

УДК 621.314

Жуйков В. Я., д-р техн. наук, проф.

Вербицкий Е. В., Осипенко Е. С.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», факультет электроники, кафедра промышленной электроники, г. Киев, Украина, п-р Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056, e-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net), [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

### ФОРМИРОВАНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ РАЗНОТИПНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

*Рассмотрена проблема подключения дополнительных источников энергии к сетям электроснабжения. На основании модели системы с несколькими источниками и использования разных режимов ее работы, предложен способ формирования синусоидального напряжения при условии минимизации искажения его формы и числа коммутаций ключевых элементов.*

**Ключевые слова:** синусоидальное напряжение, источник постоянного напряжения, источник постоянного тока, амплитудно-импульсная модуляция.

Жуйков В. Я., д-р техн. наук, проф.

Вербицкий Е. В., Осипенко Е. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», факультет електроніки, кафедра промислової електроніки, м. Київ, Україна, пр.Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net), [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

### ФОРМУВАННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ РІЗНОТИПОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

*Розглянута проблема підключення додаткових джерел енергії до мереж електропостачання. На підставі моделі системи з декількома джерелами і використання різних режимів її роботи, запропонований спосіб формування синусоїдальної напруги за умови мінімізації спотворення його форми і числа комутацій ключових елементів.*

**Ключові слова:** синусоїдальна напруга, джерело постійної напруги, джерело постійного струму, амплітудно-імпульсна модуляція

Zhuikov V.Ya., D-r Eng. Sci., Prof.

Verbiskiy Ye.V., Osipenko Ye. S.

National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute», faculty of electronics, department of industrial electronics, Kyiv, Ukraine. Av. Peremogy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056  
e-mail: [valery.zhuikov@gmail.com](mailto:valery.zhuikov@gmail.com), [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net), [ekateryna.osypenko@gmail.com](mailto:ekateryna.osypenko@gmail.com)

### SINUSOIDAL VOLTAGE GENERATION BY ENERGY SOURCES OF DIFFERENT TYPE

*The problem of additional energy sources connection to power network is considered. The method of sinusoidal voltage forming subject to minimization of the distortion and the number of switch commutation based on the system model with several energy sources and different operation modes using is developed.*

**Key words:** sinusoidal voltage, DC voltage source, DC current source, pulse-amplitude modulation.

#### Введение

В настоящее время режимы работы дополнительных источников энергии, подключаемых к центральной электросети, и их доля в общем объеме поставок электроэнергии не регламентируются, что связано с небольшой установленной мощностью дополнительных источников. Как показал опыт стран с развитым рынком возобновляемой энергетики, при достижении доли в 10-20 % от суммарного объема электроэнергии, их влияние на режим центральной энергосети становится существенным [1].

#### Постановка задачи и цель работы

В электросетях основной генератор электроэнергии работает в режиме источника напряжения и задает параметры напряжения, а также режимы работы системы, при этом остальные источники работают в режиме источников тока. Поэтому сеть с дополнительными источниками можно представить моделью, состоящей из одного идеального источника напряжения  $E$ ,  $n$  идеальных источников тока  $J_1-J_n$ , которые с помощью  $n+1$  ключа  $S_1-S_{n+1}$  подключаются параллельно к нагрузке  $R_H$ . В зависимости от сопротивления нагрузки возможны четыре режима работы системы:

- 1) холостого хода ( $R_H \rightarrow \infty$ );
- 2) короткого замыкания ( $R_H \rightarrow 0$ );
- 3) стабилизации напряжения ( $0 < R_H < \infty$ );
- 4) стабилизации тока ( $0 < R_H < \infty$ ).

В режимах стабилизации напряжения и тока к нагрузке могут подключаться оба типа источников. В режиме холостого хода источники тока отключены, а в режиме короткого замыкания отключен источник напряжения. Для большинства нагрузок используется режим стабилизации напряжения, поэтому дальнейший материал излагается применительно к этому режиму работы.

Способ формирования напряжения на нагрузке при использовании разных видов модуляции [2] выбирается исходя из следующих критериев и ограничений:

- 1) обеспечение необходимого действующего значения напряжения  $U_C$ ;
- 2) минимизация количества коммутаций  $N$  ключей  $S_1-S_{n+1}$ ;
- 3) минимизация искажения формы напряжения, которое оценивается с помощью квадратической ошибки  $\delta$  [3].

В связи с относительной простотой метода, анализ режимов работы системы рассматривается для случая амплитудно-импульсной модуляции.

### Режим стабилизации напряжения

В режиме стабилизации напряжения используется источник напряжения  $E$ , который формирует одну ступень напряжения, и источники тока, позволяющие дополнительно сформировать  $M$  из  $2^n$  возможных ступеней тока  $J_{\Sigma i}$ , для которых выполняется неравенство:

$$J_{\Sigma i} R_H < U_{Cm} \quad (1)$$

где  $U_{Cm}$  – амплитудное значение переменного напряжения.

При использовании  $K = M+1$  ступеней, коэффициент гармоник  $K_\Gamma$  напряжения на нагрузке оценивается по формуле [3]:

$$K_\Gamma = \sqrt{\left(\frac{\pi}{(4K+2)} \sin\left(\frac{\pi}{(4K+2)}\right)\right)^2 - 1} \quad (2)$$

а количество коммутаций ключей  $N$  находится в диапазоне  $N = 4(M+1) \dots 4n \cdot (M+1)$ . Поскольку в режиме стабилизации напряжения к нагрузке подключаются оба типа источников, а в режиме холостого хода и короткого замыкания – каждый тип источников по отдельности, целесообразно рассмотреть особенности работы системы в граничных режимах  $R_H \rightarrow \infty$  и  $R_H \rightarrow 0$ .

