

УДК 621.314.5

В. А. МАКАРОВ**АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В АВТОНОМНОМ ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ С LC-ФИЛЬТРОМ И СИНУСОИДАЛЬНОЙ ШИМ ПРИ РАБОТЕ НА НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ**

Сейчас значительное внимание уделяется повышению качества электрической энергии. Проблема влияния высших гармоник одна из важных частей проблемы электромагнитной совместимости потребителей электроэнергии с питающей электрической сетью. Актуальными остаются вопросы анализа потерь в автономных инверторах напряжения при работе их на нелинейную нагрузку. Целью статьи является определение потерь в ключах инвертора напряжения с синусоидальной ШИМ при работе на нелинейную нагрузку. Ток коммутируемый ключами инвертора отличается от синусоидального. Определены составляющие этого тока, который состоит из тока нагрузки и тока протекающего в конденсатор, который раскладывается на ток первой гармоники и ток высших гармоник. Найдено действующее значение тока через ключ инвертора. Произведен расчет потерь в силовых ключах автономного инвертора напряжения, определен действующий ток, протекающий в ключе, получено выражение для определения мощности потерь на включение и статических потерь в ключах автономного инвертора напряжения с LC-фильтром и синусоидальной ШИМ. В результате анализа определен диапазон частот ШИМ при котором достигается минимум потерь. Даны рекомендации по выбору частоты синусоидальной ШИМ автономного инвертора напряжения при работе на нелинейную нагрузку.

Ключевые слова: мощность потерь, качество электрической энергии, электромагнитная совместимость, нелинейная нагрузка, ШИМ, автономный инвертор напряжения.

В. О. МАКАРОВ**АНАЛІЗ ВТРАТ В АВТОНОМНОМУ ІНВЕРТОРІ НАПРУГИ С LC-ФІЛЬТРОМ І СИНУСОЇДАЛЬНОЮ ШІМ ПРИ РОБОТІ НА НЕЛІНІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ**

Зараз значна увага приділяється підвищенню якості електричної енергії. Проблема впливу вищих гармонік одна з важливих частин проблеми електромагнітної сумісності споживачів електроенергії з живильної електричної мережею. Актуальними залишаються питання аналізу втрат в автономних інверторах напруги при роботі їх на нелінійне навантаження. Метою статті є визначення втрат в ключах інвертора напруги з синусоїдальної ШІМ при роботі на нелінійне навантаження. Струм комутований ключами інвертора відрізняється від синусоїдального. Визначено складові цього струму, який складається із струму навантаження і струму що протікає в конденсатор, який розкладається на струм першої гармоніки і струм вищих гармонік. Знайдено діюче значення струму через ключ інвертора. Зроблено розрахунок втрат в силових ключах автономного інвертора напруги, визначений діючий струм, що протікає в ключі, отримано вираз для визначення потужності втрат на включення і статичних втрат в ключах автономного інвертора напруги з LC-фільтром і синусоїдальної ШІМ. В результаті аналізу визначено діапазон частот ШІМ при якому досягається мінімум втрат. Дано рекомендації по вибору частоти синусоїдальної ШІМ автономного інвертора напруги при роботі на нелінійне навантаження.

Ключові слова: потужність втрат, якість електричної енергії, електромагнітна сумісність, нелінійне навантаження, ШІМ, автономний інвертор напруги.

V. O. MAKAROV**LOSS ANALYSIS IN SELF-COMMUTATED INVERTER WITH LC-FILTER AND SINUSOIDAL PWM DURING NONLINEAR LOAD LOADING**

Now considerable attention is paid to improving the quality of electrical energy. The problem of the influence of higher harmonics is one of the important parts of the problem of electromagnetic compatibility of electricity consumers with the power supply network. The problems of analyzing losses in self-commutated inverter when they are operated for non-linear loads remain topical. The purpose of the article is to determine the losses in the voltage inverter keys with sinusoidal PWM when operating on a nonlinear load. Current switched by inverter keys is different from sinusoidal. The components of this current, which consists of the load current and the current flowing into the capacitor, which is decomposed into the first harmonic current and the current of higher harmonics, are determined. Found the effective value of the current through the inverter key. The losses in the power switches of the self-commutated inverter are calculated, the effective current flowing in the key is determined, an expression is obtained to determine the power losses for switching on and static losses in the keys of the self-commutated inverter with LC filter and sinusoidal PWM. As a result of the analysis, the PWM frequency range was determined at which the minimum loss is achieved. Recommendations are given on the choice of the frequency of a sinusoidal PWM self-commutated inverter when operating on a nonlinear load.

