [(\omega_1 - \omega_K)t + \alpha_1 - \alpha_K - \varphi_H] +$$

$$+ \frac{U_m}{\pi} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm - 1} \cdot \frac{\sin \frac{qm - 1}{m} \pi}{Z_q'} \cdot \sin [(\omega_1 + qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 +$$

$$+ (qm - 1)\alpha_K - \varphi_q'] + \frac{U_m}{\pi} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{qm + 1} \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{qm + 1}{m} \pi}{Z_q''} \cdot \sin [(\omega_1 - qm\omega_K - \omega_K)t + \alpha_1 - (qm + 1)\alpha_K - \varphi_q''] +$$

$$+ \frac{2mU_m}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi}{m} \cdot \sin \frac{k\pi}{m}}{k Z_H} \cdot \sin [\omega_1 t + \alpha_1 - \varphi_H - (\omega_K t + \alpha_K)] \times$$

$$\times \cos k(\omega_K t + \alpha_K) + \frac{2mU_m}{\pi^2} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(qm - 1)k} \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{qm - 1}{m} \pi \cdot \sin \frac{k\pi}{m}}{Z_q'} \cdot \sin [\omega_1 t + \alpha_1 + \varphi_q' + (qm - 1)(\omega_K t + \alpha_K)] \times$$

$$\times \cos k(\omega_K t + \alpha_K) + \frac{2mU_m}{\pi^2} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(qm + 1)k} \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{qm + 1}{m} \pi \cdot \sin \frac{k\pi}{m}}{Z_q''} \cdot \sin [\omega_1 t + \alpha_1 - \varphi_q'' - (qm + 1)(\omega_K t + \alpha_K)] \times$$

$$\times \cos k(\omega_K t + \alpha_K). \quad (11)$$

Полученные выражения (6) и (11) позволяют определить действующее значение фазных токов нагрузки и генератора, по которым найдем коэффициент преобразования фазного тока для различных соотношений частот  $\omega_1$  и  $\omega$



$$k_I = \frac{I_A}{I_{A_1}}, \quad (12)$$

где  $I_A$  — действующее значение фазного тока нагрузки;  
 $I_{A_1}$  — действующее значение тока фазы генератора.

Выяснилось, что  $k_I$  не зависит от вида нагрузки, ни от соотношения  $\omega_1$  и  $\omega$ . В случае уменьшения  $\cos \varphi$  нагрузки уменьшается действующее значение тока фазы нагрузки, одновременно уменьшается фазный ток генератора, а  $k_I$  остается постоянным. Коэффициент преобразования фазного тока определяется только соотношением фаз синхронного генератора и нагрузки. Чем больше трехфазных обмоток заложено в генераторе, тем выше  $k_I$ ; зависимость коэффициента преобразования фазного тока машинно-вентильного преобразователя частоты от числа трехфазных обмоток генератора представлена на рис. 2.

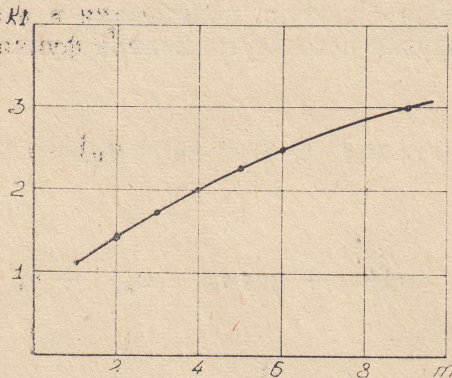


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования фазного тока машинно-вентильного преобразователя частоты от числа трехфазных обмоток генератора.

Коэффициент преобразования по напряжению  $k_U$  определяем отношением действующего значения основной гармоники выходного напряжения  $U_A$  к действующему значению основной гармоники напряжения генератора  $U_{A_1}$ .

Коэффициент преобразования по напряжению характеризует степень использования первичного напряжения генератора.

Из выражения: (5)

$$k_U = \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}. \quad (13)$$

При синусоидальном фазном напряжении генератора  $k_U$  зависит от числа трехфазных обмоток генератора. Закон изменения коэффициента преобразования по напряжению от числа трехфазных обмоток генератора приведен на рис. 3.

