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*: равноугловая 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 (Ku), СМ – ступенчатая модуляция, ЦС – центральная ступенька (полупериода выходного напряжения инвертора), ШИМ – широтно-импульсная модуляция.*

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

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

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

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

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

$$L = K_{ист}, \quad (6)$$

$$L = K_{ист} + 1, \quad (7)$$

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

где N – номер ступеньки;

U_N – напряжение ступеньки, В;

U_0 – напряжение базовой ступеньки, В;

$Umax$ – амплитудное напряжение ступенчатой кривой, В;

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

L – количество ступенек за четверть периода;

$K_{ист}$ – 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 $K_{ист} \geq 3$). В связи с этим принят данный вид зависимости для ступенчатой кривой с $K_{ист} = 3$. 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;** $2 \le K_{нст} \le 3$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} = \sum_{N=1}^{L=2}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/3 = 103{,}34\ В, \\ U1 = U0 \cdot 1 = 103{,}34\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2 = 206{,}68\ В, \\ U3 = U0 \cdot 3 = 310\ В. \end{cases} \quad (9)$$

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

Огибающая функция Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U3 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right), \quad (10)$$

где α – угловая координата ступени, рад.

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

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

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/7 = 44{,}29\ В, \\ U1 = U0 \cdot 2^0 = 44{,}29\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2^1 = 88{,}58\ В, \\ U3 = U0 \cdot 2^2 = 177{,}16\ В, \\ U4 = U1 + U2 + U3 = 310\ В. \end{cases} \quad (11)$$

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

Огибающая функция Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U4 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{16}\right). \quad (12)$$

Ступенчатая кривая **L=4;** $K_{нст} \ge 3$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} \ne \sum_{N=1}^{L}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/4 = 77{,}5\ В, \\ U1 = U0 \cdot 1 = 77{,}5\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2 = 155\ В, \\ U3 = U0 \cdot 3 = 232{,}5\ В, \\ U4 = U0 \cdot 4 = 310\ В. \end{cases} \quad (13)$$

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 Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U4 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{16}\right). \quad (14)$$

Ступенчатая кривая **L=5;** $K_{ист} = 5$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} \neq \sum_{N=1}^{L}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/5 = 62\ В, \\ U1 = U0 \cdot 1 = 62\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2 = 124\ В, \\ U3 = U0 \cdot 3 = 186\ В, \\ U4 = U0 \cdot 4 = 248\ В, \\ U5 = U0 \cdot 5 = 310\ В. \end{cases} \quad (15)$$

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 Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U5 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{20}\right). \quad (16)$$

Ступенчатая кривая **L=6;** $K_{ист} = 6$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} \neq \sum_{N=1}^{L}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/6 = 51{,}67\ В, \\ U1 = U0 \cdot 1 = 51{,}67\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2 = 103{,}34\ В \\ U3 = U0 \cdot 3 = 155{,}01\ В. \\ U4 = U0 \cdot 4 = 206{,}68\ В. \\ U5 = U0 \cdot 5 = 258{,}35\ В. \\ U6 = U0 \cdot 6 = 310\ В. \end{cases} \quad (17)$$

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 Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U6 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{24}\right). \quad (18)$$

Ступенчатая кривая **L=7;** $K_{ист} = 3$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} = \sum_{N=1}^{L=3}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/7 = 44{,}29\ В, \\ U1 = U0 \cdot 2^0 = 44{,}29\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2^1 = 88{,}58\ В, \\ U3 = U0 \cdot 3 = 132{,}87\ В, \\ U4 = U0 \cdot 2^2 = 177{,}16\ В, \\ U5 = U0 \cdot 5 = 221{,}45\ В, \\ U6 = U0 \cdot 6 = 265{,}74\ В, \\ U7 = U0 \cdot 7 = U1 + U2 + U4 = 310\ В. \end{cases} \quad (19)$$

Уровни напряжений U1, U2, U4 являются выходными напряжениями первичных источников питания. U3, U5, U6 – напряжения, составленные из U1, U2 и U4, U7 – напряжение общей ступеньки.

