

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МАШИННО-ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

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

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В настоящее время в связи с развитием силовой полупроводниковой техники широкое распространение в автономных источниках электропитания получили преобразователи частоты с непосредственной связью. Схемное решение их может быть самым различным [1, 2, 3]. Весьма важным является определение гармонического состава выходного напряжения таких устройств, существенно влияющих на поведение потребителей и элементы фильтра.

Рассмотрим гармонический состав кривой выходного напряжения преобразователя частоты с непосредственной связью, принцип действия которого основан на циклическом подключении обмоток генератора к нагрузке через равные промежутки времени. Схема трехфазно-трехфазного преобразователя частоты изображена на рис. 1. Форма кривой вы-

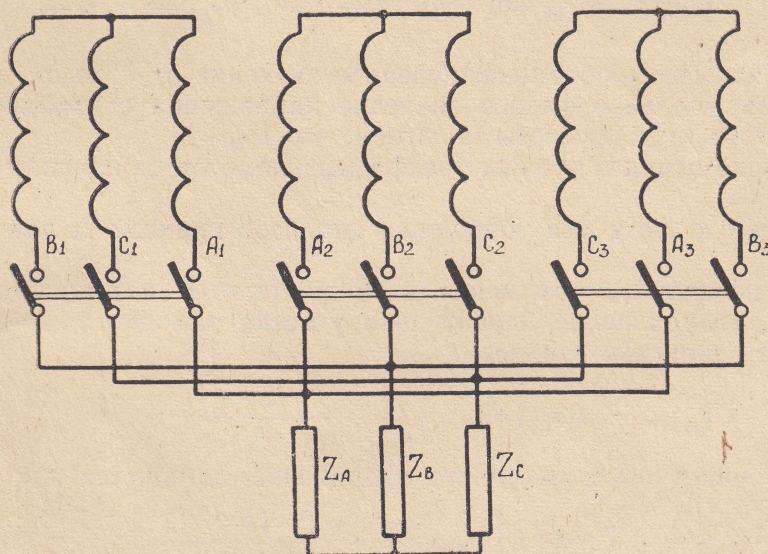


Рис. 1. Схема преобразователя частоты

ходного напряжения будет зависеть от количества переключаемых обмоток генератора, кратности входной и выходной частот и характера нагрузки. На рис. 2 приведена кривая выходного напряжения для случая активной нагрузки при шести переключаемых обмотках генератора.

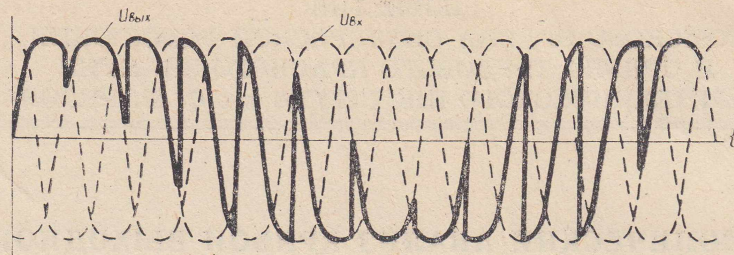


Рис. 2. Кривая выходного напряжения преобразователя

Гармонический анализ кривой выходного напряжения выполняется при следующих допущениях:

- 1) вентили идеальные;
- 2) отношение входной частоты к выходной — целое число;
- 3) нагрузка активная;
- 4) коммутация вентилей происходит мгновенно, угол коммутации вентилей $\gamma=0$.

Последнее допущение не вносит большой погрешности в результат расчета, так как преобразователь частоты включает в себя устройство искусственной коммутации вентилей.

Считаем, что напряжения фаз генератора симметричны и синусоидальны.

$$\begin{aligned}
 U_A(t) &= U_m \sin \left[\omega_{вх} \cdot t + \alpha - \frac{l-1}{m} \cdot 2\pi \right]; \\
 U_B(t) &= U_m \sin \left[\omega_{вх} \cdot t + \alpha - \frac{l-1}{m} \cdot 2\pi - \frac{2\pi}{3} \right]; \\
 U_C(t) &= U_m \sin \left[\omega_{вх} \cdot t + \alpha - \frac{l-1}{m} \cdot 2\pi - \frac{4\pi}{3} \right],
 \end{aligned} \quad (1)$$

где l — принимает любое целочисленное значение от 1 до m ;

U_m — максимальное фазное значение напряжения синхронного генератора, для простоты полагаем, что $U_m=1$;

m — число переключаемых трехфазных обмоток синхронного генератора.