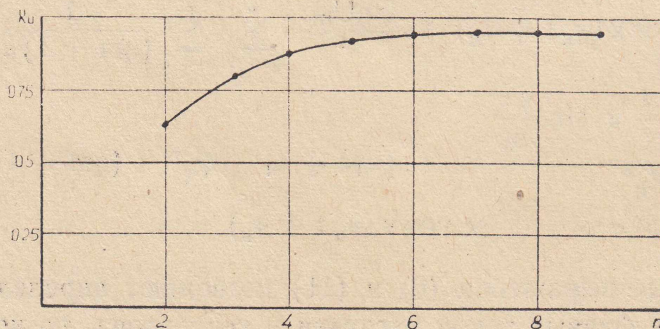


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования по напряжению от числа трехфазных обмоток генератора.



При определении реакции якоря синхронного генератора, что особенно важно, если мощности генератора и нагрузки соизмеримы, необходимо определить коэффициент преобразования по основным гармоническим фазного тока нагрузки  $I_{A'}$  и тока генератора  $I_{A'_1}$

$$k_1' = \frac{I_{A'}}{I_{A'_1}}, \quad (14)$$

где:  $I_{A'}$  — действующее значение основной гармоники фазного тока нагрузки;

$I_{A'_1}$  — действующее значение основной гармоники фазы генератора.

Основная гармоника выходного тока имеет частоту  $f = f_1 - f_k$  и описывается следующим выражением:

$$i'_{A'}(t) = \frac{mU_m}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{Z_H} \cdot \sin [(\omega_1 - \omega_k)t + \alpha_1 - \alpha_k + \varphi_H], \quad (15)$$

Выражение для основной гармоники фазы генератора найдем из (11). Нетрудно убедиться, что гармоники, с  $k=1$ ,  $k=qm \pm 1$  имеют частоту  $\omega_1$ . Основная гармоника фазы генератора определится таким образом, как сумма бесконечного числа синусоид с частотой  $\omega_1$  и возрастающим фазовым углом:

$$\begin{aligned} i'_{A'_1}(t) = & \frac{mU_m}{\pi^2} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi}{m}}{Z_H} \sin(\omega_1 t + \alpha_1 - \varphi_H) + \\ & + \frac{mU_m}{\pi^2} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{qm-1}{m} \cdot \pi}{(qm-1)^2 Z'_q} \sin(\omega_1 t + \alpha_1 - \varphi_{q'}) + \\ & + \frac{mU_m}{\pi^2} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{qm+1}{m} \cdot \pi}{(qm+1)^2 Z''_q} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_1 - \varphi_{q''}). \end{aligned} \quad (16)$$

По зависимости (15) и (16) определяются действующие значения основных гармоник фазного тока нагрузки и фазного тока генератора, а по ним коэффициент преобразования по основным гармоническим фазного тока. На рис. 4 приведена зависимость изменения  $k_1'$  от соотношения частоты генератора и частоты коммутации  $\omega_1/\omega_k$  для числа трехфазных обмоток генератора  $m=3$ . Характер изменения  $k_1'$  для  $m=4$  и  $m=6$  аналогичен приведенному на рис. 4. Для инженерных расчетов при определении  $k_1'$  второй и третий член в выражении (16) можно принять равным нулю, тогда коэффициент преобразования по основным гармоническим фазного тока определится:

$$k_1' = \frac{\pi}{\sin \frac{\pi}{m}}. \quad (17)$$

Погрешность расчета в этом случае не превышает 3%.

Другим важным энергетическим показателем при расчете синхронного генератора, работающего в машинно-вентильном преобразователе частоты, является  $\cos \varphi_r$ , который в общем случае зависит от соотношения частоты генератора и выходной частоты и характера нагрузки. Коэффициент мощности генератора по основным гармоникам тока и напряжения  $\cos \varphi_r$  находится из выражения (16) при заданном  $\cos \varphi_H$  путем геометрического суммирования отдельных составляющих фазного тока