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

Огибающая функция Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U7 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{28}\right). \quad (20)$$

Ступенчатая кривая **L=8;** $K_{ист} = 8$; $U_N = Uo \cdot N$; $U_{ЦС} \neq \sum_{N=1}^{L}(U_N)$,

$$\begin{cases} U0 = 310\ В/8 = 38{,}75\ В, \\ U1 = U0 \cdot 1 = 38{,}75\ В, \\ U2 = U0 \cdot 2 = 77{,}5\ В, \\ U3 = U0 \cdot 3 = 116{,}25\ В, \\ U4 = U0 \cdot 4 = 155\ В, \\ U5 = U0 \cdot 5 = 193{,}75\ В, \\ U6 = U0 \cdot 6 = 232{,}5\ В, \\ U7 = U0 \cdot 7 = 271{,}25\ В, \\ U8 = U0 \cdot 8 = 310\ В. \end{cases} \quad (21)$$

Так данная кривая не удовлетворяет условию применения трех первичных источников, обозначим ее как СК8д – дополнительная для исследования ступенчатая кривая восьми уровней напряжения.

Огибающая функция Uог(α) имеет следующий вид:

$$Uor(\alpha) = U8 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{32}\right). \quad (22)$$

Графики полупериодов названных ступенчатых кривых до начала расширения ЦС показаны на рисунке 1**.**

2. Выбор параметров ступенчатых кривых и математического аппарата исследования

Согласно [9] выбраны следующие параметры исследования ступенчатых кривых при расширении ЦС (стабилизация методом ШИМ): 1) установившееся отклонение действующего напряжения; 2) отклонение частоты ступенчатой кривой; 3) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Установившееся отклонение напряжения δUy% в процентах равно [9]:

$$\delta Uy\% = \frac{Uуст - Uном}{Uном} \cdot 100\%, \quad (23)$$

где Uуст – установившееся действующее значение напряжения за интервал усреднения, В;

Uном=220 В – номинальное действующее напряжение для сетей 380 В.

Отклонение частоты Δf равно [9]:

$$\Delta f = \frac{fy - fном}{fном} \cdot 100\%, \quad (24)$$

$$\Delta f = fy - fном, \quad (25)$$

где fy – усредненное значение частоты fy выходного напряжения как результат усреднения N наблюдений fi на интервале времени, равном 20 с, Гц;

fном – номинальное значение частоты выходного напряжения, В.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения Ku равен [9]:

$$Ku = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} Un^2}}{U1} \cdot 100\%, \quad (26)$$

где Un – действующее значение n-й гармонической составляющей напряжения, В;

U1 – действующее значение основной частоты, В;

N – количество учитываемых гармонических составляющих, N≥40.

