

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-102-109
УДК 621.314.26.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ГАРМОНИК ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ АИН ПРИ ГИТСРЕЗЕИСНОМ УПРАВЛЕНИИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

TOTAL HARMONIC DISTORTION OF VSI WITH HYSTERESIS VOLTAGE CONTROL

Колмаков Николай Михайлович¹,
аспирант, e-mail: kolmakov_5@list.ru
Kolmakov Nikolay M.¹, postgraduate
Баховцев Игорь Анатольевич²,
доцент, e-mail: igor_55@ngs.ru
Bakhovtsev Igor A.², Associate Professor

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30

¹National Research Tomsk Polytechnic University, pr. Lenina, 30, 634050, Tomsk, Russia

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

²Novosibirsk State Technical University, 20, pr. K. Marksa, 630073, Novosibirsk, Russia

Аннотация. В управлении автономными инверторами напряжения (АИН) широкое распространение получили системы автоматического управления. Одним из представителей таких устройств является система гистерезисного управления (ГУ), которая осуществляет точное воспроизведение управляющего воздействия на выходе в виде соответствующих изменений регулируемой величины. Однако использование АИН с гистерезисным управлением по напряжению рассмотрено довольно слабо как в зарубежной, так и отечественной технической литературе. В существующих статьях в основном приводятся только описания алгоритмов управления, способ их реализации в то время как целый ряд вопросов касающихся гистерезисного управления с обратной связью по напряжению применительно к автономным инверторам напряжения не нашли еще своего решения. В данной статье приведен процесс получения выражений для коэффициентов гармоник выходного напряжения и тока в зависимости от параметров нагрузки и фильтра АИН с гистерезисным управлением по напряжению. Также рассмотрен интегральный коэффициент гармоник напряжения, представлены аналитические зависимости для данного коэффициента, полученные численным путем. Расчеты могут быть использованы для оценки качества выходной энергии АИН с гистерезисным управлением по напряжению.

Abstract. In the control of voltage source inverters, automatic control systems became widespread. One of the representatives of such control systems is a hysteresis control which is based on a nonlinear feedback loop with hysteresis comparators. However, the application of voltage source inverter with hysteresis voltage control is not considered enough in foreign and Russian technical literature. These papers provide only the description of control algorithms, implementation methods, while many issues remain unresolved. This paper presents total current harmonic distortion and total voltage harmonic distortion of voltage source inverter with hysteresis voltage control depending on the load and output filter parameters. Weighted total harmonic distortion was considered too. Analytical equations for this coefficient are presented. Computations can be used to estimate the output energy quality of voltage source inverter with hysteresis voltage control.

Ключевые слова: Гистерезисное управление по напряжению, трехфазный автономный инвертор напряжения, система электроснабжения, коэффициент гармоник, интегральный коэффициент гармоник.

Keywords: Hysteresis voltage control, three-phase voltage source inverter, electrical power supply system, total harmonic distortion, weighted total harmonic distortion.

Характеристики полупроводниковых преобразователей, в частности у автономных инверторов напряжения (АИН), помимо топологии, напрямую зависят от способа управления. В настоящее время

доминирующим принципом управления полупроводниковыми преобразователями является широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [1, 2, 3]. В АИН ШИМ позволяет формировать на выходе кривую напряжения, состоящую из модулированных

по длительности импульсов, в течение которых и происходит передача энергии от источника к нагрузке. К следящим методам управления АИН с ШИМ в частности относится гистерезисное управление, также формирующее на выходе импульсное напряжение с обеспечением слежения, или за выходным током, или и за выходным напряжением.

Классический вариант построения гистерезисного управления подразумевает слежение за фазным током АИН, работающим на двигатель переменного тока, позволяя формировать близкую к синусоиде форму. Однако в системах электроснабжения, где требуется работа на холостом ходу и быстрая компенсации скачков напряжения, которые могут возникать, например, при коммутации нагрузки, предпочтительней использовать гистерезисное управление по напряжению [4].

Использование АИН с гистерезисным управлением по напряжению рассмотрено довольно слабо как в зарубежной, так и отечественной технической литературе. Тем более в системах централизованного и автономного электроснабжения, которые имеют свои особенности и предъявляемые к ним требования [5, 6, 7]. Существующие публикации рассматривают вопросы реализации и анализа, в частности энергетических характеристик [8, 9, 10]. Однако анализ чаще всего проводится с использованием компьютерного моделирования. При этом вопрос теоретического анализа энергетических показателей качества преобразования электрической энергии изучен мало. Настоящая статья посвящена попытке восполнить указанный пробел, и направлена на получение аналитических выражений для

выходных энергетических характеристик трехфазного двухуровневого АИН с гистерезисным управлением по напряжению. Для АИН такими показателями являются коэффициент гармоник выходного тока, коэффициент гармоник выходного напряжения.

