

ТРЕХФАЗНЫЕ ТРЕХУРОВНЕВЫЕ АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Запропоновано і проаналізовано застосування трірівневих автономних інверторів напруги у складі установки гарантованого живлення для розширення їх функціональних можливостей. Розглянуто будову і принцип їх роботи.

Введение. Трехфазные устройства гарантированного питания (УГП – англ.: *Uninterruptible Power Supply*) в настоящее время находят широкое применение в системах электропитания ответственных нагрузок с целью элиминации провалов напряжения и колебаний сетевого напряжения, превышающих допустимые значения. Для этого строятся специальные источники гарантированного (резервного) питания УГП [3] с применением полупроводниковых преобразователей, в том числе таких, как трехфазные конвенциональные автономные инверторы напряжения (АИН).

В то же время можно отметить появление ряда публикаций [1, 4], посвященных модернизации и развитию одного из направлений построения АИН, а именно построению многоуровневых инверторов напряжения. Большой практический интерес имеют инверторы данного типа с наименьшим числом силовых ключей, в частности, инверторы, построенные с использованием ограничивающих диодов *DC* (англ. *DC – Diode Clamped*). Отсутствие в таких инверторах суммирующих трансформаторов снимает ограничения частотного регулирования выходных напряжений АИН в сторону низких частот. Кроме того, многоуровневые АИН целесообразно применять при построении инверторов на значительные выходные мощности и высокие напряжения, а также в связи с улучшенным качеством выходных напряжений. В таких инверторах уменьшаются также коммутационные потери из-за того, что силовые ключи работают на пониженных напряжениях.

Целью настоящей работы является построение трехфазных УГП с применением трехфазных трехуровневых АИН с целью расширения их функциональных возможностей, а также построение компьютерных моделей АИН в пространстве Matlab при синусоидальной поуровневой ШИМ для оценки регулировочных характеристик инвертора.

Блок-схема УГП с трехфазным трехуровневым АИН. Так как среди основных структурных построений УГП важную отдельную группу устройств составляют, в соответствии с европейской нормой, устройства УГП с пассивным резервом – *stand by* (прежде употреблялось название *off line*), то в работе рассматривается применение трехуровневых АИН в составе УГП с пассивным резервом, в частности, построение этих устройств и принцип их работы.

Основным препятствием к использованию трехуровневых АИН в составе существующих УГП является то, что аккумуляторные батареи (АБ) являются двухуровневыми источниками постоянного тока пониженного напряжения. Однако появление в области современных устройств преобразовательной техники трехуровневых ШИП [2] позволяет решить эту задачу.

Блок-схема предлагаемого решения УГП показана на рис. 1. Устройство содержит в качестве основного источника питания трехфазную сеть, а в качестве дополнительного – аккумуляторную батарею (АБ).

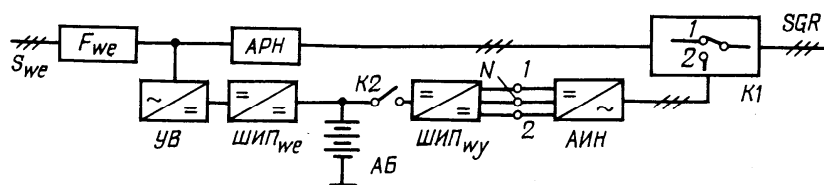


Рис. 1

В режиме нормальной работы шины гарантированного питания SGR подключены ко входным шинам устройства S_{we} , соединенным с трехфазной сетью с помощью трехфаз-

ного контактора К1 через блок АРН (автоматический регулятор напряжения) и входной фильтр F_{we} устройства. При этом сетевое напряжение фильтруется в устройстве, а также его параметры корректируются блоком АРН. Одновременно с этим осуществляется подзаряд батареи аккумуляторов.

В момент исчезновения питающего напряжения или уменьшения его величины ниже допустимого порога устройство переходит в аварийный режим работы, при котором электрическая энергия поступает к приемникам от АИН, с использованием энергии, запасенной в АБ. Время аварийного режима работы продолжается до тех пор, пока не возвратится напряжение сети или не исчерпается запасенная энергия в АБ.