Keywords: power loss, electric power quality, electromagnetic compatibility, non-linear load, PWM, self-commutated inverter.

Введение. Жесткие требования, которые ограничения на содержание высших гармоник предъявляются к качеству и надежности сетей напряжения питания при работе на линейную и электропитания ответственных потребителей, вводят нелинейную нагрузку. Внедрение электронных

© В. А. Макаров, 2018

приборов в промышленности привело к увеличению количества потребителей электрической энергии, которые обеспечивают безопасность и жизнедеятельность человека, работу телекоммуникационных систем, непрерывность технологических процессов, хранение информации, и нуждаются в бесперебойном питании. Наиболее жесткие требования к качеству электрической энергии, электромагнитной совместимости с источником питания и нагрузкой предъявляются в системах питания медицинской и телекоммуникационной аппаратуры [1-5]. Для рассмотренных систем характерно использование электронных блоков питания (нелинейная нагрузка).

Цель статьи. Произвести расчет потерь в силовых ключах АИН, определить действующий ток, протекающий в ключе, получить выражение для определения мощности потерь на включение и статических потерь в ключах автономного инвертора напряжения (АИН) с LC-фильтром и синусоидальной ШИМ.

Постановка проблемы. Потери в ключах АИН состоят из статических и динамических. Для определения динамических потерь необходимо определить действующий ток, протекающий через ключ. Если речь идет о АИН с LC-фильтром и синусоидальной ШИМ работающем на нелинейную нагрузку, то определение этого тока является достаточно сложной задачей. Так же необходимо учитывать влияние частоты ШИМ на динамические потери в ключах.

Материалы исследований.

Основным фактором, снижающим ЭМС нагрузки и источника питания, является несинусоидальность потребляемого тока, что, как правило, связано с использованием выпрямителей с активно-емкостной нагрузкой. Основные зависимости, описывающие подобные системы, известны [6-11], но при проектировании источников синусоидального напряжения (рис. 1) целесообразно иметь более подробную информацию об электромагнитных процессах в преобразователе, что позволит учесть его взаимодействие с выходным фильтром источника, влияние повышенной токовой нагрузки на силовые ключи полупроводникового преобразователя, дать оценку уровня электромагнитных помех. В общем случае нагрузка источника является нелинейной.

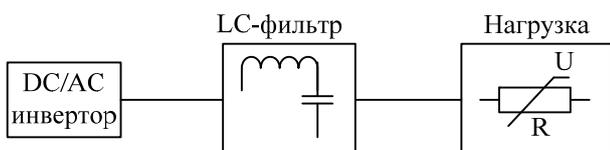


Рис. 1. Выходная цепь источника синусоидального напряжения

При работе на выпрямитель инвертор в совокупности с нагрузкой представляют собой систему с изменяемыми параметрами (рис. 2).

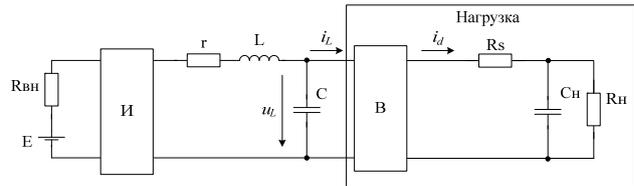


Рис. 2. Структурная схема преобразователя и нелинейной нагрузки

Для оценки потерь в АИН, необходимо проанализировать электромагнитные процессы протекающие в силовых ключах схемы.