Вывод выражений для энергетических показателей качества преобразования электрической энергии трехфазного двухуровневого АИН (рис. 1) с гистерезисным управлением по напряжению проводится на основе типовой топологии выходной цепи: LC -фильтр и RL -нагрузка, соединенная в звезду с нулевым проводом, которая является наиболее характерной для систем генерирования электрической энергии [11].

Введем традиционные допущения. Будем считать, что источники входного постоянного напряжения идеальны, сбалансированы относительно средней точки источников питания (N), ключи идеальные, коммутация ключей мгновенная, АИН работает в линейной зоне регулирования выходного напряжения и тока. Частота коммутации вентиляй высокая.

Отметим, что при использовании гистерезисного управления по напряжению измерение напряжения на выходе АИН целесообразно осуществлять датчиком напряжения (ДН), который подключается между фазным выводом АИН и средней точкой двух сбалансированных источников питания (рис. 1), что обеспечит независимость управления от характера нагрузки, а также возможность работы АИН на холостом ходу.

Оценить энергетические показатели качества преобразования электрической энергии АИН

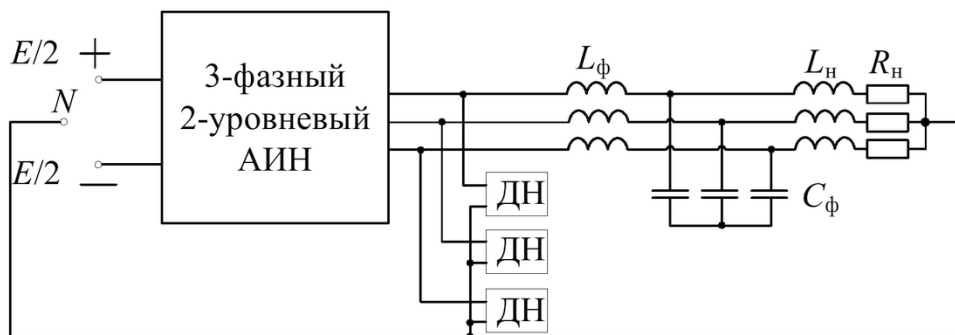


Рис. 1 Трехфазный двухуровневый АИН
 Fig. 1. Three-phase two level voltage source inverter

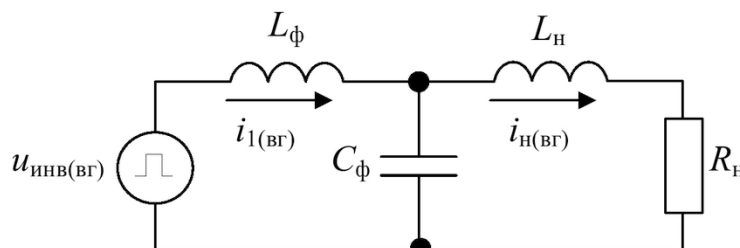


Рис. 2. Схема замещения по высшим гармоникам
 Fig. 2. Scheme for higher harmonics

можно с помощью коэффициента гармоник выходного тока и напряжения на нагрузке [12]. Для расчета и анализа данных показателей был выбран метод алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ), являющийся основой прямых методов расчета энергетических показателей вентильных преобразователей [13, 14]. Прямой метод расчета АИН не требует ни нахождения мгновенных значений тока, ни нахождения его спектра. Данный метод позволяет получить выражения для энергетических показателей напрямую через коэффициенты дифференциального уравнения и набор интегральных коэффициентов гармоник напряжения [14].

Процедура АДУ начинается с составления эквивалентной схемы замещения. Согласно прямым методам потребуется отдельный расчет действующего значения высших гармоник в нагрузке и значение первой гармоники. Составим схему замещения для расчета выходного тока по высшим гармоникам (рис. 2).