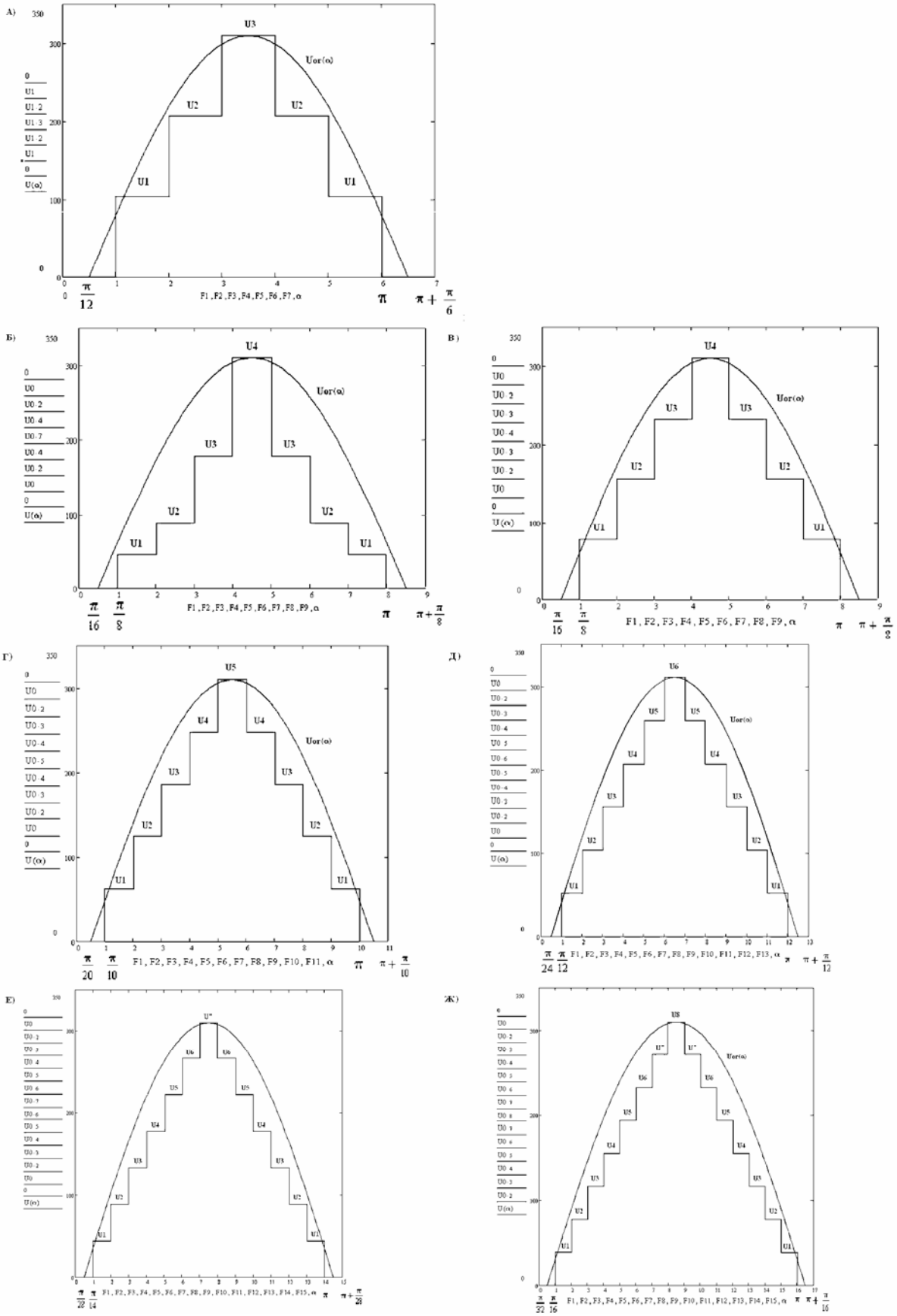

Рис. 1. Полупериоды равноугловых ступенчатых кривых до начала расширения ЦС:
а) СК3; б) СК4; в) СК4д; г) СК5д; д) СК6д; е) СК7; ж)СК8д

Также важным фактором является расчет действующего значения выходного напряжения инвертора. В общем случае [10]:

$$U_{вых} = \sqrt{U_0^2 + U_{m1}^2/2 + U_{m2}^2/2 + U_{m3}^2/2 + \ldots + U_{mN}^2/2}, \quad (27)$$

где U_0^2 – квадрат составляющей постоянного тока, $В^2$;

Um_1^2 ... U_{mN}^2 – квадраты амплитудных составляющих гармоник от 1 до N соответственно.

В условиях ступенчатых функций различного количества N, различной амплитуды U_N и различной угловой ширины ступенек (при расширении ЦС), применен метод изображения несинусоидальных напряжений (токов) с помощью разложения в ряды Фурье графоаналитическим методом.

Точность ГАМ зависит от количества разбиений аналитических промежутков Nразб. Каких-либо методик определения достаточного количества Nразб в научных источниках найдено не было. Поэтому количество Nразб рассчитывалось исходя из следующего условия: по пять разбиений нулевой ступеньки (U=0) с каждой стороны ступенчатой кривой в полупериоде. Что можно математически выразить следующим образом (для периода):

$$Nразб = 20 \cdot Nур, \quad (28)$$

где Nур – количество уровней напряжения с учетом ступеньки U=0 в полупериоде.

Полученные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчет количества разбиений Nразб для ступенчатых кривых

№ п/п	Вид кривой	Nур	Nразб
1	СК3	6	120
2	СК4	8	160
3	СК4д	8	160
4	СК5д	10	200
5	СК6д	12	240
6	СК7	14	280
7	СК8д	16	320

Примем номер конечной из рассматриваемых гармоник равной k=43 [9].