Потери в силовых ключах состоят из статических потерь P_{st} , которые связаны с протеканием тока через транзистор и вызванным им падением напряжения на нем и динамических (коммутационных) потерь, связанных с переключением прибора, которые состоят из потерь на включение P_{on} и выключение P_{off}

$$P_{vt} = P_{st} + P_{on} + P_{off} \tag{1}$$

Потери на выключение будут незначительными, т.к. они зависят от параметров транзистора, а именно емкости Миллера и всегда можно подобрать ток драйвера таким, чтобы эти потери по сравнению с остальными составляющими были не существенными, и для оценки суммарных потерь ими можно пренебречь [14].

Потери на включение определяются особенностями работы схемы. При формировании выходного синусоидального напряжения, полученного при помощи однополярной ШИМ в схеме, возникают сквозные токи, связанные с перетеканием тока из диода одного транзистора в транзистор, который открывается, при этом выделяется некоторое количество тепла. Коммутируемое напряжение на интервале коммутации, можно считать неизменным и оно будет равно напряжению источника питания U_d . Энергия потерь в транзисторе при включении будет определяться из выражения [14]:

$$E_{on} = U_d \left(Q_{rr} + I_K \sqrt{\frac{2Q_{rr}}{di/dt}} + \frac{I_K^2}{2 di/dt} \right), \tag{2}$$

где I_K - коммутируемый ток; Q_{rr} - заряд обратного восстановления диода; di/dt - скорость нарастания тока в транзисторе.

Из (2) видно, что для оценки потерь необходимо знать величины Q_{rr} и di/dt . Известно [12-14], что для диодов величина Q_{rr} примерно пропорциональна величине коммутируемого тока $Q_{rr} = kI_K$, где k - соответствующий постоянный коэффициент. Тогда выражение (2) будет выглядеть так:

$$E_{on} = U_d \left(kI_k + I_k \sqrt{\frac{2kI_k}{di/dt}} + \frac{I_k^2}{2di/dt} \right) \quad (3)$$

Если величина коммутируемого тока изменяется на периоде основной гармоники, то зная энергию потерь E_{on} , можно определить среднюю мощность потерь в транзисторе при включении, если усреднить значение энергии на периоде основной гармоники:

$$P_{on} = \frac{f_n}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{on}(\theta) d\theta \quad (4)$$

Потери в полупроводниковых приборах для типовых применений исследованы достаточно детально [12-14]. Для вычисления мощности потерь включения в АИН с синусоидальной ШИМ, можно воспользоваться следующим выражением [14]:

$$P_{on}(\theta) = U_d f_n \left(kI_L \sin \theta + I_L \sin \theta \sqrt{\frac{2kI_L \sin \theta}{di/dt}} + \frac{I_L^2 \sin^2 \theta}{2di/dt} \right), \quad (5)$$

где I_L - ток нагрузки во время коммутации (в данном случае амплитудное значение).

Средняя величина потерь включения на периоде первой гармоники будет определяться как:

$$P_{onAV} = \frac{U_d f_n}{\pi} \left(kI_L \int_0^\pi \sin \theta d\theta + I_L \sqrt{\frac{kI_L}{di/dt}} \int_0^\pi \sin^{3/2} \theta d\theta + \frac{I_L^2}{2di/dt} \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \right) = \frac{U_d f_n I_L}{\pi} \left(2k + 2,47 \sqrt{\frac{kI_L}{di/dt}} + 0,785 \frac{I_L}{di/dt} \right) \quad (6)$$

Уравнение (6) корректно в том случае, когда коммутируемый ток изменяется по синусоидальному закону. В реальной схеме (рис. 2) ток, коммутируемый силовым ключом, будет определяться током i_V протекающим в дросселе фильтра L . Этот ток, можно разбить на составляющие: ток нагрузки i_L и ток i_C протекающий через конденсатор фильтра, который в свою очередь состоит из первой гармоники тока i_{C1} протекающего в LC контуре и тока высших гармоник i_{Cn} . На рис. 3 приведены осциллограммы этих токов. Для анализа этого тока нужно рассмотреть процессы, происходящие в схеме в момент переключения силового ключа. Так на интервале проводимости ток дросселя определяется разностью напряжений источника питания U_d и напряжением на конденсаторе фильтра U_c . На рис. 4 приведена эквивалентная схема, поясняющая этот процесс.