Входной ШИП_{we} служит прежде всего для согласования уровней выходного напряжения выпрямителя УВ (управляемого либо чаще неуправляемого) и напряжения на аккумуляторной батарее. Традиционно для этого используется ШИП типа *buck converter*, имеющий свойство только понижать выходное напряжение относительно величины напряжения питания преобразователя. В выходной цепи УГП находятся два блока: трехуровневый ШИП_{wy} и трехфазный трехуровневый АИН. На выходных зажимах 1, N, 2 блока ШИП_{wy} формируется стабилизированное трехуровневое напряжение постоянного тока [2], требуемое трехфазным трехуровневым инвертором.

Трехуровневый АИН. На рис. 2 представлена выходная цепь УГП, а именно два блока – ШИП_{wy} и АИН, включенные между аккумуляторной батареей и выходными шинами устройства SGR. Блок ШИП_{wy} состоит из двух преобразователей постоянного напряжения [2], в котором первый ШИП выполнен по схеме преобразователя типа *boost*, а второй – по схеме ШИП типа *buck – boost*. Построен первый ШИП на основе элементов L_1, T_1, D_1, C_1 . Второй ШИП состоит также из четырёх элементов, соответственно L_2, T_2, D_2, C_2 , как и первый ШИП, однако имеет иную структуру построения. Индекс «1» использован для обозначения элементов 1-го преобразователя, а индекс «2» – для обозначения элементов 2-го преобразователя. По сравнению с первым ШИП, во втором ШИП транзистор T_2 находится не в продольной, а в поперечной ветви преобразователя, а дроссель L_2 – в продольной ветви. Входные цепи первого и второго ШИП включены параллельно между собой относительно зажимов АБ, чем исключается их интерактивное влияние. На зажимах 1, N, 2 блока формируется регулируемое (стабилизированное) трехуровневое напряжение постоянного тока $U_{dc1} = U_{dc2} = U_{dc}/2$, необходимое для формирования трехфазным трехуровневым АИН.

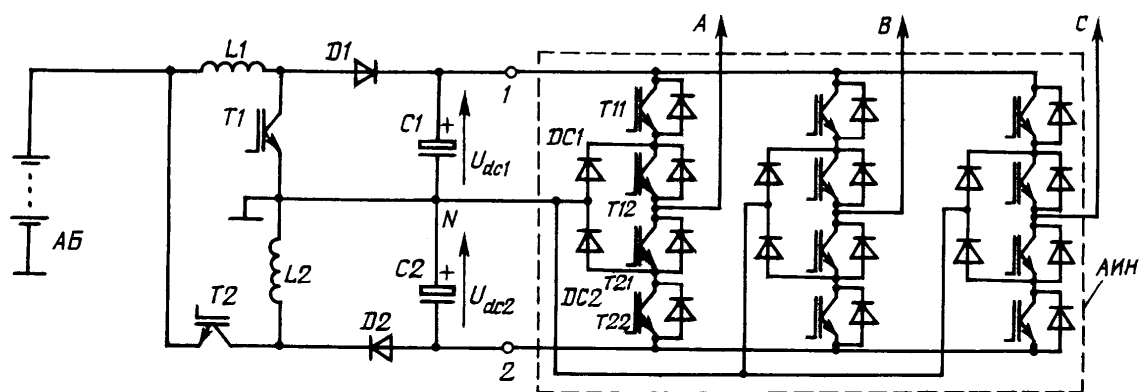


Рис. 2

Инвертор, показанный на рис. 2, можно классифицировать как АИН с ограничивающими диодами (англ. *DC – Diode Clumped*). Каждая из фаз инвертора содержит четыре силовых транзистора, к примеру фаза А – транзисторы T_{11} - T_{12} и T_{21} - T_{22} , шунтированные обратными диодами. Кроме того, трехуровневый инвертор содержит в каждой фазе инвертора между анодной и катодной группой транзисторов по два последовательно включенных диода DC . Общим зажимом эти диоды соединены с нулевым зажимом N источника питания инвертора. Выходные зажимы инвертора A, B, C с помощью включения двух транзисторов верхней

группы либо двух транзисторов нижней группы, либо двух средних транзисторов могут быть соединены либо с положительным зажимом, либо с отрицательным, либо с нулевым зажимом источника питания.