Учитывая изложенное, в том числе вид симметрии СК, система выражений для исследования ступенчатых кривых методом ГАМ при расширении ЦС будет иметь вид (при рассмотрения полупериода):

$$\begin{cases} B_k \approx \dfrac{4}{Nразб} \sum\limits_{p=1}^{\frac{n}{2}} U(\alpha_p) \cdot \sin(k \cdot \alpha_p), \\ C_k \approx \dfrac{4}{Nразб} \sum\limits_{p=1}^{\frac{n}{2}} U(\alpha_p) \cdot \cos(k \cdot \alpha_p), \\ U_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}, \\ k = \{1, 3, 5, 7 \ldots 43\}, \end{cases} \quad (29)$$

где k – номер гармоники;

B_k – амплитуда синусной составляющей k-й гармоники, В;

C_k – амплитуда косинусной составляющей k-й гармоники, В;

U_k – амплитуда k-й гармоники, В;

α – угловая координата, рад.

3. Результаты исследования ступенчатых кривых

Основные результаты исследования ступенчатых кривых приведены на рисунках 2, 3. Соотношение $\Delta\lambda = \Delta\nu$ показывает равенство ширины ЦС ($\Delta\lambda$) ширине каждой из остальных ступенек ($\Delta\nu$) – т.е. СК до расширения ЦС. Выражение $\Delta\lambda \approx 0{,}47 \cdot (T/2)$ определяет среднюю ширину ЦС каждой из СК, при которой получены наименьшие значения Ku. Графики $\delta U\%$ и $U_{ск}$ совпадают, поэтому в данной статье приводятся только зависимости $U_{ск}$ (на графиках обозначены Uвых).

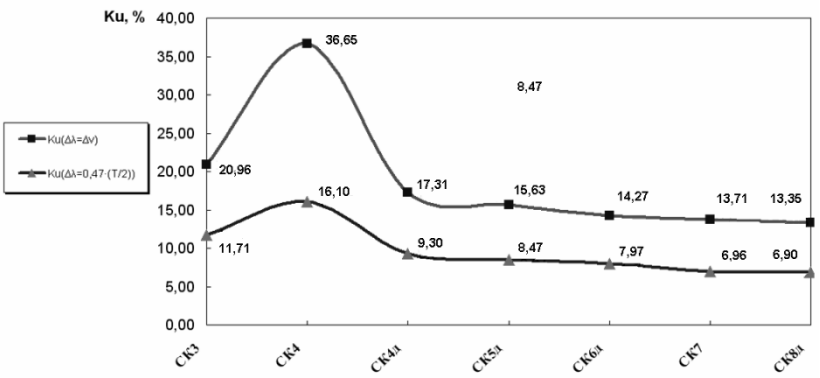

Рис. 2. График зависимостей $Ku(\Delta\lambda = \Delta\nu)$ и $Ku(\Delta\lambda \approx 0{,}47 \cdot (T/2))$ для различных СК

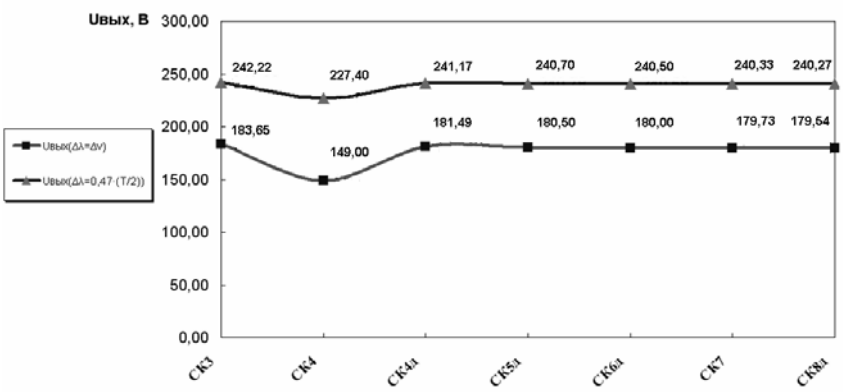

Рис. 3. График зависимостей $U_{вых}(\Delta\lambda = \Delta\nu)$ и $U_{вых}(\Delta\lambda \approx 0{,}47 \cdot (T/2))$ для различных СК