Если пренебречь потерями в выходном фильтре инвертора, пульсации тока в дросселе определяются как

$$di_V = \frac{U_d dt}{L} = \frac{(U_d - U_c)}{L} dt = \frac{(U_d - U_d \sin \omega_0 t)}{L} dt \quad (7)$$

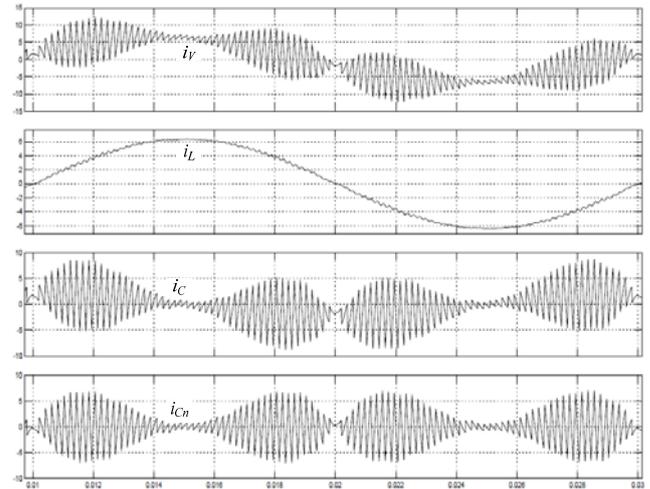


Рис. 3. Осциллограммы токов

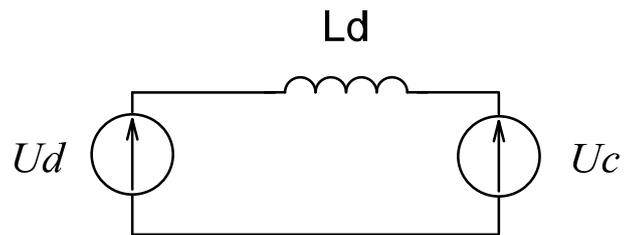


Рис. 4 Эквивалентная схема при замкнутом ключе АИН

Очевидно, что величина пульсаций тока будет зависеть от длительности импульса Δt и величины индуктивности дросселя L . Длительность импульса в свою очередь определяется в соответствии с параметрами ШИМ $f_n = 1/T_n$ в определенный момент времени, как $\Delta t = T_n \sin \omega_0 t$. Поэтому если перейти к конечным приращениям, величина пульсаций тока дросселя (7) определяется, как

$$\Delta i_V(t) = \frac{U_d T_n}{L} (1 - \sin \omega_0 t) \sin \omega_0 t = \frac{U_d}{L f_n} (1 - \sin \omega_0 t) \sin \omega_0 t \quad (8)$$

Таким образом, ток в дросселе можно разложить на составляющие: ток нагрузки i_L , ток, протекающий в конденсаторе, который равен в первом приближении $\Delta i_V(t) = i_{Cn}(t)$, огибающая тока показана на рис. 5, и первой гармоники тока протекающего в конденсатор, амплитуда

которого определяется из параметров колебательного LC контура:

$$I_{Cm1} = \frac{U_d}{\omega_0 L + 1/\omega_0 C} \quad (9)$$

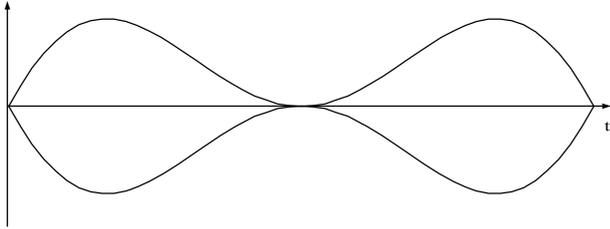


Рис. 5. Огибающая тока i_{cn}

Ток дросселя для текущего угла коммутации может быть представлен в виде

$$i_v(\theta) = i_L(\theta) + (i_{cn}(\theta) + i_{c1}(\theta)) = I_{Lm} \sin \omega_0 \theta + \left(\frac{U_d}{L f_n} (1 - \sin \omega_0 \theta) \sin \omega_0 \theta + I_{Cm1} \sin(\omega_0 \theta + \pi/2) \right) \quad (10)$$