Шины гарантированного питания SGP могут быть подключены к выходным зажимам АИН либо с помощью четырехпроводной линии с нулевым проводом (НР), который соединяет нулевые зажимы шин SGP и инвертора N , либо на основе трехпроводной линии без НР. При симметричной нагрузке, подключенной к инвертору без нулевого провода, трехфазные АИН имеют лучшие энергетические параметры, поэтому далее будет рассмотрен трехуровневый АИН с симметричной нагрузкой и без НР.

Компьютерная модель инвертора. Для исследования основных энергетических показателей трехуровневого АИН типа DC построена его виртуальная модель в пространстве Simulink программы Matlab при следующих выходных параметрах трехфазного инвертора: выходная частота 50 Гц; несущая частота модуляции $f_{mod} = 1200$ Гц. Исходя из выходной кажущейся мощности 3 кВА, выходного фазного напряжения $U_{L1} = 220$ В и $\cos\varphi = 0,906$, находим параметры симметричной трехфазной RL -нагрузки, при этом $R_L = 8,77 \Omega$; $L_L = 0,013$ Н.

Для выбора требуемых величин напряжения постоянного тока $U_{d1} = U_{d2} = U_{dc}/2$ на входе АИН воспользуемся коэффициентом передачи инвертора по напряжению трехуровневого АИН типа DC , рассмотренным в

работе [1]. Коэффициент U_{L1}^* является равным отношению действующего значения основной гармоники выходного фазного напряжения к суммарному напряжению источника питания $U_{L1}^* = U_{L1}/U_{dc}$. Зависимость U_{L1}^* в функции коэффициента глубины модуляции $U_{L1}^* = f(m_A)$ представлена графически на рис. 3.

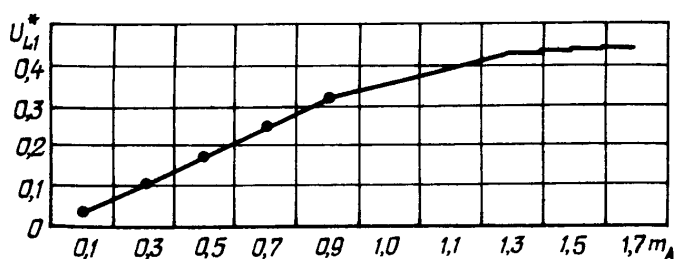


Рис. 3

Если максимальное значение

коэффициента передачи инвертора по напряжению ($U_{L1}^* = 0,353$) на линейном участке $U_{L1}^* = f(m_A)$ является недостаточным для некоторых нагрузок, то с целью повышения величины напряжения U_{L1} применяется режим управления со сверхмодуляцией. Как видно из рис. 3, при $m_A = 1,3$ достигаем значений $U_{L1}^* = 0,431$.

На линейном участке зависимость $U_{L1}^* = f(m_A)$ при значениях $0,1 \leq m_A \leq 0,9$ можно описать следующим выражением:

$$U_{L1} = \frac{1}{2\sqrt{2}} m_A U_{dc}. \quad (1)$$

В предлагаемом схемном решении УГП есть возможность воспользоваться возможностями блока ШИП_{вы} и выбрать величину коэффициента глубины модуляции, наибольшей на линейном участке $m_A = 0,9$. Соответственно из выражения (1) находим напряжения постоянного тока на входе АИН $U_{dc} = U_{dc1} + U_{dc2} = 624$ В.

