

---

УДК 621.3.012.3  
ББК 31.21  
Б 43

**Белов А.А.**

Соискатель кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, e-mail: belov.anton.7@mail.ru

## **Исследование параметров ступенчатых кривых напряжения при расширении центральной ступени (Рецензирована)**

### **Аннотация**

Рассматривается выбор и исследование характеристик ступенчатых кривых при расширении центральной ступеньки. Исследуются следующие характеристики: изменение действующего значения напряжения, изменение абсолютного отклонения действующего значения напряжения, изменение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Исходя из результатов, разработана ступенчатая кривая для инвертора ступенчатой модуляции.

**Ключевые слова:** ступенчатая модуляция, ступенчатая кривая, графо-аналитический метод разложения функции в ряд Фурье, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, действующее значение напряжения.

**Belov A.A.**

Applicant for Candidate's degree of Department of Electrical Engineering and Electrical Machinery, Kuban State University of Technology, Krasnodar, e-mail: belov.anton.7@mail.ru

## **The research of the parameters of the step voltage curves at the expansion of the central step**

### **Abstract**

This paper explains how to choose and study the characteristics of stepped curves at the expansion of the central step. The following characteristics are investigated: the change of the effective value of the voltage, the change of the absolute deviation of the effective value of the voltage and the variation of the voltage waveform distortion. Based on the obtained results, the step curve for the inverter of step modulation is developed.

**Keywords:** step modulation, stepped curve, graphical-analytical method for the expansion of the Fourier, coefficient of harmonic distortion of the voltage, the effective voltage.

Цель данной статьи – публикация основных этапов построения и исследования параметров ступенчатых кривых при расширении центральной ступеньки; выбор ступенчатой кривой в качестве основной для инвертора ступенчатой модуляции при трех первичных источниках питания.

Начальные условия выбора ступенчатых кривых: 1) амплитудное значение напряжения 310 В; 2) частота 50 Гц; 3) вид кривой до начала расширения ЦС\*: равноугольная кривая, симметричная относительно оси абсцисс [1, 2].

### **1. Обзор и выбор ступенчатых кривых для исследования**

Проведенный обзор зависимостей уровней напряжения ступенек и их количества от количества первичных источников, а также зависимости амплитуды центральной ступеньки от амплитуд остальных ступенек, показывает следующие зависимости:

---

\* В статье приняты сокращения: ГАМ – графо-аналитический метод разложения функции в ряд Фурье, КИСКН – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (Ки), СМ – ступенчатая модуляция, ЦС – центральная ступенька (полупериода выходного напряжения инвертора), ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

$$U_N = U_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right), \quad (1)$$

$$U_N = U_0 \cdot 2^{N-1}, \quad (2)$$

$$U_N = U_0 \cdot N, \quad (3)$$

$$U_{\text{цс}} \neq \sum_{N=1}^L (U_N), \quad (4)$$

$$U_{\text{цс}} = \sum_{N=1}^L (U_N), \quad (5)$$

$$L = K_{\text{ист}}, \quad (6)$$

$$L = K_{\text{ист}} + 1, \quad (7)$$

$$L = K_{\text{ист}} \cdot 2 + 1, \quad (8)$$

где  $N$  – номер ступеньки;

$U_N$  – напряжение ступеньки, В;

$U_0$  – напряжение базовой ступеньки, В;

$U_{\max}$  – амплитудное напряжение ступенчатой кривой, В;

$U_{\text{цс}}$  – напряжение центральной ступеньки, В;

$L$  – количество ступенек за четверть периода;

$K_{\text{ист}}$  – количество первичных источников.

Выражение 1 использовалось в работах [1, 2] (в теоретической части). Данная зависимость позволяет получить очень высокие результаты при формировании выходного напряжения СМ-инвертора. Однако у данной зависимости есть существенные недостатки: 1) напряжение центральной ступеньки невозможно сложить из суммы остальных ступенек за четверть периода (4), что приводит при стабилизации методом расширения центральной ступеньки к неравномерному потреблению мощности от первичных источников; 2) количество ступеней за четверть периода определяется выражением 6, что существенно увеличивает требования к количеству первичных источников питания.

Выражение 2 является видом функции нормального распределения по двоичному закону [1, 2] (в практической части). Обладает достаточно высокими показателями качества выходного напряжения [1, 2]. Напряжение центральной ступеньки равно сумме ячеек за четверть периода (5). Количество первичных источников определяется по выражению 7. Основной недостаток данного метода формирования напряжения – повышенные требования к количеству первичных источников питания (невозможно использовать выражение вида 8).

Выражение 3 применяется в работах [3-8]. При этом зависимость количества ступеней за четверть периода определяется выражениями 6 или 7, что также увеличивает требования к количеству первичных источников питания. Метод формирования 3 имеет меньший уровень качества выходного напряжения по сравнению с 1, однако позволяет стабилизировать выходное напряжение без неравномерного распределения мощности от первичных источников питания. Нужно отметить, что в рассмотренной литературе применения зависимости вида 8 найдено не было, несмотря на возможность удвоения количества ступеней выходного напряжения без увеличения количества первичных источников (при  $K_{\text{ист}} \geq 3$ ). В связи с этим принят данный вид зависимости для ступенчатой кривой с  $K_{\text{ист}} = 3$ . Также следует отметить, что выход на данную зависимость достаточно элементарен, хотя и приводит к улучшенным резуль-

татам в части качества выходного напряжения, поэтому, несмотря на применение названного метода в данной работе, автор опасается назвать себя разработчиком данного метода, т.к., возможно, из-за своей простоты он в какой-либо работе все же применялся (в России или в мире).