Учитывая полученные результаты, можно сделать следующие основные выводы:

1) при $\Delta\lambda \approx 0{,}47 \cdot (T/2)$ у всех СК наблюдается снижение Ku вплоть до 6,96% (СК7) и 6,90% (СК8д), что позволяет при формировании напряжения не использовать фильтр на выходе инвертора;

2) при L>6 и его дальнейшем повышении темпы уменьшения Ku снижаются (например, Ku(L=8)=0,99*Ku(L=7), Ku(L=7) = 0,87*Ku(L=6));

3) параметры СК7 и СК8д мало различаются между собой по параметрам уровня и качества напряжения; при $\Delta\lambda = \Delta\nu$ Kuск7=13,71%, Kuск8д=13,35% – различие в 2,62% относительно Kuск7, Uск7(100%Uном)=179,73 В, Uск8д(100%Uном)=179,54 В – различие в 0,105% относительно Uск7; при $\Delta\lambda \approx 0{,}47 \cdot (T/2)$ Kuск7=6,96%, Kuск8д=6,90% – различие в 0,86% относительно Kuск7; Uск7(100%Uном)=240,33 В, Uск8д(100%Uном)=240,27 В – различие в 0,025% относительно Uск7;

4) учитывая изложенное в предыдущих пунктах выводов, а также высокие требования СК8д к количеству первичных источников питания (необходимо количество источников более трех), СК7 выбрана для дальнейших исследований в части уточнения зави-

симостей $Ku(\Delta\lambda)$, $U_{вых}(\Delta\lambda)$, $\delta U_{у}\%(\Delta\lambda)$ и определения пределов стабилизации выходного напряжения методом ШИМ без выхода за пределы допустимых значений Ku [9].

4. Результаты уточненного исследования СК7

Для задачи уточненного исследования СК7 увеличим количество разбиений периода в ГАМ. Как уже отмечалось выше, рекомендаций по данному вопросу в литературных источниках найдено не было. В связи с изложенным увеличим точность исходя из следующего условия: 15 шагов расширения ЦС вместо 5. Для этого увеличим количество разбиений периода до Nразб=840. При этом $\Delta\alpha=\pi/420$, $\Delta\nu=\pi/14$, $\Delta\mu=\pi/210$, $k=\{1,3,5,7\ldots43\}$, где $\Delta\alpha$ – ширина одного разбиения ГАМ, $\Delta\nu$ – ширина ступенек до расширения ЦС, $\Delta\mu$ – величина уменьшения ширины каждой ступеньки, $\Delta\lambda$ – ширина ЦС.

Полученные результаты приведены на рисунках 4, 5.