Система дифференциальных уравнений по закону Кирхгофа, описывающая данную схему.

$$L_{\phi} \frac{di_{1(\text{вг})}}{dt} + u_c = u_{\text{инв(вг)}} \quad (1)$$

$$L_n \frac{di_{n(\text{вг})}}{dt} + i_{n(\text{вг})} R_n = u_c \quad (2)$$

$$i_{1(\text{вг})} = C_{\phi} \frac{du_c}{dt} + i_{n(\text{вг})} \quad (3)$$

Сводим три уравнения первого порядка к одному уравнению третьего порядка. Для этого продифференцируем (2) два раза.

$$L_n \frac{d^3 i_{n(\text{вг})}}{dt^3} + R_n \frac{d^2 i_{n(\text{вг})}}{dt^2} - \frac{d^2 u_c}{dt^2} = 0 \quad (4)$$

Продифференцируем (3).

$$C_{\phi} \frac{d^2 u_c}{dt^2} = \frac{di_{1(\text{вг})}}{dt} - \frac{di_{n(\text{вг})}}{dt} \quad (5)$$

Подставим (5) в (4).

$$L_n \frac{d^3 i_{n(\text{вг})}}{dt^3} + R_n \frac{d^2 i_{n(\text{вг})}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\phi}} \left(\frac{di_{1(\text{вг})}}{dt} - \frac{di_{n(\text{вг})}}{dt} \right) = 0 \quad (6)$$

Подставим u_c из (2) в (1).

$$\frac{di_{1(\text{вг})}}{dt} = \frac{1}{L_{\phi}} \left(u_{\text{инв(вг)}} - L_n \frac{di_{n(\text{вг})}}{dt} - i_{n(\text{вг})} R_n \right) \quad (7)$$

Подставим (7) в (6) и получим выражение

$$L_n \frac{d^3 i_{n(\text{вг})}}{dt^3} + R_n \frac{d^2 i_{n(\text{вг})}}{dt^2} + \left(\frac{L_n}{L_{\phi} C_{\phi}} + \frac{1}{C_{\phi}} \right) \frac{di_{n(\text{вг})}}{dt} + \frac{i_{n(\text{вг})} R_n}{L_{\phi} C_{\phi}} = \frac{1}{L_{\phi} C_{\phi}} u_{\text{инв(вг)}} \quad (8)$$

Сделаем замену переменных.

$$a_3 = L_n; a_2 = R_n; a_1 = \frac{L_n}{L_{\phi} C_{\phi}} + \frac{1}{C_{\phi}} = \frac{L_n + L_{\phi}}{L_{\phi} C_{\phi}};$$

$$a_0 = \frac{L_n}{L_{\phi} C_{\phi}}; b_0 = \frac{1}{L_{\phi} C_{\phi}}.$$

Трижды проинтегрируем (8) и получим интегральное уравнение третьего порядка

$$a_3 \bar{i}_{n(\text{вг})} + a_2 \bar{i}_{n(\text{вг})}^{(2)} + a_1 \bar{i}_{n(\text{вг})}^{(2)} + a_0 \bar{i}_{n(\text{вг})}^{(3)} = b_0 \bar{u}_{\text{инв(вг)}}^{(3)} \quad (9)$$

где $\bar{i}_{n(\text{вг})}$, $\bar{i}_{n(\text{вг})}^{(2)}$, $\bar{i}_{n(\text{вг})}^{(3)}$ - интегралы тока первого, второго и третьего порядков. При использовании ШИМ способа управления и большой кратности данными интегралами обычно пренебрегают [12, 14]. Согласно принятым ранее допущениям, что частота коммутации вентилей АИН при гистерезисном управлении высока, то мы так же можем пренебречь данными интегралами. С учетом данного допущения выражение (9) примет вид (10).

$$a_3 \bar{i}_{n(\text{вг})} = b_0 \bar{u}_{\text{инв(вг)}}^{(3)} \quad (10)$$

Алгебраизируем выражение (10) по методу АДУ [14]. Возводим обе части уравнения в квадрат и интегрируем за период. Таким образом, переходим от мгновенных значений к действующим

$$a_3^2 \frac{1}{T} \int_0^T i_{n(\text{вг})}^2 dt = b_0^2 \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{u}_{\text{инв(вг)}}^{(3)})^2 dt \quad (11)$$

После алгебраизации (11) запишем в действующих значениях ток нагрузки от высших составляющих. Вынесем из квадрата действующее значение тока нагрузки.

$$I_{n(\text{вг})} = \frac{b_0 \bar{U}_{\text{инв(вг)}}^{(3)}}{a_3} \quad (12)$$

Интеграл третьего порядка от действующего значения выходного напряжения может быть выражен через интегральный коэффициент гармоник третьего порядка [14]:

$$\bar{U}_{\text{инв(вг)}}^{(3)} = K_{\text{ГН}}^{(3)} \frac{U_{\text{инв(1)}}}{\omega^3} \quad (13)$$

где $K_{\text{ГН}}^{(3)}$ - интегральный коэффициент гармоник напряжения третьего порядка;

$U_{\text{инв(1)}}$ - действующее значение первой гармоники выходного напряжения АИН.