Начальную фазу для упрощения анализов принимаем равной нулю ($\alpha=0$).

Если обозначить отношение входной частоты к выходной через $\nu = f_{вх}/f_{вых}$, то уравнение любого n -го участка выходного напряжения может быть записано в виде

$$U_{вых(n)} = \sin \nu \left[\omega_{вых} \cdot t - \frac{2\pi(n-1)}{m\nu} \right]. \quad (2)$$

Уравнение кривой выходного напряжения запишется как

$$U_{вых} = \sum_{n=1}^N \sin \nu \left[\omega_{вых} \cdot t - \frac{2\pi(n-1)}{m\nu} \right], \quad (3)$$

где N — целое число отрезков синусоид первичного фазного напряжения генератора в кривой выходного напряжения, определяемое отношением периода выходного напряжения к длительности подключенного состояния каждой обмотки генератора к нагрузке.

$$N = \frac{T_{вых}}{\tau}. \quad (4)$$

Длительность подключенного состояния обмоток генератора к нагрузке зависит только от числа трехфазных переключаемых обмоток генератора и кратности входной и выходной частот. Если период частоты переключения трехфазных обмоток обозначить через $T_{\text{пер}}$, то

$$\tau = \frac{T_{\text{пер}}}{m} \quad (5)$$

Период частоты переключения обмоток генератора определится следующим образом в зависимости от соотношения между $f_{\text{вх}}$ и $f_{\text{пер}}$. Если

$$f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}}, \quad \text{то} \quad T_{\text{пер}} = \frac{1}{f_{\text{вх}} - f_{\text{вых}}}, \quad (6)$$

если

$$f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}}, \quad \text{то} \quad T_{\text{пер}} = \frac{1}{f_{\text{вх}} + f_{\text{вых}}}.$$

Подставляя значение $T_{\text{пер}}$ в выражение (5), после преобразований находим для

$$f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}} \quad \tau = \frac{\nu}{m} \cdot \frac{1}{f_{\text{вх}}(\nu - 1)},$$

для

$$f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}} \quad \tau = \frac{\nu}{m} \cdot \frac{1}{f_{\text{вх}}(\nu + 1)}. \quad (7)$$

Откуда число отрезков синусоид первичного фазного напряжения генератора в кривой выходного напряжения определится:

$$N = m(\nu \mp 1). \quad (8)$$

Здесь знак плюс соответствует режиму работы преобразователя частоты при $f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}}$, минус — $f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}}$.

С другой стороны, длительность подключенного состояния обмоток генератора к нагрузке будет равна

$$\tau = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{m(\nu \mp 1)}. \quad (9)$$

Для количественной оценки амплитуды каждой гармоники разложим кривую выходного напряжения (3) в ряд Фурье. Коэффициенты ряда Фурье запишутся:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \sum_{n=1}^N \sin \nu \left[\omega_{\text{вых}} \cdot t - \frac{2\pi(n-1)}{m\nu} \right] \cdot \cos k \omega_{\text{вых}} \cdot t \, d(\omega_{\text{вых}} \cdot t). \quad (10)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \sum_{n=1}^N \sin \nu \left[\omega_{\text{вых}} \cdot t - \frac{2\pi(n-1)}{m\nu} \right] \cdot \sin k \omega_{\text{вых}} \cdot t \, d(\omega_{\text{вых}} \cdot t),$$