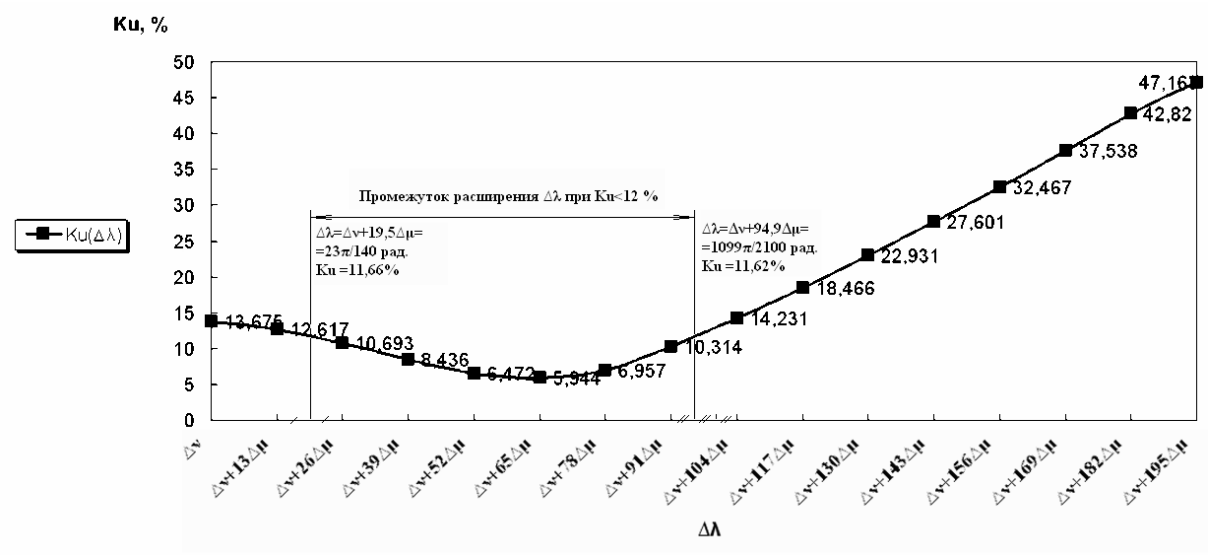

Рис. 4. Исследование зависимости $Ku(\Delta\lambda)$ СК7 при n=840, $\Delta\alpha=\pi/420$, $\Delta\nu=\pi/14$, $\Delta\mu=\pi/210$, $k=\{1,3,5,7\ldots43\}$. Показан промежуток расширения Δλ при Ku<12%

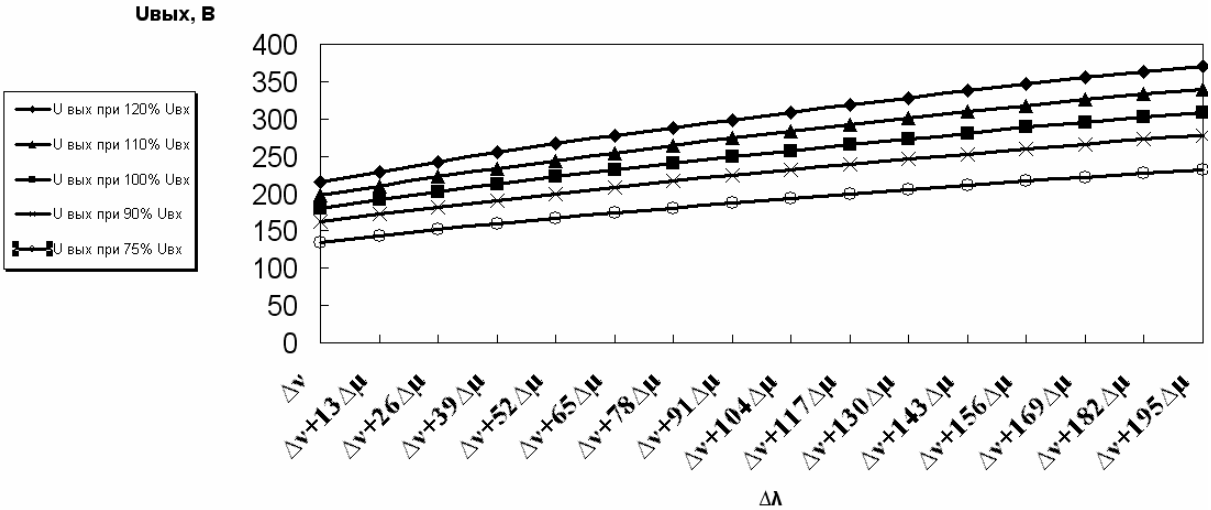

Рис. 5. Исследование зависимостей $U_{вых}(\Delta\lambda, U_{вх})$ СК7 при Nразб=840, $\Delta\alpha=\pi/420$, $\Delta\nu=\pi/14$, $\Delta\mu=\pi/210$, $k=\{1,3,5,7\ldots43\}$

Учитывая полученные результаты уточненных исследований СК7, можно сделать следующие основные выводы:

1) при $\Delta\lambda \in [23\pi/140$; 1099π/2100], Ku<12%, Ku(23π/140)=11,66%, Ku(1099π/2100)=11,62%;

2) при $\Delta\lambda \in [23\pi/140$; 1099π/2100], $U_{ск}(100\%U_{ном}) \in [196{,}59$ В; $251{,}83$ В]; то есть при расширении ЦС с ширины $23\pi/140$ по 1099π/2100 действующее значение напряжения увеличивается на 28,1%;

3) при дальнейшем увеличении ширины ЦС $\Delta\lambda$>1099π/2100 Ku∈(11,62%; 47,163%]; Uск($\Delta\lambda = \pi$)=308,543 В.