Подставим выражение (13) в (12):

$$I_{n(\text{вг})} = \frac{K_{\text{ГН}}^{(3)} U_{\text{инв(1)}}}{L_{\phi} C_{\phi} L_n \omega^3} \quad (14)$$

Далее рассчитаем действующее значение первой гармоники тока в нагрузке. Схема замещения (рис. 3) примет вид в котором индуктивность представлена суммой индуктивностей L_{ϕ} и L_n , а первой гармоникой тока в емкости C_{ϕ} можно пренебречь.

Схема замещения по первой гармонике тока описывается дифференциальным уравнением (15).

$$(L_\phi + L_n) \frac{di_{н(1)}}{dt} + i_{н(1)} R_n - u_{инв(1)} = 0 \quad (15)$$

Дважды проинтегрируем (15) и получим интегральное уравнение второго порядка. После алгебраизации получим выражение (16) для действующих значений.

$$(L_\phi + L_n)^2 I_{н(1)}^2 + \bar{I}_{н(1)}^2 R_n^2 = \bar{U}_{инв(1)}^2 \quad (16)$$

Интегралы от действующих значений тока и напряжения.

$$\bar{I}_{н(1)} = \frac{I_{н(1)}}{\omega}; \quad \bar{U}_{инв(1)} = \frac{U_{инв(1)}}{\omega} \quad (17)$$

Подставив (17) в (16) выразим действующее значение тока первой гармоники

$$I_{н(1)} = \frac{U_{инв(1)}}{\sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}} \quad (18)$$

Выражение для коэффициента гармоник тока можно записать

$$K_{ГТ} = \frac{I_{н(вг)}}{I_{н(1)}} = \frac{K_{ГТ}^{(3)} \sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}}{L_\phi C_\phi L_n \omega^3} \quad (19)$$

Для расчета коэффициента гармоник выходного напряжения использовалась рассмотренная ранее схема замещения (рис. 2). Система уравнений по закону Кирхгофа, описывается выражениями (1) – (3). Подставим выражение (2) в (1) и продифференцируем выражение (3). Таким образом, получим новую систему уравнений.

$$L_\phi \frac{di_{1(вг)}}{dt} + L_n \frac{di_{н(вг)}}{dt} + i_{н(вг)} R_n = u_{инв(вг)} \quad (20)$$

$$\frac{di_{1(вг)}}{dt} = C_\phi \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{di_{н(вг)}}{dt} \quad (21)$$

Подставим выражение (21) в (20). Раскроем скобки и получим выражение (22) для нахождения напряжения.

$$L_\phi C_\phi \frac{d^2 u_c}{dt^2} = u_{инв(вг)} - \quad (22)$$

$$-L_\phi \frac{di_{н(вг)}}{dt} - L_n \frac{di_{н(вг)}}{dt} - i_{н(вг)} R_n$$

Дважды проинтегрируем (22) и получим интегральное уравнение второго порядка

$$L_\phi C_\phi U_c = \bar{u}_{инв(вг)}^{(2)} - (L_\phi + L_n) \bar{i}_{н(вг)}^{(2)} - R_n \bar{i}_{н(вг)}^{(2)} \quad (23)$$

где $\bar{i}_{н(вг)}^{(1)}, \bar{i}_{н(вг)}^{(2)}$ - интегралы тока первого и второго порядков. Согласно принятым ранее допущениям мы можем пренебречь данными интегралами [12, 14].

$$L_\phi C_\phi U_c = \bar{u}_{инв(вг)}^{(2)} \quad (24)$$

Алгебраизируем выражение (24) по методу АДУ [14]. Возводим обе части уравнения в квадрат и интегрируем за период. Таким образом, переходим от мгновенных значений к действующим.

$$L_\phi C_\phi U_c = \bar{U}_{инв(вг)}^{(2)} \quad (25)$$

Интеграл второго порядка от действующего значения выходного напряжения может быть выражен через интегральный коэффициент гармоник второго порядка [14]:

$$K_{ГН}^{(2)} = \frac{\bar{U}_{инв(вг)}^{(2)} \cdot \omega^2}{U_{инв(1)}} \quad (26)$$

где $K_{ГН}^{(2)}$ - интегральный коэффициент гармоник напряжения второго порядка.