На рис. 4 представлена виртуальная модель АИН. Она содержит: трехуровневый источник напряжения постоянного тока $U_{dc1} = U_{dc2} = U_{dc}/2 = 312$ В; трехфазную нагрузку RL , $RL1$, $RL2$, соединенную звездой; трехфазный инвертор, представленный в виде аналогичных блоков Subsystem_A, Subsystem_B, Subsystem_C; трехканальные устройства управления транзисторами Con.Sys_A, Con.Sys_B, Con.Sys_C; три блока, формирующие синусоидальные модулирующие сигналы GNS_a, GNS_b, GNS_c амплитудой 0...5 В и частотой 50 Гц (их сигналы подаются на входы In1 каждого из блоков Con.System), а также блок формирования треугольного сигнала задания GNT_a с частотой модуляции 1,2 кГц и амплитудой 2,5 В (его выходные сигналы подаются на входы In2 каждого из блоков Con.System). Кроме этого, анализируемый трехфазный АИН содержит в цепи постоянного тока фазы А, а также в выходной цепи только фазы С (исходя из симметричности построения и управления трехфазным инвертором) измерительные приборы и осциллографы для регистрации и измерений величин напряжений и токов в этих цепях.

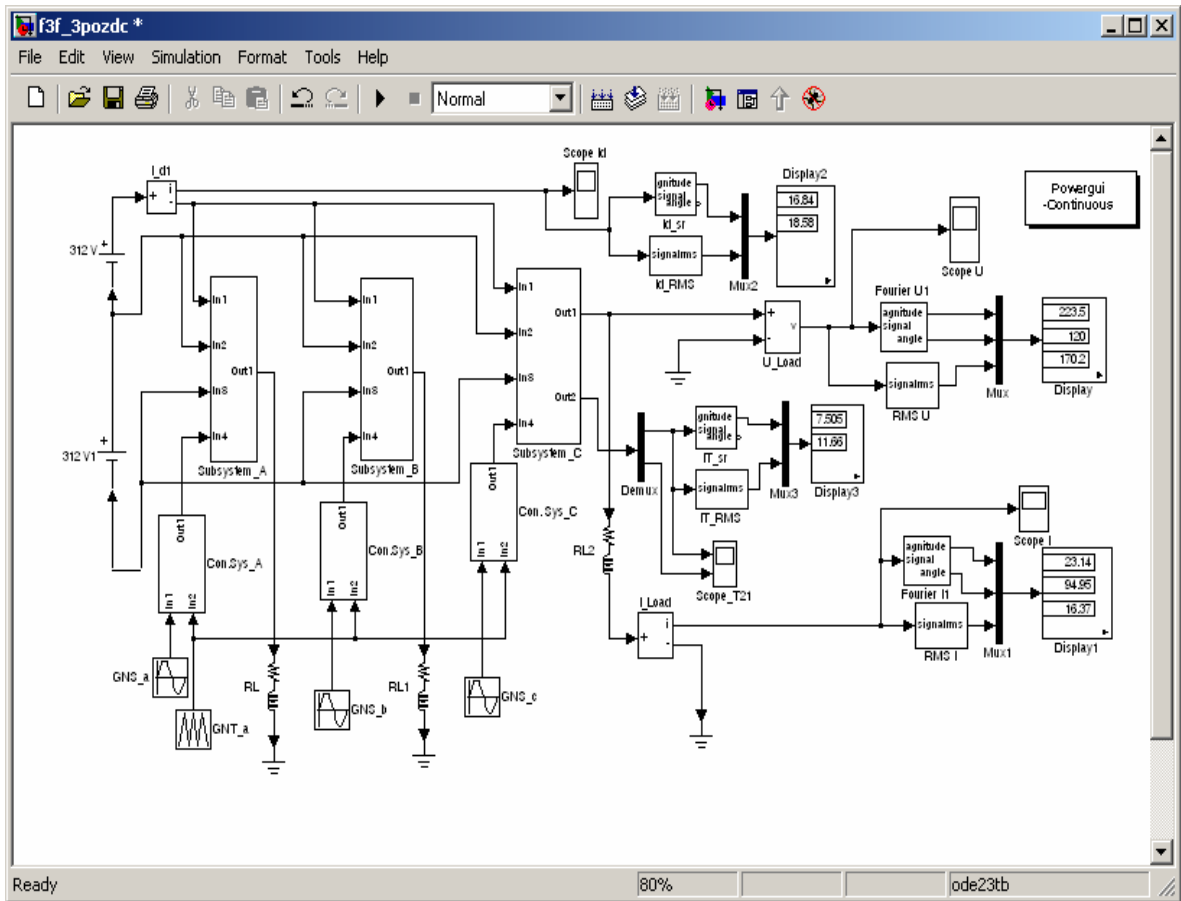


Рис. 4

Алгоритм управления. Синусоидальная модуляция в каждом из блоков Subsystem трехуровневого АИН реализуется путем сравнения на компараторах синусоидального модулирующего сигнала 50 Гц с блоков GNS_a, GNS_b, GNS_c с амплитудой 0...5 В и частотой 50 Гц, с двумя треугольными сигналами несущей частоты $f_{imp} = 1200$ Гц, сдвинутыми между собой по вертикали, формируемыми из сигнала задания блока GNT_a с амплитудой 2,5 В. Каждый из компараторов управляет в противофазе двумя транзисторами (одним из верхнего плеча, а другим из