Исходя из изложенного, очевидно, что неравноугловое формирование СК имеет лучшие параметры как по качеству (Ku), так и по уровню ($U_{ск}, \delta U\%$) выходного напряжения относительно равноуглового; при этом должно выполняться условие для СК7 – начальная ширина СК равна $\Delta\lambda = 23\pi/140$ рад. Обозначим кривую с $\Delta\lambda = 23\pi/140$ рад. до начала стабилизации методом ШИМ как СК7у (ступенчатая кривая с семью уровнями напряжения уточненная).

Полупериод СК7у и ее гармонический ряд показаны на рисунках 6 и 7.

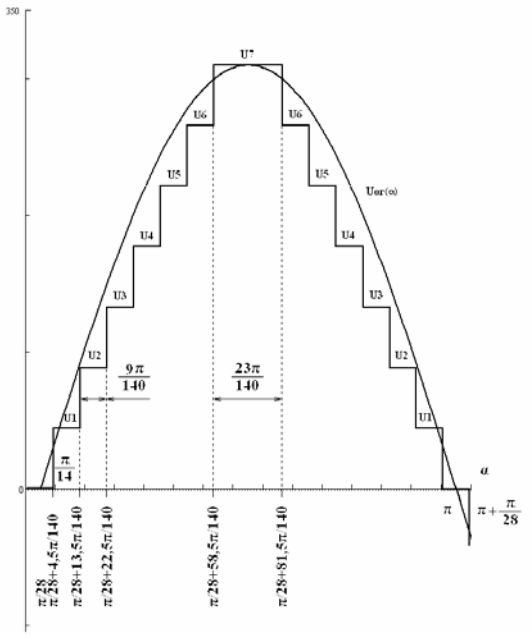

Рис. 6. Полупериод ступенчатой кривой СК7у. Одно малое деление графика соответствует π/140, большое деление π/14. Uог(α) – огибающая синусоидальная кривая

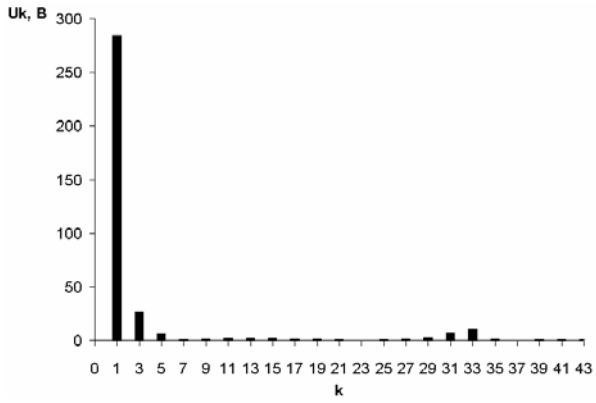

Рис. 7. Гармонический ряд СК7у

Основные выводы

1. Проведено исследование ступенчатых кривых от трех до восьми количества ступеней за четверть периода при расширении центральной ступеньки. При этом, до начала расширения центральной ступени, выбранные ступенчатые кривые являются равноугловыми и обладают симметрией относительно оси абсцисс.

2. При ширине центральной ступеньки, приближенно равной 47% полупериода, у исследуемых ступенчатых кривых наблюдается снижение Ku вплоть до Ku=6,96%.

3. При количестве ступеней более шести за четверть периода темпы уменьшения Ku снижаются.

4. Параметры СК7 и СК8д мало различаются между собой в части уровня и качества напряжения. В связи с этим СК7 была исследовано более уточненно с количеством разбиений на период равным 840.

5. Уточненное исследование СК7 показало, что на интервале расширения центральной ступеньки от $23\pi/140$ рад. до $1099\pi/2100$ рад. Ku изменяется от 11,66% до 11,62%, а действующее значение напряжения – от 196,59 В до 251,83 В, т.е. на 28,1%, что позволяет повышать напряжение без использования выходного фильтра. При расширении центральной ячейки большим, чем $1099\pi/2100$ рад., Ku>12%.

6. При ширине центральной ступеньки, равной π рад., Ku=47,163% и действующее значение напряжение равно 308,54 В, что превышает напряжение при ширине центральной ступеньки $1099\pi/2100$ рад. на 22,52%.