Решая уравнения (10) с учетом (7), (8), (9), получим

$$a_k = \frac{1}{2\pi} \left\{ -\frac{1}{\nu + k} \sum_{n=1}^N \left[\cos \frac{2\pi [n(k \pm 1) + (\nu \mp 1)]}{N} - \right. \right. \\ \left. \left. - \cos \frac{2\pi (n-1)(k \pm 1)}{N} \right] - \frac{1}{\nu - k} \sum_{n=1}^N \left[\cos \frac{2\pi [n(k \mp 1) - (\nu \mp 1)]}{N} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - \cos \frac{2\pi(n-1)(k \mp 1)}{N} \left. \right\}; \quad (11) \\
 b_k = & \frac{1}{2\pi} \left\{ - \frac{1}{\nu + k} \sum_{n=1}^N \left[\sin \frac{2\pi [n(k \pm 1) + (\nu \mp 1)]}{N} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sin \frac{2\pi(n-1)(k \pm 1)}{N} \right] - \frac{1}{\nu - k} \sum_{n=1}^N \left[\sin \frac{2\pi [n(k \mp 1) - (\nu \mp 1)]}{N} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sin \frac{2\pi(n-1)(k \mp 1)}{N} \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Верхние знаки относятся к режиму работы преобразователя при $f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}}$, нижние — $f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}}$.

На ЭВМ были проведены расчеты коэффициентов a_k и b_k по (11) для различных значений кратностей входной и выходной частот и числа переключаемых трехфазных обмоток генератора.

Расчеты показали, что амплитуда первой гармоники выходного напряжения для всех соотношений входной и выходной частот при числе переключаемых трехфазных обмоток, равном шести, остается постоянной, равной $0,954 U_m$. Наибольший процент в кривой выходного напряжения составляют гармоники с порядками, определяемыми следующей зависимостью:

$$k = Nq \mp 1, \quad (12)$$

где q — любое целое положительное число, причем амплитуды высших гармонических уменьшаются с ростом q .

При режиме работы с частотой переключений, большей частоты синхронного генератора, в кривой выходного напряжения появляются гармоники более высоких порядков по сравнению с таким же режимом при частоте переключений меньше частоты синхронного генератора. На рис. 3 приведена диаграмма, иллюстрирующая зависимость амплитуд

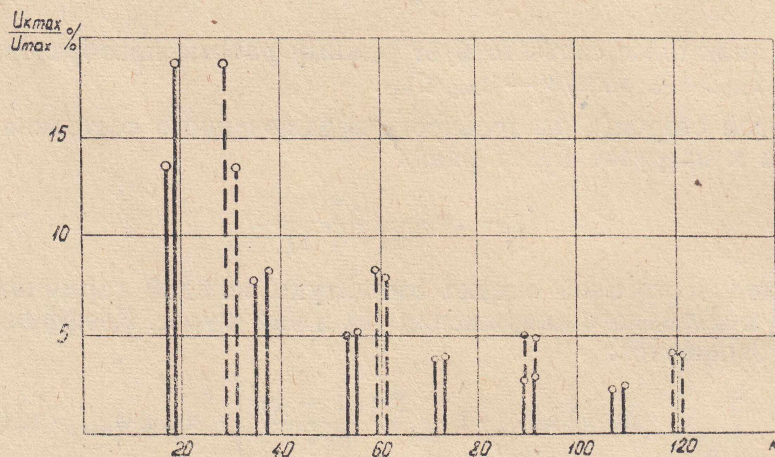


Рис. 3. Зависимость амплитуд высших гармонических от номера гармоник для $\nu=4$ и $m=6$ при $f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}}$ (сплошная линия) и $f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}}$ (штриховая линия)

гармоник от номера гармоники k для кратности входной и выходной частот $\nu=4$ и числа переключаемых трехфазных обмоток $m=6$ при $f_{\text{пер}} < f_{\text{вх}}$ (сплошная линия) и при $f_{\text{пер}} > f_{\text{вх}}$ (штриховая линия). Амплитуда первой гармоники на рисунке не показана.

На рис. 4 показан спектральный состав кривых выходного напряжения для различных кратностей входной и выходной частот при