Напряжение высших гармоник на выходе АИН:

$$U_{c(вг)} = \frac{U_{инв(1)} \cdot K_{ГН}^{(2)}}{L_\phi C_\phi \cdot \omega^2} \quad (27)$$

Выражение для первой гармоники напряжения на выходе АИН выразим из выражения первой гармоники тока (18). Для этого умножим данное выражение на $|Z_n|$:

$$U_{c(1)} = I_{н(1)} \cdot \sqrt{(L_n \omega)^2 + R_n^2} = \frac{U_{инв(1)} \sqrt{(L_n \omega)^2 + R_n^2}}{\sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}} \quad (28)$$

Выражение для коэффициента гармоник выходного напряжения с LC фильтром на выходе АИН:

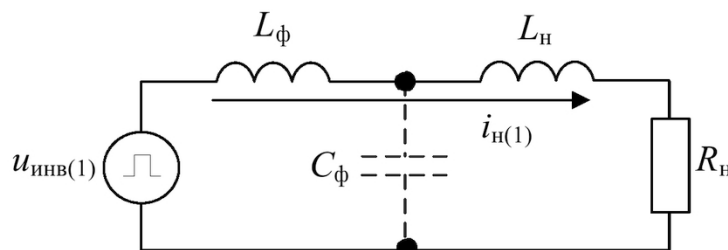


Рис. 3. Схема замещения по первой гармонике
 Fig. 3. Scheme for the first harmonic

Таблица 1. Выражения для коэффициента гармоник тока и напряжения

Table 1. Equations for the current and voltage THD

	$\omega L_n \approx R_n$	$\omega L_n \square R_n$
$K_{ГТ}$	$\frac{K_{ГТ}^{(3)} \sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}}{L_\phi C_\phi L_n \omega^3}$	$\frac{K_{ГТ}^{(3)} (L_\phi + L_n)}{L_\phi C_\phi L_n \omega^2}$
$K_{ГН}$	$\frac{K_{ГН}^{(2)}}{L_\phi C_\phi \cdot \omega^2} \frac{\sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}}{\sqrt{(L_n \omega)^2 + R_n^2}}$	$\frac{K_{ГН}^{(2)} (L_\phi + L_n)}{L_\phi C_\phi L_n \omega^2}$

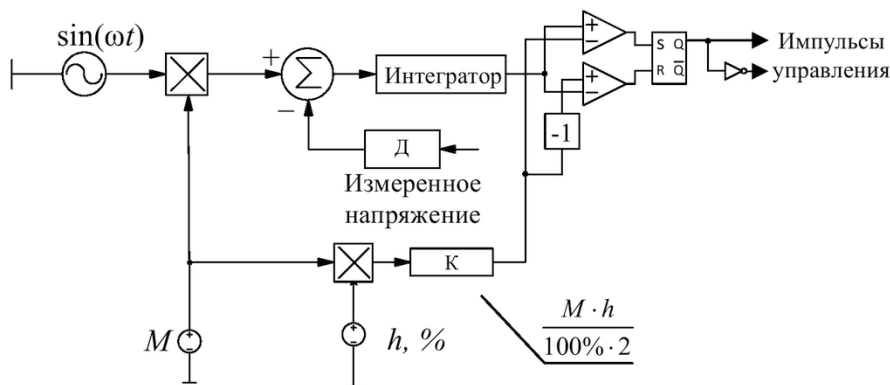


Рис. 4. Блок-схема системы управления (фаза А)
Fig. 4. A block diagram of the control system (phase A)

$$K_{ГН} = \frac{U_{c(вр)}}{U_{c(1)}} = \frac{K_{ГН}^{(2)}}{L_\phi C_\phi \cdot \omega^2} \frac{\sqrt{(L_\phi + L_n)^2 \omega^2 + R_n^2}}{\sqrt{(L_n \omega)^2 + R_n^2}} \quad (29)$$

Полученные коэффициенты гармоник напряжения и тока приведены в табл. 1. Там же приведены более простые соотношения для случая $\omega L_n \square R_n$. Как видно из полученных выражений, коэффициент гармоник тока и напряжения зависят не только от параметров фильтра и нагрузки, но и от интегральных коэффициентов гармоник напряжения (ИКГН) АИН. Поскольку ИКГН учитывает число высших гармоник и положение их в спектре, то он получается путем расширения понятия традиционного коэффициента гармоник напряжения. Последний показывает только число (долю) высших гармоник по отношению к основной и не говорит о распределении гармоник в частотном диапазоне спектра напряжения, в частности об их близости к основной составляющей.

Интегральный коэффициент гармоника q -го порядка определяется выражением [14]:

$$K_{ГН}^{(q)} = \sqrt{\sum_{n=2} \left(\frac{U_{(n)}}{n^q U_{(1)}} \right)^2} \quad (30)$$

где q – порядок интегрального коэффициента гармоник; n – номер гармоники.