7. Учитывая изложенное, была разработана ступенчатая кривая с начальной шириной центральной ступеньки $23\pi/140$ рад., обозначенная как СК7у. Данная кривая принята в качестве основной при разработке инвертора ступенчатой модуляции [11].

Примечания:

1. Соболев С.А. Оптимизация управления ступенчато-модулированным инвертором на дискретных источниках энергии: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 1998. 143 с.
2. Заславец С.А. Развитие теории и принципы проектирования регулируемого асинхронного электропривода на базе ступенчатой модуляции: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2001. 145 с.
3. Кумаков Ю.А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. 2005. № 6 (36).
4. Анисимова Т.В., Данилина А.Н., Крючков В.В. Способы повышения качества выходного напряжения инверторов со ступенчатым выходным напряжением // Публикации, документы, материалы / Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет). 2012. Январь. URL: http://www.mai.ru/publications/index2.php?ELEMENT_ID=13363
5. Шавелкин А.А. Гибридный многоуровневый преобразователь частоты на базе четырехуровневого инвертора напряжения // ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. 2010. № 2. С. 43-49.

References:

1. Sobolev S.A. The optimization of control of step-modulated inverter on discrete energy sources: Dis. for the Cand. of Techn. Sciences degree. Krasnodar, 1998. 143 pp.
2. Zaslavets S.A. The development of the theory and principles of designing controlled by asynchronous electric drive based on step modulation: Dis. for the Cand. of Techn. Sciences degree. Krasnodar, 2001. 145 pp.
3. Kumakov Yu.A. The voltage inverters with step modulation and active filtration of higher harmonics // News of electrical engineering. 2005. No. 6 (36).
4. Anisimova T.V., Danilina A.N., Kryuchkov V.V. Ways of enhancement of the output voltage of inverters having a step output voltage // Publications, documents, materials / Moscow Aviation Institute (National Research University). 2012. January. URL: http://www.mai.ru/publications/index2.php?ELEMENT_ID=13363
5. Shavelkin A.A. The hybrid multilevel frequency converter based on the four-level voltage inverter // ELEKTROTEHNIKA. 2010. No. 2. P. 43-49.

6. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 43-46.

7. Колпаков А., Карташев Е. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 57-65.

8. Зиновьев Г.С., Лопаткин Н.Н., Скудин Д.В. Многоуровневый повышающий безтрансформаторный инвертор напряжения для высоковольтного электропривода // Электронный журнал факультета электроники НТУУ КПИ (Украина, г. Киев). 2011. Май. URL: http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/p/p_3.pdf

9. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2006. 32 с.

10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 10-е изд. М.: Гардарики, 2002. 638 с.

11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012618967 от 17.08.2012 г. «Программа управления формированием и стабилизацией выходного напряжения ступенчато-модулированного инвертора при начальной ширине центральной ступеньки 23pi/210 радиан (для микроконтроллеров)».

6. The multilevel autonomous inverters for electric drive and power industry / N. Donskoy, A. Ivanov, B. Matison, I. Ushakov // Power electronics. 2008. No. 1. P. 43-46.

7. Kolpakov A., Kartashev E. The algorithms of control of multilevel converters // Power Electronics. 2009. No. 2. P. 57-65.

8. Zinovyev G.S., Lopatkin N.N., Skudin D.V. Multilevel step-up non-transformer voltage inverter for high-voltage electric drive // Electronic Journal of the Faculty of Electronics of NTU KPI (Ukraine, Kiev). 2011. May. URL: http://fel.kpi.ua/ppedisc/doc/p/p_3.pdf

9. GOST 13109-97 «The standards of the quality of the electric energy supply systems of general purpose». M.: Standartinform, 2006. 32 pp.

10. Bessonov L.A. Theory of Electrical Engineering. Electrical circuits: a textbook. 10th ed. M.: Gardariki, 2002. 638 pp.

11. The certificate of official registration of computer program No. 2012618967 of 17.08.2012. «The program of control of formation and stabilization of the output voltage of the step-modulated inverter with an initial width of the center step of 23pi/210 radians (for microcontrollers)».