

УДК 621.314.3

А. В. Переверзев, Д. А. Кузнецов

Многоуровневый автономный инвертор напряжения с одноуровневым источником напряжения

Предложена схема многоуровневого автономного инвертора напряжения (МАИН). Определены рабочая область входных напряжений и рабочих частот инвертора, получены соотношения для расчета его потерь мощности и коэффициента полезного действия (КПД). Даны рекомендации по выбору рабочих частот и числа уровней квантования напряжения МАИН.

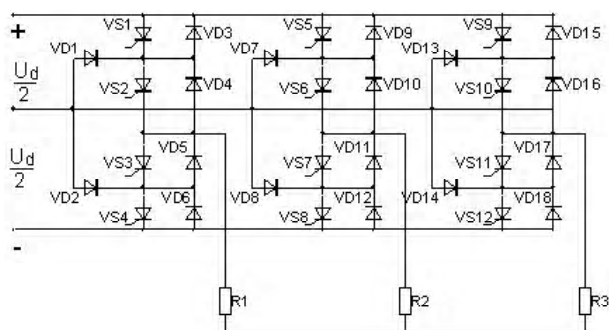
Создание современных систем автономного питания (с ветро- или дизель- генераторами) напряжением до 1кВ осуществляется с применением преобразователей частоты (ПЧ). При этом более эффективно задача снижения потерь мощности преобразования и повышения качества выходной энергии решается использованием в ПЧ многоуровневых автономных инверторов напряжения (МАИН) [1], которые характеризуются выходными напряжениями ступенчатой формы, аппроксимирующими синусоидальные сигналы. МАИН обладают следующими достоинствами: качество выходного напряжения приближается к принятым стандартам; силовые цепи инвертора могут выполняться на низко-вольтовых полупроводниковых приборах; более низкие по сравнению с одноуровневыми автономными инверторами потери мощности.

Проведенный анализ из [2, 3] существующих принципов построения силовых цепей и методов формирования выходного напряжения в МАИН позволяет выделить два основных способа построения многоуровневых преобразователей (МПЧ):

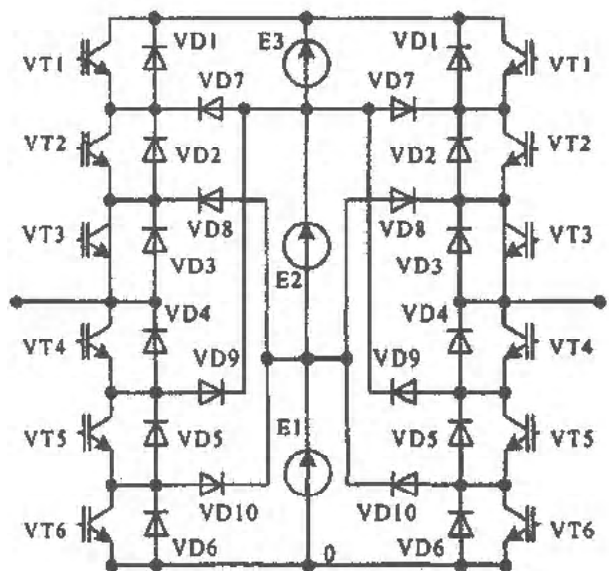
- преобразователи на базе МАИН с источником постоянного напряжения, имеющим несколько уровней напряжения (со схемой, показанной на рис. 1, а) [2];
- каскадные МПЧ с последовательным соединением инверторов и суммированием в выходных цепях напряжений изолированных источников постоянного тока (характеризуется схемой на рис.1, б) [4].

При увеличении в схеме МАИН на рис. 1, б числа уровней выходного напряжения увеличивается количество последовательно включенных силовых приборов, что приводит к возрастанию статических потерь. В схеме на рис. 1, б с каскадным включением с ростом уровней формируемого напряжения возрастает количество каскадов, силовых ключей и снижается КПД. Обои отмеченным выше способам построения МПЧ присуща общая проблема – необходимость использования нескольких независимых источников постоянного напряжения, что приводит к усложнению и удорожанию МПЧ с ростом числа формируемых уровней выходного напряжения.

Цель данной статьи – анализ предложенной новой схемы МАИН, получение для нее аналитических соотношений для расчета основных параметров и характеристик, рекомендаций по применению.



а)



б)

Рис. 1. Схема МАИН: а – с многоуровневым источником питания; б – каскадного.

Для решения описанных выше задач разработана схема четырехуровневого МАИН [5], представленная на рис. 2, в которой, благодаря соответствующему включению силовых приборов, достигается снижение потерь и повышение КПД схемы, а питание осуществляется от одного источника постоянного напряжения.