Поскольку аналитически вывести выражение для расчета интегрального коэффициента гармоник q -го порядка достаточно трудно, тем более для гистерезисного управления, то для получения зависимостей воспользуемся компьютерной моделью, которая позволяет получить искомые коэффициенты с использованием компьютерного спектра напряжения, полученного в результате моделирования. Схема трехфазного двухуровневого АИН и системы гистерезисного управления по напряжению созданы в программном пакете *PowerSIM* (версии 9.0) [15]. Блок-схема системы управления приведена на (рис. 4). Параметры компьютерной модели: входное напряжение 100 В, ширина канала

Таблица 2. Интегральный коэффициент гармоник

Table 2. Weighted total harmonic distortion

$K_{ГН}^{(1)}$	$-0,0194 \cdot M^4 + 0,0421 \cdot M^3 - 0,0306 \cdot M^2 + 0,0077 \cdot M + 0,0129$
$K_{ГН}^{(2)}$	$-0,0056 \cdot M^4 + 0,023 \cdot M^3 - 0,0271 \cdot M^2 + 0,0121 \cdot M + 0,0013$
$K_{ГН}^{(3)}$	$-0,0069 \cdot M^4 + 0,0195 \cdot M^3 - 0,0188 \cdot M^2 + 0,0074 \cdot M + 0,0008$

M - глубина модуляции

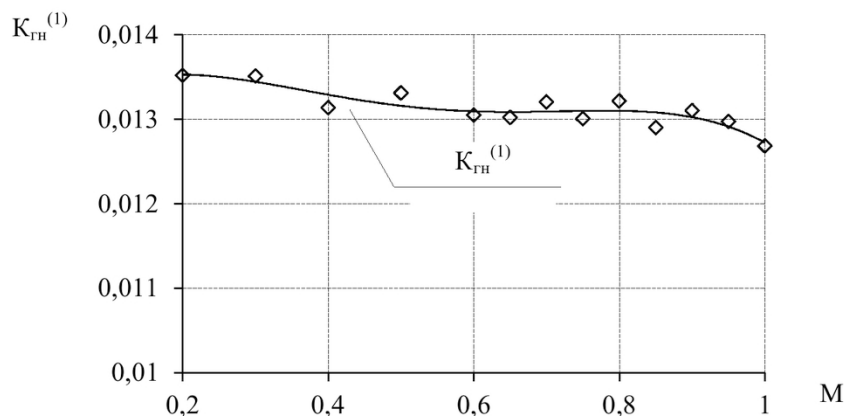


Рис. 5. Интегральный коэффициент гармоник напряжения первого порядка 3-Ф 2-У АИН с RL нагрузкой (с нулевым проводом)

Fig. 5. Weighted total harmonic distortion of three phase two level voltage source inverter with RL load (with neutral wire)

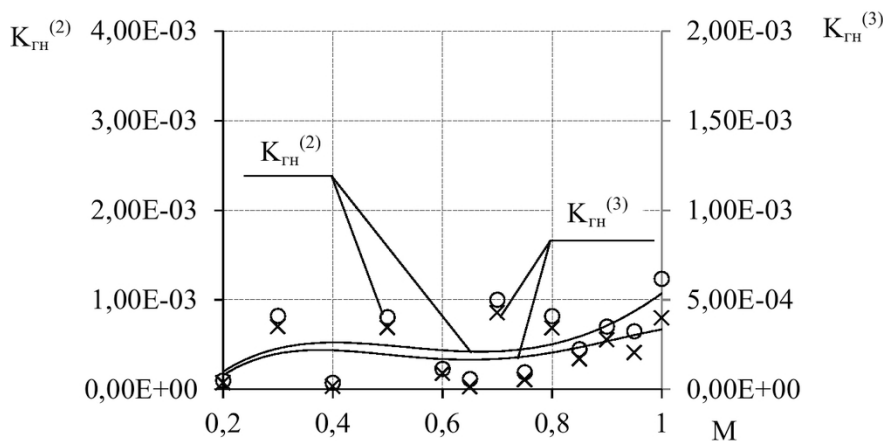


Рис. 6. Интегральный коэффициент гармоник напряжения второго и третьего порядка 3-Ф 2-У АИН с RL нагрузкой (с нулевым проводом)

Fig. 6. Weighted total harmonic distortion of second and third order expression of three phase two level voltage source inverter with RL load (with neutral wire)

гистерезиса (h) составляет 5% от половины входного напряжения, $R_n=0,9$ Ом, $L_n=1390$ мкГн, $\cos(\varphi)=0,9$, $|Z_n|=1$ Ом, $C_\Phi=640$ мкФ, $L_\Phi=32$ мкГн.