Учитывая изложенное, выберем при трех первичных источниках и равноугловой модуляции для исследования от  $L=3$  до  $L=8$  следующие виды кривых.

**Ступенчатая кривая  $L=3$ ;  $2 \leq K_{уст} \leq 3$ ;  $U_N = U_0 \cdot N$ ;  $U_{цс} = \sum_{N=1}^{L-2} (U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В}/3 = 103,34 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 1 = 103,34 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2 = 206,68 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (9)$$

Для удобства обозначим данную кривую как ступенчатую кривую трех уровней напряжения (СК3).

Огибающая функция  $U_{ог}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{ог}(\alpha) = U_3 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – угловая координата ступени, рад.

Данный график может быть построен как при двух или трех первичных источниках питания.

**Ступенчатая кривая  $L=4$ ;  $K_{уст} = 3$ ;  $U_N = U_0 \cdot 2^{N-1}$ ;  $U_{цс} = \sum_{N=1}^{L-3} (U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В}/7 = 44,29 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 2^0 = 44,29 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2^1 = 88,58 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 2^2 = 177,16 \text{ В}, \\ U_4 = U_1 + U_2 + U_3 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (11)$$

Для удобства обозначим данную кривую как ступенчатую кривую четырех уровней напряжения (СК4).

Огибающая функция  $U_{ог}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{ог}(\alpha) = U_4 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{16}\right). \quad (12)$$

**Ступенчатая кривая  $L=4$ ;  $K_{уст} \geq 3$ ;  $U_N = U_0 \cdot N$ ;  $U_{цс} \neq \sum_{N=1}^L (U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В}/4 = 77,5 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 1 = 77,5 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2 = 155 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 232,5 \text{ В}, \\ U_4 = U_0 \cdot 4 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (13)$$

Так как данная кривая не удовлетворяет условию применения трех первичных источников, обозначим ее как СК4д – дополнительная для исследования ступенчатая кривая четырех уровней напряжения.

Огибающая функция  $U_{ог}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{ог}(\alpha) = U_4 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{16}\right). \quad (14)$$

**Ступенчатая кривая L=5;  $K_{\text{нст}} = 5$ ;  $U_N = U_0 \cdot N$ ;  $U_{\text{цс}} = \sum_{N=1}^L(U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В} / 5 = 62 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 1 = 62 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2 = 124 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 186 \text{ В}, \\ U_4 = U_0 \cdot 4 = 248 \text{ В}, \\ U_5 = U_0 \cdot 5 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (15)$$

Так как данная кривая не удовлетворяет условию применения трех первичных источников, обозначим ее как СК5д – дополнительная для исследования ступенчатая кривая пяти уровней напряжения.

Огибающая функция  $U_{\text{ог}}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{\text{ог}}(\alpha) = U_5 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{20}\right). \quad (16)$$

**Ступенчатая кривая L=6;  $K_{\text{нст}} = 6$ ;  $U_N = U_0 \cdot N$ ;  $U_{\text{цс}} = \sum_{N=1}^L(U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В} / 6 = 51,67 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 1 = 51,67 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2 = 103,34 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 155,01 \text{ В}, \\ U_4 = U_0 \cdot 4 = 206,68 \text{ В}, \\ U_5 = U_0 \cdot 5 = 258,35 \text{ В}, \\ U_6 = U_0 \cdot 6 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (17)$$

Так как данная кривая не удовлетворяет условию применения трех первичных источников, обозначим ее как СК6д – дополнительная для исследования ступенчатая кривая шести уровней напряжения.

Огибающая функция  $U_{\text{ог}}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{\text{ог}}(\alpha) = U_6 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{24}\right). \quad (18)$$

**Ступенчатая кривая L=7;  $K_{\text{нст}} = 3$ ;  $U_N = U_0 \cdot N$ ;  $U_{\text{цс}} = \sum_{N=1}^L(U_N)$ ,**

$$\begin{cases} U_0 = 310 \text{ В} / 7 = 44,29 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 2^0 = 44,29 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2^1 = 88,58 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 132,87 \text{ В}, \\ U_4 = U_0 \cdot 2^2 = 177,16 \text{ В}, \\ U_5 = U_0 \cdot 5 = 221,45 \text{ В}, \\ U_6 = U_0 \cdot 6 = 265,74 \text{ В}, \\ U_7 = U_0 \cdot 7 = U_1 + U_2 + U_4 = 310 \text{ В}. \end{cases} \quad (19)$$

Уровни напряжений  $U_1, U_2, U_4$  являются выходными напряжениями первичных источников питания.  $U_3, U_5, U_6$  – напряжения, составленные из  $U_1, U_2$  и  $U_4, U_7$  – напряжение общей ступеньки.

Для удобства обозначим данную кривую как ступенчатую кривую семи уровней напряжения (СК7).

Огибающая функция  $U_{\text{ог}}(\alpha)$  имеет следующий вид:

$$U_{\text{ог}}(\alpha) = U_7 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{28}\right). \quad (20)$$

