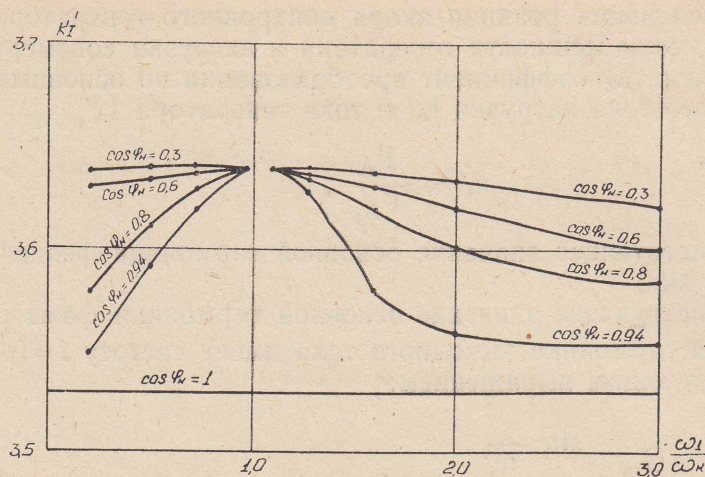


Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента преобразования фазного тока по основным гармоникам при различных кратностях частот  $\omega_1/\omega_K$ .

генератора. На рис. 5 представлена область изменения  $\cos \varphi_r$  при изменении  $\cos \varphi_n$  для диапазона изменения  $\omega_1/\omega_K$  от 0,5 до 3 при  $m=3$ . Зависимость  $\cos \varphi_r = f(\cos \varphi_n)$  для  $m=4$ ,  $m=6$  аналогичны представленной и в статье не приводятся. В результате расчетов выяснилось, что при  $\omega_1/\omega_K < 1$  и индуктивном характере нагрузки коэффициент мощности генератора выше коэффициента мощности нагрузки, наоборот, при  $1 < \omega_1/\omega_K < 2$   $\cos \varphi_r$  меньше  $\cos \varphi_n$ , далее, при  $\omega_1/\omega_K > 2$   $\cos \varphi_r$  становится

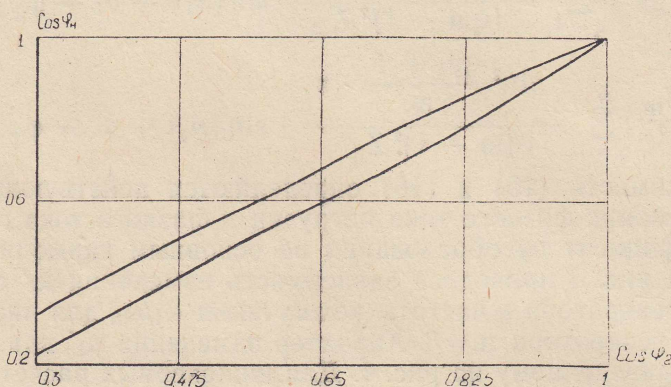


Рис. 5 Область изменения коэффициента мощности генератора при различных коэффициентах мощности нагрузки.

больше  $\cos \varphi_n$ . Однако, наибольшее отличие  $\cos \varphi_r$  от  $\cos \varphi_n$  при  $0,5 < \omega_1/\omega_K < 1$  не превышает 6% для  $m=3$ , поэтому с приемлемой для инженерных расчетов точностью можно положить  $\cos \varphi_r = \cos \varphi_n$ , но при низком коэффициенте мощности нагрузки (0,2—0,4) и отношении частот  $\omega_1/\omega_K$ , близком 3,  $\cos \varphi_r$  значительно увеличивается по сравнению с  $\cos \varphi_n$  (до 20%).

Таким образом, в результате исследования машинно-вентильного преобразователя частоты установлено:

1. Коэффициент преобразования фазного тока  $k_T$  не зависит от вида



нагрузки и соотношения частот  $\omega_1/\omega$  и определяется соотношением фаз синхронного генератора и нагрузки.

2. В режиме работы машинно-вентильного преобразователя частоты с соотношением частот  $\omega_1/\omega_k < 1$  коэффициент мощности генератора всегда выше коэффициента мощности нагрузки ( $\cos \varphi_g > \cos \varphi_n$ ).

3. Коэффициент преобразования по напряжению для данного машинно-вентильного преобразователя определяется выражением:

$$k_U = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} .$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гоноровский. Основы радиотехники. «Связьиздат», 1957 г.
  2. Н. З. Мастеев, Г. С. Мыцык. Критерии оценки способов преобразования частоты для преобразователей с непосредственной связью. «Электротехника», № 1, 1972 г.
-