Найдем действующее значение тока дросселя, для этого определим действующий ток составляющей тока i_{cn} конденсатора. Ток имеет треугольную форму, модулированную по амплитуде огибающей рис. 5. Так как действующее значение тока треугольной формы с постоянной амплитудой A будет $\frac{A}{\sqrt{3}}$ [15], то:

$$I_{Cn} = \frac{U_d}{L f_n} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{1}{\sqrt{3}} (1 - \sin \omega_0 \theta) \sin \omega_0 \theta \right)^2 d\theta} = \frac{U_d}{L f_n} \cdot \left(\frac{2 - \sqrt{3}}{2\sqrt{6}} \right) \quad (11)$$

Действующий ток второй составляющей тока конденсатора i_{c1} :

$$I_{c1} = \frac{U_d}{\omega_0 L + 1/\omega_0 C} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sin(\theta + \pi/2))^2 dt} = \frac{U_d}{\omega_0 L + 1/\omega_0 C} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Таким образом, действующий ток конденсатора равен:

$$I_c = \sqrt{I_{Cn}^2 + I_{c1}^2} \quad (13)$$

Действующий ток нагрузки определяется как $I_L = \frac{S}{U_d \sqrt{2}}$, где S – номинальная мощность нагрузки.

Действующий ток дросселя определяется, как

$$I_v = \sqrt{I_L^2 + I_{cn}^2 + I_{c1}^2} \quad (14)$$

Действующий ток дросселя сильно зависит от индуктивности L и частоты ШИМ f_n . На рис. 6 показана зависимость относительного тока $I^* = \frac{I_v}{I_L}$ от частоты ШИМ f_n при значении индуктивности $L = 1,2$ мГн, а на рис. 7 зависимость I^* от индуктивности L при $f_n = 5$ кГц для мощности нагрузки равной 1кВт. Из рис. 6 видно, что при неизменном значении индуктивности на величину действующего тока дросселя существенно влияет частота ШИМ, до того момента пока за время импульса изменение энергии в индуктивности будет минимальным, это видно из выражения (11). Подобный эффект вызывает и изменение величины индуктивности дросселя L (рис. 7) – чем эта величина больше, тем пульсации тока меньше.

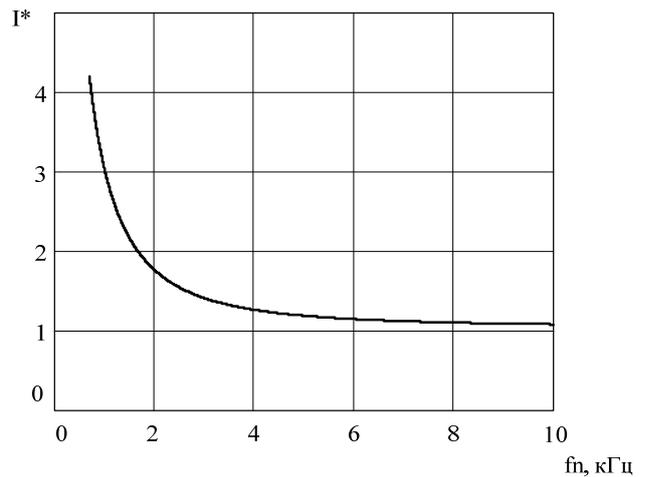


Рис. 6. Зависимость тока от частоты ШИМ

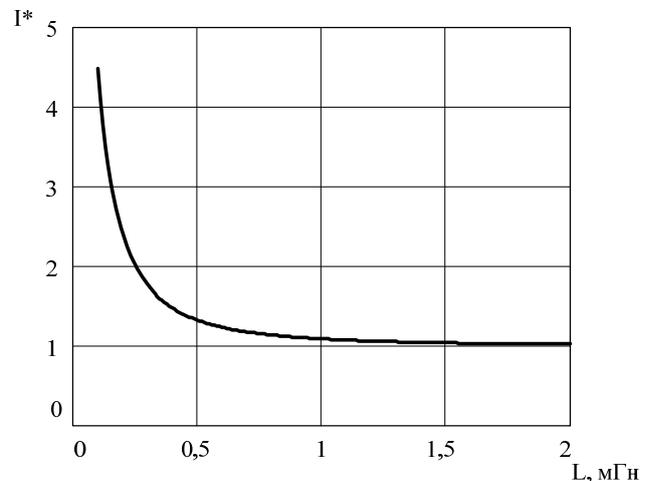


Рис. 7. Зависимость тока от индуктивности дросселя

Для определения средней мощности потерь на включение (6), необходимо определить среднее значение тока дросселя, т.е. надо вычислить интеграл

$$I_{dAV} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \int_0^{\pi} i_V(\theta) d\theta.$$

