

АНАЛИЗ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЯЦИОННЫХ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

В. А. ДЕНИСОВ, Ш. С. РОЙЗ, Н. Ф. ЖМАЕВ

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

В различных автономных электроэнергетических установках движущихся объектов для получения синусоидального напряжения заданной стабильной частоты при переменной скорости вращения первичного двигателя применяют различные источники, отличающиеся большим разнообразием как по принципу действия, так и по конструктивному исполнению.

Однако с развитием полупроводниковой техники все большее внимание уделяется машинно-вентильным системам, использующим принцип амплитудной модуляции переменной высокой частоты заданной низкой. Причем амплитудная модуляция осуществляется как полупроводниковым преобразователем, так и электромашинным генератором [1, 2].

В данной работе производится сравнительный гармонический анализ кривой выходного напряжения модуляционного машинно-вентильного автономного источника при различных законах амплитудной модуляции. В качестве машинно-вентильной системы используется система: однофазный синхронный генератор, возбуждаемый со стороны ротора — двухполупериодный тиристорный реверсивный выпрямитель.

Предположим, что амплитудная модуляция в синхронном генераторе выполняется по синусоидальному закону, тогда кривая напряжения на выходе выпрямителя примет вид, изображенный на рис. 1. На участке $0 - \pi$ указанная кривая может быть выражена функцией

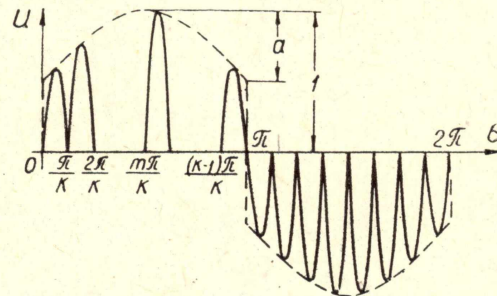


Рис. 1

$$\left. \begin{aligned}
 U &= (1 - a + a \sin \theta) \sin k \theta && \text{для } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{k} \\
 U &= (1 - a + a \sin \theta) \sin k \left(\theta - \frac{\pi}{k} \right) && \text{для } \frac{\pi}{k} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{k} \\
 &\dots \dots \dots && \dots \dots \dots
 \end{aligned} \right\}$$

$$U = (1 - a + a \sin \theta) \sin k \left(\theta - \frac{m \pi}{k} \right) \quad \text{для } \frac{m \pi}{k} \leq \theta \leq \frac{(m+1) \pi}{k} \quad (1)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$U = (1 - a + a \sin \theta) \sin k \left[\theta - \frac{(k-1) \pi}{k} \right] \quad \text{для } \frac{\pi(k-1)}{k} \leq \theta \leq \pi$$

Здесь

$k = \frac{f_1}{f_2}$ — кратность отношения несущей и модулирующей частот;

a — глубина амплитудной модуляции;

2π — период модулирующей частоты;

m — текущий номер полусинусоид несущей частоты.

Разложение функции в ряд Фурье будет содержать только нечетные синусные члены

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} b_{n(m)} \sin n \theta, \quad (2)$$

где n — номер нечетной ($n=1, 3, 5, 7, 9, \dots$) гармоники в выходном напряжении,

$$b_{n(m)} = \sum_{m=0}^{k-1} \frac{2}{\pi} \int_{\frac{m \pi}{k}}^{\frac{(m+1) \pi}{k}} \left[(1 - a + a \sin \theta) \sin k \left(\theta - \frac{m \pi}{k} \right) \right] \sin n \theta d \theta$$

— амплитуда n -й гармоники синусного ряда.