нижнего плеча каждой фазы инвертора) импульсами управления с регулируемой длительностью и несущей частотой. На рис. 5 а показаны временные диаграммы синусоидального и треугольного сигналов, а на рис. 5 б, в – соответственно две последовательности сигналов на выходе компараторов. Принимая во внимание частоты сигналов синусоидального и треугольного, относительная несущая частота модуляции равна $f_{mod}^* = 24$.

Также можно найти коэффициент глубины трехуровневой модуляции как отношение амплитуды синусоидального сигнала к сумме амплитуд обоих треугольных сигналов, который равен $m_A = 4,5/5 = 0,9$. Данный алгоритм реализует в трехуровневом АИН поуровневую синусоидальную ШИМ выходных напряжений с независимым регулированием ве-

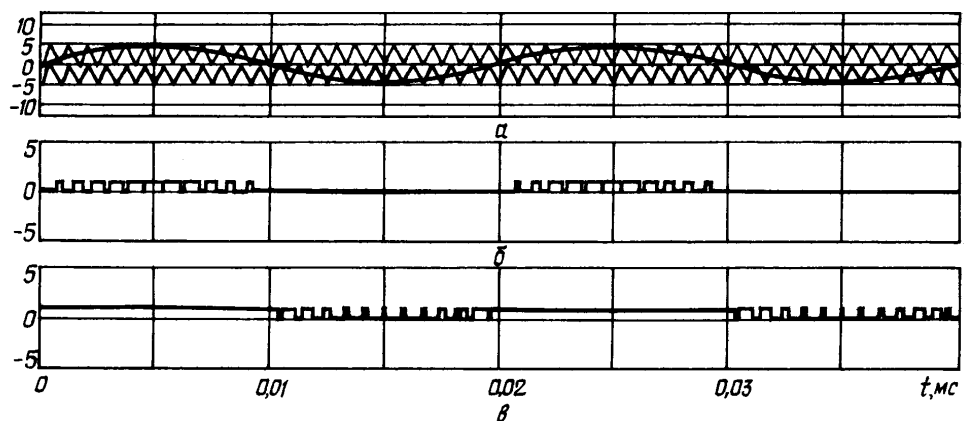


Рис. 5

личин выходных напряжений и частоты.

Результаты моделирования. На мониторах блоков Display...Display3 виртуальной модели АИН с рис. 3 можно снимать значения следующих параметров инвертора: U_{L1m} – амплитуда основной гармоники выходного фазного напряжения; U_{Ls} – действующее значение выходного фазного напряжения; I_{L1m} – амплитуда основной гармоники выходного фазного тока; I_{Ls} – действующее значение выходного фазного тока; φ_{LI} – фазный сдвиг между основными гармониками фазных тока и напряжения; I_{dsr} – среднее значение тока в цепи источника питания; $I_{d RMS}$ – действующее значение тока источника питания; $I_{T sr}$ – среднее значение тока транзистора IGBT; $I_{T RMS}$ – действующее значение тока транзистора. В результате имеется возможность расчета основных энергетических показателей во входной и выходной цепях инвертора.