Аналитически решение этого интеграла является сложной задачей, поэтому он был решен численно в пакете Mathcad. Для оценки мощности потерь на включение построена зависимость мощности потерь от частоты ШИМ $P_{onAV}(f_n)$ для типового транзистора типа IRF740 (рис. 8).

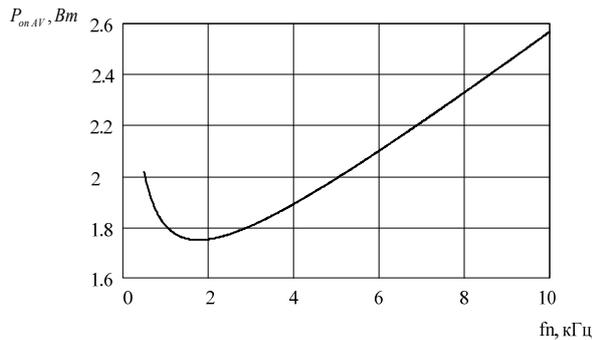


Рис. 8. Зависимость средней мощности включения от частоты ШИМ

В соответствии с (10) потери на включение делятся на составляющую, которая зависит от первой гармоники тока дросселя и прямо пропорциональна частоте ШИМ и составляющую, определяемую пульсациями тока в дросселе. Как видно из рис. 8 результирующие потери на включение имеют минимум, определяемый снижением пульсаций тока в дросселе, как видно из рис. 6. При дальнейшем росте частоты, пульсации тока дросселя практически не зависят от частоты ШИМ, а составляющая потерь на включение, зависящая от первой гармоники тока дросселя, растет пропорционально частоте ШИМ.

Для определения статических потерь в транзисторе воспользуемся выражением [14]: $P_{stAV} = I_{VT RMS}^2 \cdot R_{DS(on)}$, где

$$I_{VT RMS} = \frac{I_V}{2} \quad - \text{действующий ток транзистора,}$$

$R_{DS(on)}$ - сопротивление канала транзистора в открытом состоянии.

$$\text{Полная мощность потерь равна: } P_{AV} = P_{onAV} + P_{stAV}.$$

На рис. 9 показан график зависимости мощности потерь от частоты ШИМ. Как видно из рисунка – наблюдается минимум мощности потерь, следовательно, можно выделить диапазон частот, в котором мощность потерь минимальна. Так для мощности нагрузки 1 кВт такой диапазон будет находиться в пределах от 7 до 10 кГц.

Анализируя зависимость рис. 9 видно, что на частоте ШИМ в районе 8 кГц наблюдается минимум суммарной мощности потерь. При уменьшении частоты относительно 8 кГц потери будут расти быстрее, чем при ее увеличении, т.к. будет сказываться составляющая, зависящая от пульсаций тока на дросселе.

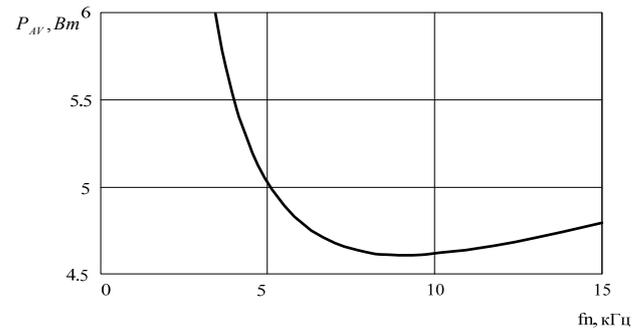


Рис. 9. Зависимость средней мощности потерь от частоты ШИМ

К примеру, при уменьшении частоты ШИМ в два раза с 8 до 4 кГц потери увеличатся на 20%, а при увеличении частоты в два раза, потери увеличатся всего на 4%. Следовательно, для выбора частоты ШИМ рекомендуется увеличивать частоту ШИМ или оставлять ту при которой наблюдается минимум суммарных потерь в транзисторе. При выборе частоты ШИМ так же необходимо учитывать каким образом формируются временные интервалы, т.е. влияние дискретности вычислений, а также необходимо учитывать характер нагрузки [16,17].