На рис. 5 и 6 приведены рассчитанные по выражению (30) кривые интегрального коэффициента гармоник первого, второго и третьего порядка (соответственно) трехфазного двухуровневого АИН при RL нагрузке (с приведенными выше параметрами) и ширине канала гистерезиса $H^*=5\%$. При этом независимым параметром являлась глубина модуляции (M), которая определялась отношением заданной амплитуды первой гармоники выходного напряжения к ее максимальному значению, при котором еще сохраняется линейность регулировочной характеристики [15].

Получение аналитических соотношений для расчета интегральных коэффициентов гармоник затруднено в силу сложности реализации математической модели гистерезисного управления. Однако знание подобных зависимостей позволило бы приблизительно оценить качество напряжения в нагрузке. Поэтому данные зависимости были получены в результате анализа полученных графиков в

Excel и аналитически представлены в табл. 2.

Заключение.

В работе с использованием прямых методов расчета был проведен теоретический анализ показателей качества энергии в RL-нагрузке АИН с гистерезисным управлением по напряжению и выходным LC-фильтром.

Однако полученные коэффициенты гармоник напряжения и тока нагрузки от глубины модуляции требуют знания соответствующих интегральных коэффициентов гармоник выходного напряжения АИН 2-го и 3-го порядков, которые получить аналитически довольно трудно. Требуемые значения были получены в результате компьютерного моделирования, аналитического расчета и аппроксимации графиков в программе Excel.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки качества выходной энергии в системах централизованного и автономного электропитания с применением АИН с гистерезисным управлением по напряжению.

Работа проведена при финансовой поддержке

Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии N 14.577.21.0198, уникальный идентификатор ПНИЭР - RFMEFI57715X0198).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титяев Д.К. Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции / Д.К. Титяев, Д.Н. Мирошник // Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих. – 2004. – С. 301–306.
2. Mohseni M. A new vector based hysteresis current control scheme for three-phase PWM voltage source inverters / M.A. Mohseni, S.M. Islam // IEEE Trans. on Power El. – 2010. – Vol. 25, No. 9. – P. 2299–2309.
3. Gawande S.P. Current controlled PWM for multilevel voltage source inverters with variable and constant switching frequency regulation techniques: a review / S.P. Gawande, M.R. Ramteke // Journal of Power Electronics. – 2014. – Vol. 14, No. 2. – P. 302–314.
4. Koolaiyan A.A. A voltage sag compensation utilizing autotransformer switched by hysteresis voltage control / A.A. Koolaiyan, A. Sheikholeslami, R.A. Kordkheil // 5th International conference on electrical and computer engineering ICECE. – 2008. – Dhaka. – P. 245–550.
5. Олещук В.И. Вентильные преобразователи с замкнутыми контурами управления / В.И. Олещук, Е.Е. Чаплыгин. // Кишинев: Штиница, 1982. – 196 с.
6. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
7. Suul J.A. Synchronous reference frame hysteresis current control for grid converter applications / J.A. Suul, T. Midsund, T. Undeland // IEEE Trans. on industry applications. – 2011. – Vol. 47, No. 5. – P. 2183–2194.
8. Davoodnezhad R. A Novel three level hysteresis current regulation strategy for three phase three level inverters / R. Davoodnezhad, D.G. Holmes, B.P. McGrath // IEEE Trans. on power electron. – 2013. – Vol. 29, No. 11. – P. 6100–6109.
9. Kosmák J. Power quality dependence on connected appliances in an off-grid system / J. Kosmák, S. Mišák, L. Prokop // 16-th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, 2015. – Kouty nad Desnou, Czech Republic. – P. 423–428.
10. Шурыгин Ю.А. Инвертор напряжения с принудительным формированием заданной формы тока / Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – С. 310–313.
11. Грабовецкий Г.В. Несимметричная нагрузка в системах генерирования электрической энергии с инвертором напряжения / Г.В. Грабовецкий, Д.В. Коробков, С.А. Харитонов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25). – С. 147–152.
12. Дыбко М.А. Анализ энергетических показателей четырехуровневого инвертора напряжения / М.А. Дыбко, С.В. Брованов // Технічна електродинаміка. Тематический выпуск. (Київ). – 2009. – Ч. 3. – С. 27–32.
13. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1990 – 220 с.
14. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Учебное пособие. – Изд.3-е, испр. и доп. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
15. Колмаков Н.М. Анализ гистерезисного управления по напряжению автономного инвертора напряжения / Н.М. Колмаков, И.А. Баховцев, А.Г. Гарганеев // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 2 (19). – С. 84–89.