После некоторых преобразований и при выполнении условий $k \neq n$, $k+1 \neq n$ и $k-1 \neq n$, получаем

$$b_{n(m)} = \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{k-1} (1-a) \left\{ -\frac{1}{k-n} \left[\sin \frac{\pi}{k} (-nm) - \sin \frac{\pi}{k} (k-n-nm) \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{k+n} \left[\sin \frac{\pi}{k} (nm) - \sin \frac{\pi}{k} (k+n+nm) \right] \right\} +$$

$$+ \frac{a}{2} \left\{ \frac{1}{k+1-n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (m-nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k+1-n+m-nm) \right] \right\} +$$

$$+ \frac{1}{k-1+n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (-m+nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k-1+n-m+nm) \right] -$$

$$- \frac{1}{k+1+n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (m+nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k+1+n+m+nm) \right] -$$

$$- \frac{1}{k-1-n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (-m-nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k-1-n-m-nm) \right] \left. \right\}. \quad (3)$$

При условии $k=n$, $k+1=n$ и $k-1=n$ вычисление коэффициентов ведется по формуле

$$b_{n(m)} = \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{k-1} (1-a) \left\{ \cos m \pi + \frac{1}{k+n} \left[\sin \frac{\pi}{k} (nm) - \sin \frac{\pi}{k} (k+n+nm) \right] \right\} +$$

$$+ \frac{a}{2} \left\{ \frac{1}{k-1+n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (-m-nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k-1+n-m+nm) \right] - \frac{1}{k+1+n} \left[\cos \frac{\pi}{k} (m+nm) - \cos \frac{\pi}{k} (k+1+n+m+nm) \right] \right\}. \quad (4)$$

На рис. 2. даны значения коэффициентов ряда (2) в функции кратности отношений частот для двух случаев глубины амплитудной модуляции ($a=0$ и $a=0,4$), а на рис. 3 (сплошные линии) даны значения коэффициентов в функции глубины амплитудной модуляции для кратности частот, равной 8. Расчет коэффициентов выполнен на ЭЦВМ по формулам (3) и (4). Для сравнения на рис. 3 (пунктирные линии) приведены значения коэффициентов гармонического анализа только модулирующей (огibaющей) кривой без учета несущей частоты. Построение выполнено по формуле (5)

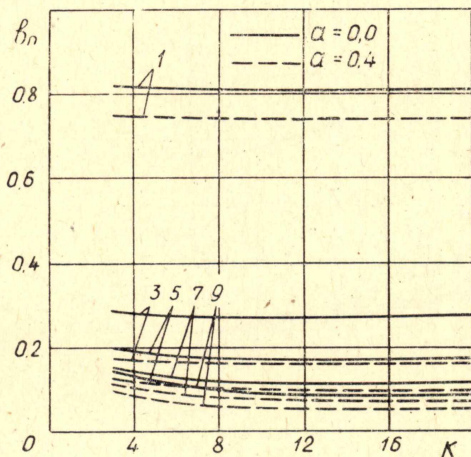


Рис. 2

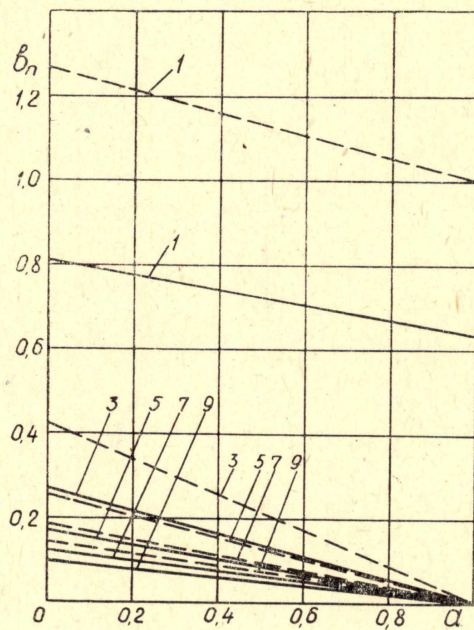


Рис. 3

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (1-a+a \sin \theta) \sin n \theta d \theta,$$

$$\begin{cases} (1-a) \frac{4}{n\pi} + a & \text{для } n=1 \\ (1-a) \frac{4}{n\pi} & \text{для } n \neq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Как видно из графиков рис. 2 и 3, значение каждого коэффициента гармонического ряда (2) с увеличением кратности частот выше $7 \div 10$ практически не изменяется и связано с соответствующим коэффициентом уравнения (5) постоянной величиной. Последняя зависит от схемы выпрямления несущей частоты и в данном случае может быть принята равной $\frac{2}{\pi}$.

На основании изложенного дальнейший анализ амплитудно-модулированных кусочно-гладких функций можно свести к анализу только модулирующих функций, для чего необходимо выбрать кратность отношения частот не ниже $7 \div 10$ и в полученную формулу определения коэффициентов ряда Фурье ввести поправочный коэффициент выпрямления схемы.