Список литературы

1. Ali Emadi, Abdolhosein Nasiri, Stoyan B. Bekiarov. *Uninterruptible power supplies and active filters*. Chicago: CRC Press, Illinois Institute of Technology Electrical and Computer Engineering Department, IL, 2005. 272p.
2. Воробьев А.Ю. *Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем*. Москва: Эко-Трендз, 2002. 280 с.
3. Замаруев В.В., Ивахно В.В., Макаров В.А. *Источник бесперебойного питания с неидеальным буферным накопителем энергии*. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАН України. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. 2003. Ч.4. с.11-15
4. Домнин И.Ф., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Прокопенко В.Ю. *Источник бесперебойного питания систем диагностики телефонной станции*. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАН України. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. 2003. Ч.4. с.7-10.
5. Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Попова Н.В. [и др.] *Однофазный агрегат бесперебойного питания мощностью 3 кВА*. Электротехника. 2004. №10. с. 14–18.
6. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. *Преобразовательная техника* [2-е изд.]. Київ: Вища школа, 1983. 431 с.
7. Гончаров Ю.П., Будионий О.В., Морозов В.Г. та ін. *Перетворювальна техніка*. Ч2 / ред. Руденка В.С. Харків: Фоліо, 2000. 360 с.
8. Гончаров Ю.П., Ермуратский В.В., Заика Э.И., Штейнберг А.Ю. *Автономные инверторы*. / Под ред. Чалого Г.В. Кишинев: Штиинца, 1974. 336 с.
9. Бедфорд Б., Хофт Р. *Теория автономных инверторов*. / перевод с англ. ред. И.В. Антика. Москва: «Энергия», 1969. 280 с.
10. Макаров В.А., Ластовка А.П. *Работа инвертора напряжения с LC-фильтром на нелинейную нагрузку*. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАНУ. 2010. Тематичний вип., Ч.2., с. 243-246.
11. Слепов Н.Н., Дроздов Б.В. *Широтно-импульсная модуляция*. Москва: Энергия, 1978. 190 с.