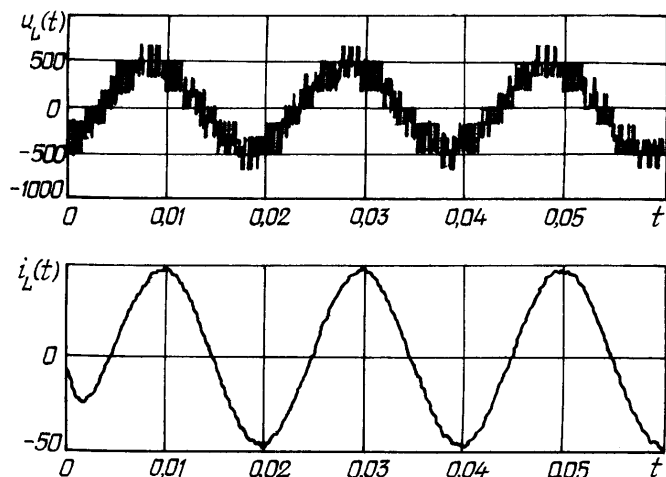


Рис. 6

Для примера временные диаграммы напряжения $u_L(t)$ и тока $i_L(t)$ фазы С нагрузки показаны на рис. 6. Кривые фазных напряжений на нагрузке $u_L(t)$ представляют собой равноступенчатые квазисинусоидальные кривые, а кривые токов нагрузки $i_L(t)$ являются практически синусоидальными.

Кривые фазных напряжений на нагрузке $u_L(t)$ представляют собой равноступенчатые квазисинусоидальные кривые, а кривые токов нагрузки $i_L(t)$ являются практически синусоидальными.

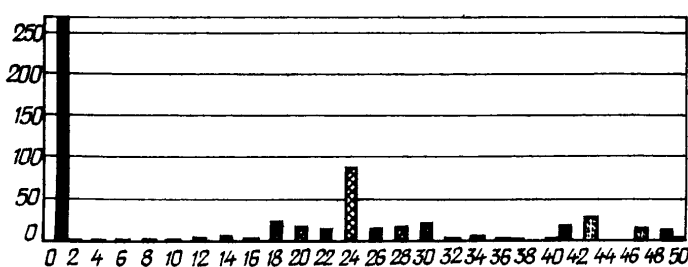


Рис. 7

Применение поуровневой синусоидальной ШИМ в АИН улучшает гармонические спектры выходных напряжений $u_L(t)$ благодаря ослаблению высокочастотных гармоник, близких основной гармонике, а также сдвигу значительных по величине высокочастотных гармоник в сторону высоких частот. Для примера гармонический спектр выходного напряжения АИН при $f_{mod}^* = 24$ и глубине модуляции $m_A = 0,9$ показан на рис. 7.

дуляции $m_A = 0,9$ показан на рис. 7.

В заключение можно отметить, что трехфазный трехуровневый АИН формирует на выходе трехфазную систему квазисинусоидальных напряжений и токов с независимым регулированием величин выходных напряжений и выходной частоты. Это подтверждает большую эффективность трехуровневых АИН в устройствах гарантированного питания по сравнению с использованием в их составе трехфазного конвенционального АИН.

Предложено и исследовано применение трехуровневых АИН в составе устройств гарантированного питания с целью расширения их функциональных возможностей. Рассмотрены построение этих устройств и принцип их работы.

Application 3-Level Inverter in structure of devices of the guaranteed feed with the purpose of expansion of their functionalities is offered and is investigated. Construction of these devices and a principle of their work is considered.

1. Гречко Э.Н. Многоуровневые инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией выходных напряжений // Техн. электродинамика. – 2005. – № 4. – С. 25–29.
2. Гречко Э.Н. Трехуровневый широтно-импульсный преобразователь // Техн. электродинамика. – 2005. – №5. – С. 33–37.
3. Greczko E., Gientkowski Z., Kurowski T. Półprzewodnikowe autonomiczne układy zasilania energią elektryczną prądu przemiennego // Wyd. WSiInż., Zielona Góra, 1996. – 225 s.

4. *Gautam Sinha, Thomas A.Lipo. A Four Level Inverter Based Drive With a Passive Front End, Proc. // IEEE-PESC'99 Conf. – P. 590–595.*

Надійшла 8.04.2009