**В режиме стабилизации напряжения холостого хода** к выходу преобразователя каждые полпериода подключается источник напряжения  $E$  на время  $t_i = 0 \dots T/2$ , с момента  $t_1 = 0.25T - 0.5t_i$  до  $t_2 = 0.25T + 0.5t_i$ . Условие стабилизации действующего значения напряжения  $U_C$  описывается следующим выражением:

$$U_C = \sqrt{2/T \int_{t_1}^{t_2} E^2 dt} \quad (3)$$

Значения параметров  $E$  и  $t_i$ , при которых искажение формы напряжения минимально, находятся из условия минимизации целевой функции, в качестве которой выбрано значение квадратичной ошибки  $\delta$ , используя выражение:

$$\delta^2 = \int_0^{t_1} (\sqrt{2} U_C \sin(\omega t))^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} (E - \sqrt{2} U_C \sin(\omega t))^2 dt + \int_{t_2}^{T/2} (\sqrt{2} U_C \sin(\omega t))^2 dt \Rightarrow \min \quad (4)$$

при этом параметр  $t_i$  находится с помощью уравнения (3):

$$t_i = (U_C / E)^2 \cdot 0.5T \quad (5)$$

Из условия  $d\delta^2/dt = 0$ , получено трансцендентное уравнение:

$$\sin(0.5\pi \cdot z^2) - 2\cos(0.5\pi \cdot z^2) \cdot z^2 = 0 \quad (6)$$

где  $z = U_C / E$ , из которого рассчитываются значения параметров:  $E = \sqrt{2} \cdot U_C$ ,  $t_i = T/4$ . При этом в режиме холостого хода напряжение на нагрузке имеет действующее значение  $U_C$  при коэффициенте гармоник  $K_\Gamma \approx 48\%$  с количеством коммутаций ключей  $N=4$ . В режиме стабилизации напряжения за счет дополнительных ступеней напряжения, формируемых источниками тока, значение коэффициента гармоник значительно меньше.

Длительность ступеней тока в режиме короткого замыкания определяется амплитудой сигнала  $J_m$ , который формируется при заданных значениях ступеней тока с минимальной ошибкой. При условии  $n > 2$  значение  $J_m$  определяется значением максимальной ступени тока  $J_m \approx J_{\Sigma max}$ . Для вычисления длительности подключения каждой ступени тока  $J_{\Sigma i}$  к нагрузке выполняются следующие шаги:

1. Осуществляется ранжирование комбинаций состояний ключей  $S_1-S_n$  в порядке возрастания суммарного тока источников  $J_{\Sigma i}$ :

$$J_{\Sigma i} = \sum_{k=1}^n S_{ki} \cdot J_k \quad (7)$$

2. Рассчитываются моменты  $t_k$  коммутации ключей при переходе от  $k-1$  до  $k$  уровня тока [3] по формуле :

$$t_k = \arcsin((J_{\Sigma k} + J_{\Sigma(k-1)}) / (2J_m)) \quad (8)$$

3. Определяются комбинации ключей, при которых длительность ступени суммарного тока  $T_k = t_k - t_{k-1}$  на порядок меньше значения  $T/2^{n+1}$ , и исключаются из последовательности, сформированной на шаге 1.

В этом режиме ток формируется из  $M$  ступеней с количеством коммутаций ключей  $N = 4M \cdot 4n \cdot M$ , коэффициент гармоник оценивается по формуле (2).

**Формирование напряжения разнотипными источниками** в режиме стабилизации напряжения заключается в совместном использовании источников с параметрами, рассчитанными для режимов холостого хода и короткого замыкания с учетом ограничения (1). При вычислении моментов коммутации ступеней по формуле (8) не обеспечивается стабилизация напряжения, поэтому дополнительно необходимо регулировать ширину одной или нескольких ступеней. Очевидно, что наименьший прирост ошибки наблюдается при регулировании ступени с максимальной амплитудой  $E$ , поскольку на этом участке синусоидальное напряжение изменяется наиболее плавно. Поэтому длительность ступени  $t_i$  источника  $E$  в этом режиме рассчитывается из уравнения:

$$R_H^2 \sum_{k=1}^M J_{\Sigma k}^2 (t_k - t_{k-1}) + E^2 \cdot 0.5t_i = U_C^2 \cdot 0.25T \quad (9)$$

### Выводы

В статье предложен способ формирования напряжения при включении нескольких разнотипных источников энергии параллельно нагрузке, который позволяет уменьшить коэффициент гармоник питающего напряжения и повысить эффективность работы системы за счет уменьшения количества коммутаций ключей.

### Список використаної літератури:

1. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах/ Ю. І. Якименко, Є. І. Сокол, В. Я. Жуйков, Ю. С. Петергеря, О. Л. Іванін. – К.: Політехніка, 2001. – 113 с.
2. Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники. – М.: Высш. шк., 1980. – 424 с.
3. Системы предупреждающего управления вентильными преобразователями / Жуйков В.Я., Павлов В.Б., Стжелецки Р.Г. АН Украины. Ин-т электродинамики. – К.: Наук. думка, 1991. – 240 с.

### Referenses:

1. Renewable energy sources in local objects/ Y. I. Yakymenko, Ye. I. Sokol, V.Y. Zhuykov, Y.S. Petergerya, O.L. Ivanin. – K.: Politekhnik, 2001.- 113 p.
2. Rudenko V. S., Senko V. I., Chizhenko I. M. Basis of converting technique. – M.: Vyssh. shk., 1980. – 424 p.
3. Switch converters predict control systems / Zhuykov V.Y., Pavlov V.B., Stzheletsky R.G., AN Ukrainy. In-t elektrodinamiki. – K.: Nauk. dumka, 1991. – 240 p.

Поступила в редакцию 10.02 2016 г.