12. Muhammad H. Rashid. *Power electronics handbook*. Academic Press, Pensacola, Florida, 2001. 895p.
13. Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Second Edition. University of Colorado Boulder, Colorado, 2004. 900p.
14. Силовые полупроводниковые приборы. Каталог фирмы International Rectifier. / пер. с англ. под ред. В.В. Токарева. Москва: IR Group, 1995. 353 с.
15. Бронштейн И.Н., Семедьяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов*. Москва: Наука, 1980. 976с.
16. Макаров В.А., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Ластовка А.П. *К вопросу выбора частоты синусоидальной ШИМ источника резервного питания при его работе на линейную и нелинейную нагрузку*. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАНУ. 2009. Тематичний вип., Ч.5., с. 43-46.
17. Макаров В.А., Ластовка А.П. *Формирование точек коммутации синусоидальной ШИМ микропроцессорными средствами*. Технічна електродинаміка. Київ: ІЕД НАНУ. 2012. Ч. 1, Тематичний вип. с. 81–86
6. Rudenko V.S. Sen'ko V.I., Chizhenko I.M. *Preobrazovatel'naya tekhnika* [Converter equipment]. Kiev, Vishcha shkola, 1983. 431 p.
7. Goncharov Yu.P., Bud'onij O.V., Morozov V.G. *Peretvoryuval'na tekhnika* [Converter equipment]. Harkiv: Folio, 2000, 360 p.
8. Goncharov Yu.P., Ermuratskiy V.V., Zaika E.I., Shtejnberg A.Yu. *Avtonomnye invertory* [Self-commutated inverters]. Kishinev: SHTinca, 1974. 336 p.
9. Bedford B., Hoft R. *Teoriya avtonomnykh invertorov* [The theory of self-commutated inverters]. Moscow: «Energiya», 1969. 280 p.
10. Makarov V.A., Lastovka A.P. *Rabota invertora napryazheniya s LC-filtrom na nelinejnyu nagruzku* [Voltage inverter operation with LC-filter for non-linear load]. *Tekhnichna elektrodinamika*. Kyiv: IED NANU. 2010. Tematichnij vip., Part 2., pp. 243-246.
11. Slepov N.N., Drozdov B.V. *Shirotno-impul'snaya modulyaciya* [Pulse-width modulation]. Moscow: Ehnergiya, 1978. 190 p.
12. Muhammad H. Rashid. *Power electronics handbook*. Academic Press, Pensacola, Florida, 2001. 895 p.
13. Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Second Edition. University of Colorado Boulder, Colorado, 2004. 900 p.
14. Power semiconductor devices. Company directory International Rectifier (Russ. ed.: V.V. Tokareva, *Silovye poluprovodnikovye pribory*. Moscow, IR Group, 1995. 353 p.)
15. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsvya vuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students]. Moscow: Nauka, 1980. 976p.
16. Makarov V.A., Zamaruev V.V., Ivahno V.V., Lastovka A.P. *K voprosu vybora chastoty sinusoidal'noj SHIM istochnika rezervnogo pitaniya pri ego rabote na linejnyu i nelinejnyu nagruzku* [On the choice of the frequency of a sinusoidal PWM backup power source when it is working on a linear and non-linear load]. *Tekhnichna elektrodinamika*. Kyiv: IED NANU. 2009. Tematichnij vip., Part.5., pp. 43-46.
17. Makarov V.A., Lastovka A.P. *Formirovanie toček kommutacii sinusoidal'noj SHIM mikroprocessornymi sredstvami* [Formation of switching points of sinusoidal PWM microprocessor means]. *Tekhnichna elektrodinamika*. Kyiv: IED NANU. 2012. Part. 1, Tematichnij vip., pp. 81–86

References (transliterated)

1. Ali Emadi, Abdolhosein Nasiri, Stoyan B. Bekiarov. *Uninterruptible power supplies and active filters*. Chicago: CRC Press, Illinois Institute of Technology Electrical and Computer Engineering Department, IL, 2005. 272p.
2. Vorob'yev A.Yu. *Elektrosnabzheniye komp'yuternykh i telekommunikatsionnykh sistem*. [Power supply of computer and telecommunication systems] Moscow: Eko-Trendz, 2002. 280 s.
3. Zamaruev V.V., Ivakhno V.V., Makarov V.A. *Istochnik bespereboynogo pitaniya s neideal'nyim bufernym nakopitelem energii*. [Uninterruptible power supply with non-ideal buffer energy storage]. *Tekhnichna elektrodinamika*. Kiev: IED NAS of Ukraine. Topical Issue: Sylowa Elektronika and Energy Efficiency, 2003, Part 4, p.11-15
4. Domnin I.F., Zamaruev, V.V., Ivakhno, V.V., Prokopenko, V.Yu. *Istochnik bespereboynogo pitaniya sistem diagnostiki telefonnoy stantsii*. [Uninterruptible power supply system for telephone station diagnostic systems]. *Tekhnichna elektrodinamika*. Kiev: IED NAS of Ukraine. Topical Issue: Sylowa Elektronika and Energy Efficiency. 2003, Part 4, pp.7-10.
5. Kuz'kin V.I., Meleshkin V.N., Popova N.V. [i dr.] *Odnofaznyy agregat bespereboynogo pitaniya moshchnost'yu 3 kVA* [Single-phase 3 kVA uninterruptible power supply unit] *Elektrotekhnika*. 2004, No 10, pp. 14–18.

Поступила (received) 29.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Макаров Вадим Олександрович (Макаров Вадим Александрович, Makarov Vadym Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1079-6113>; e-mail: Vadimm@ukr.net