REFERENCES

1. Titjaev D.K. Sravnitelnyj analiz vektornoj i tradicionnoj shirotno-impulsnoj moduljacii [Comparative analysis of vector and traditional pulse width modulation] / D.K. Titjaev, D.N. Miroshnik // Avtomatizacija tehnologichnih obektiv procesiv. Poshuk molodih. – 2004. – P. 301–306 (Rus.).
2. Mohseni M. A new vector based hysteresis current control scheme for three-phase PWM voltage source inverters / M.A. Mohseni, S.M. Islam // IEEE Trans. on Power El. – 2010. – Vol. 25, No. 9. – P. 2299–2309.
3. Gawande S.P. Current controlled PWM for multilevel voltage source inverters with variable and constant switching frequency regulation techniques: a review / S.P. Gawande, M.R. Ramteke // Journal of Power Electronics. – 2014. – Vol. 14, No. 2. – P. 302–314.
4. Koolaiyan A.A. A voltage sag compensation utilizing autotransformer switched by hysteresis voltage control / A.A. Koolaiyan, A. Sheikholeslami, R.A. Kordkheil // 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE. – 2008. – Dhaka. – P. 245–550.

5. Oleshuk V.I. Ventilnye preobrazovateli s zamknutymi konturami upravlenija [The converter with closed control loop] / V.I. Oleshuk, E.E. Chaplygin // Kishinev: Shtinicab 1982. – 196 p. (Rus.).
6. GOST 13109-97. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektronsnabzhenija obshhego naznachenija. [Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems] (Rus.).
7. Suul J.A. Synchronous reference frame hysteresis current control for grid converter applications / J.A. Suul, T. Midsund, T. Undeland // IEEE Trans. on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, No. 5. – P. 2183–2194.
8. Davoodnezhad R. A novel three level hysteresis current regulation strategy for three-phase three level inverters / R. Davoodnezhad, D.G. Holmes, B.P. McGrath // IEEE Trans. on Power Electron. – 2013. – Vol. 29, No. 11. – P. 6100–6109.
9. Kosmák J. Power quality dependence on connected appliances in an off-grid system / J. Kosmák, S. Mišák, L. Prokop // 16-th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2015), 2015. – Kouty nad Desnou, Czech Republic. – P. 423–428.
10. Shurygin Ju.A. Invertor naprjazhenija s prinuditelnyim formirovaniem zadannoj formy toka [VSI with forced generation of a given current form] / Ju.A. Shurygin, Ju.A. Shinjakov // Doklady TUSUR. – 2011. – № 2 (24). – P. 310–313. (Rus.).
11. Graboveckij G.V. Nesimmetrichnaja nagruzka v sistemah generirovanija jelektricheskij jenerгии s invertorom naprjazhenija [Unbalanced load in power generation systems with a voltage inverter] / G.V. Graboveckij, D.V. Korobkov, S.A. Haritonov // Reports of TUSUR. – 2012. – № 1 (25). – P. 147–152. (Rus.).
12. Dybko M.A. Analiz jenergeticheskikh pokazatelej chetyrehurovneвого invertora naprjazhenija [Analysis of the energy performance of a four-level voltage inverter] / M.A. Dybko, S.V. Brovanov // Tehnichna elektrodinamika. Tematicheskij vypusk. (Kiïv). – 2009. – Ch. 3. – P. 27–32. (Rus.).
13. Zinoviev G.S. Prjamyje metody rascheta jenergeticheskikh pokazatelej ventilnyh preobrazovatelej [Direct methods for calculating the energy values of converters]. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 1990 – 220 p. (Rus.).
14. Zinoviev G.S. Osnovy silovoj jelektroniki. Uchebnoe posobie [Fundamentals of power electronics: textbook] / G.S. Zinoviev. – Novosibirsk: NSTU, 2004. – 672 p. (Rus.).
15. Kolmakov N.M. Analiz gisterezisnogo upravlenija po naprjazheniju avtonomnogo invertora naprjazhenija [Analysis of hysteresis voltage control for the voltage source inverter] / N.M. Kolmakov, I.A. Bahovcev, A.G. Garganeev // Doklady TUSUR. – 2016. – № 2 (19). – P. 84–89 (Rus.).

Поступило в редакцию 13 июня 2017
Received 13 June 2017