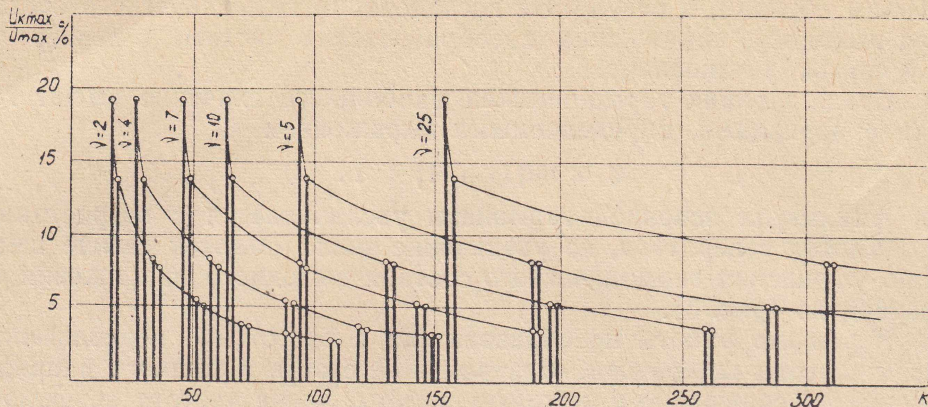


Рис. 4. Спектральный состав выходного напряжения преобразователя частоты для $f_{пер} > f_{вх}$ при различных ν

$f_{пер} > f_{вх}$ и числа независимых переключаемых обмоток генератора, равном шести. Амплитуды высших гармонических с ростом кратности входной и выходной частот, оставаясь постоянными по величине, смещаются в сторону высших порядков. Эта закономерность характерна для любого числа независимых обмоток генератора при любом соотношении частот переключений и частоты генератора.

С уменьшением числа переключаемых трехфазных обмоток генератора амплитуда первой гармоники выходного напряжения уменьшается. При $m=3$ амплитуда основной гармоники выходного напряжения уменьшается на 14% по сравнению с амплитудным значением основной гармоники напряжения при $m=6$.

С уменьшением числа трехфазных обмоток генератора возрастает процент высших гармонических, причем амплитуды высших гармоник, возрастая, смещаются в сторону низших порядков; амплитуда высшей гармоники, имеющей наибольшее значение в спектре выходного напряжения при $m=3$, составляет 43% от амплитудного значения основной гармоники.

Зависимость амплитуды первой гармоники от числа переключаемых трехфазных обмоток синхронного генератора приведена на рис. 5.

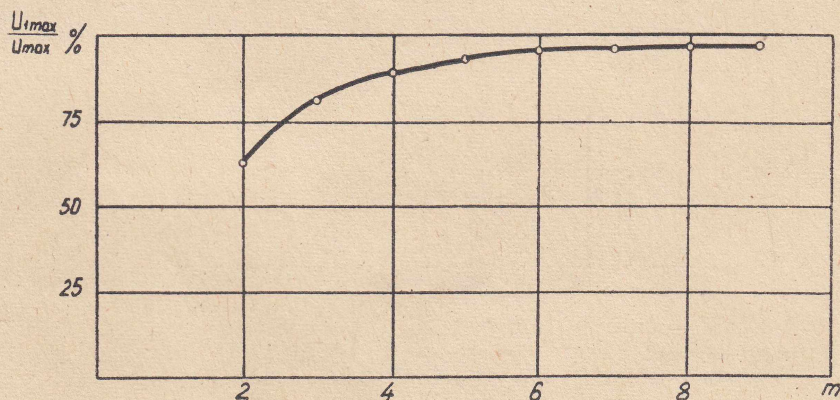


Рис. 5. Зависимость амплитуды первой гармоники от числа независимых трехфазных обмоток генератора

Постоянная составляющая напряжения отсутствует в кривой выходного напряжения при любом целом соотношении входной и выходной частот для различного числа трехфазных обмоток.

Таким образом, в результате исследования гармонического состава кривой выходного напряжения преобразователя частоты с непосредственной связью установлено:

1. Среди высших гармонических наибольшее значение имеют гармоники с порядками, определяемыми выражением

$$k = m q (\nu \mp 1) \mp 1.$$

2. Амплитуда основной гармоники увеличивается с возрастанием числа обмоток генератора, но увеличение числа обмоток свыше шести с целью улучшения гармонического состава выходного напряжения нецелесообразно (рис. 5).

3. В режиме работы преобразователя с частотой переключения, большей частоты генератора, спектральный состав выходного напряжения лучше по сравнению с режимом работы, когда частота переключений меньше частоты генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Бернштейн. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока. Изд-во «Энергия», 1968.

2. Н. З. Мастяев, Г. С. Мыцык. Критерии оценки способов преобразования частоты для преобразователей с непосредственной связью. «Электротехника», 1972, № 1.

3. R. D. Iesse, W. I. Spaven. Constant-Frequency A—C Power Using variable Speed Generation „Application and Industry“. 1960, N 46.