На рис. 4 (а, б) изображены огибающие кривые выходного напряжения автономного источника при наиболее просто реализуемых законах амплитудной модуляции и соответствующие им графики гармоник

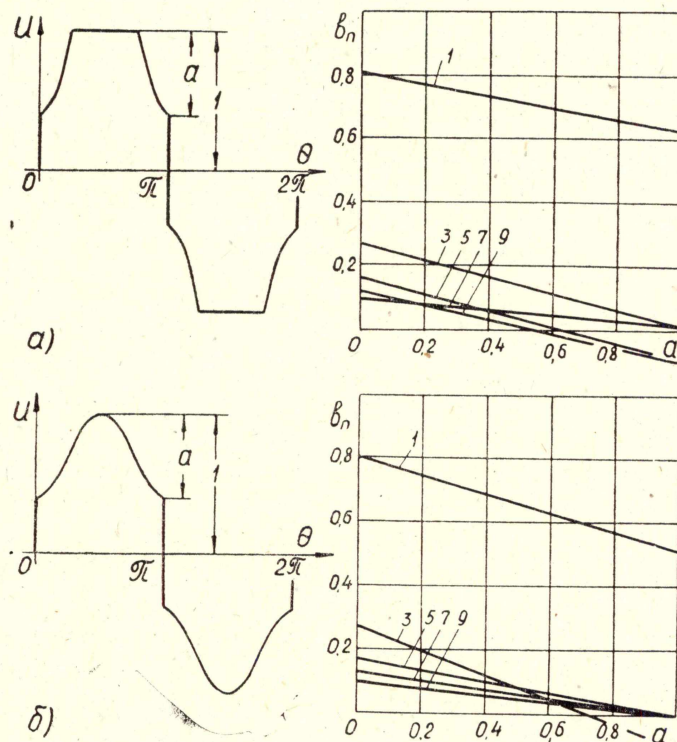


Рис. 4

ческого состава. Указанные кривые и графики построены согласно уравнениям (6, 7, 8, 9):
рис. 4, а

$$\left. \begin{aligned} U &= 1 - a \cos 2\theta && \text{для } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} \\ U &= 1 && \text{для } \frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{8}{\pi^2 n} + \frac{8a}{\pi^2} \left[\frac{\cos(n+2)45^\circ}{2(n+2)} + \frac{\cos(n-2)45^\circ}{2(n-2)} - \frac{n}{n^2-4} \right]; \quad (7)$$

рис. 4, б

$$U = 1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos 2\theta \quad \text{для } 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (8)$$

$$b_n = \frac{4}{\pi^2} \left(\frac{2-a}{n} - \frac{an}{n^2-4} \right). \quad (9)$$

Из рассмотренных законов амплитудной модуляции более предпочтительным является закон рис. 4б, так как в этом случае лучший гармонический состав достигается при меньшей глубине модуляции, что соответствует лучшим энергетическим соотношениям.

Выводы

1. В модуляционных автономных источниках кратность отношения несущей и модулирующей частот должна быть не ниже $7 \div 10$, так как при меньшей кратности наблюдается ухудшение гармонического состава выходного напряжения.

2. Анализ кривой выходного напряжения автономного источника можно вести по модулирующей функции при условии, что кратность отношения частот более $7 \div 10$ и в формулу расчета коэффициентов гармоник введен коэффициент выпрямления схемы.

3. Наиболее рациональным законом амплитудной модуляции в синхронном генераторе следует считать закон, полученный в результате наложения на постоянный поток возбуждения синусоидального потока, изменяющегося с двойной частотой.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Попов, И. И. Лукин. К вопросу получения переменного тока постоянной частоты при изменяющейся скорости вращения привода генератора. Известия вузов, «Энергетика», № 1, 1970.

2. Э. В. Глатко. Исследование модуляционного метода формирования синусоидального напряжения судовой валогенераторной установки. Автореферат диссертации, Л., 1972.

3. Г. С. Зиновьев. Выходное напряжение вентильных преобразователей частоты с непосредственной связью. Изв. СО АН СССР, № 10 вып. 3, 1965.