Принцип работы данного устройства поясним с помощью табл. 1 и табл. 2. В начальный момент все ключи закрыты и конденсаторы делителя C1, C2 и C3 заряжены. При открывании ключа VT2 из верхней параллельной группы и дополнительного ключа VT9 напряжение на нагрузке равняется напряжению конденсатора C2 (равному $U_d/3$, где U_d – полное напряжение источника питания постоянного тока). Когда конденсатор разрядится до допустимого граничного значения, закроется предыдущая группа ключей и откроются транзисторы VT3 и VT10, после чего к нагрузке подключится конденсатор C3. Этим достигается выравнивание уровня напряжения, формируемого емкостным делителем.

Следующий уровень напряжения, равный $2U_d/3$, формируется при включении транзисторов VT1 и VT9, после чего напряжение на нагрузке равняется напряжению конденсаторов C1 и C2. При уменьшении напряжения на нагрузке до допустимого граничного значения предыдущая группа ключей закрывается и включаются транзисторы VT2 и VT10, после чего напряжение на нагрузке становится равным напряжению конденсаторов C1 и C2.

Очередной уровень напряжения, равный U_d , формируется при включении транзисторов VT1 и VT10; после этого конденсаторы делителя заряжаются для осуществления последующего этапа формирования выходного напряжения. Последующий алгоритм работы силовых ключей соответствует обратному порядку, по сравнению с выше описанным (согласно табл. 1).

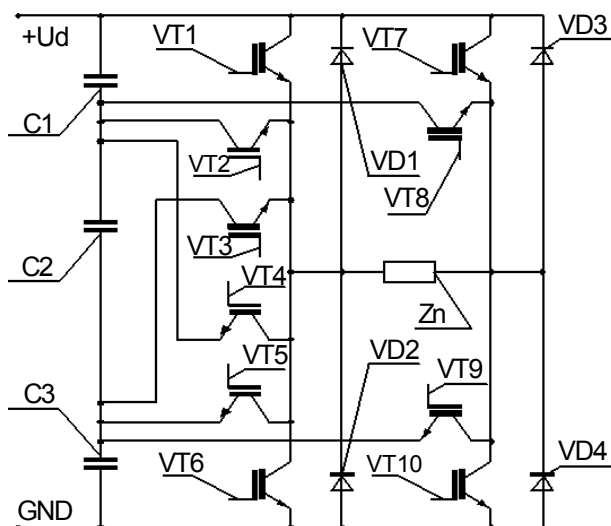


Рис. 2. Электрическая схема четырехуровневого инвертора напряжения

Формирование отрицательной полуволны выходного напряжения инвертора выполняется по алгоритму, аналогичному формированию положительной полуволны, но – для нижней группы силовых ключей и дополнительных ключей VT7 и VT8 (согласно табл. 2). Применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в пределах каждого формируемого уровня напряжения значительно снижает коммутационные потери мощности в силовых ключах, так как с частотой ШИМ коммутируется не полное значение напряжения U_d , а только его часть – $U_d/3$.

Для сброса энергии, накопленной в нагрузке и других цепях при протекании коммутируемого тока, и исключения перенапряжения на силовых ключах служат обратные диоды. Для основных последовательно соединенных ключей VT1 и VT6 включены диоды VD1 и VD2, а для параллельных ключей в момент коммутации при ШИМ открывается соответствующий силовой ключ: для транзистора VT2 – открывается транзистор VT4, для транзистора VT3 – открывается транзистор VT5. Таким образом, при ШИМ в момент коммутации напряжения и формирования положительной полуволны роль обратного диода для транзистора VT2 выполняет транзистор VT4, а для транзистора VT3 – роль обратного диода выполняет транзистор VT5.

В табл. 1 показаны состояния ключей инвертора, где «0» – соответствует закрытому состоянию ключа, «1» – открытому состоянию при ШИМ, «2» – открытому состоянию. Для осуществления возможности использования одноуровневого источника питания постоянного тока в схему введены дополнительные силовые ключи VT8 и VT9, позволяющие реализовать алгоритм управления в соответствии с табл. 2.

Оценим область значений входных напряжений, частот и количество уровней для рационального применения предложенного четырехуровневого МАИН. Для этого определим коэффициент полезного действия (КПД) этого МАИН в зависимости от указанных величин.

Таблица 1. Алгоритм коммутации силовых ключей МАИН

VT1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VT2	0	1	2	2	1	0	0	2	0	0	0	0	2	0
VT3	1	2	0	0	2	1	0	0	2	0	0	2	0	0
VT4	0	2	0	0	2	0	0	1	2	0	0	2	1	0
VT5	2	0	0	0	0	2	0	0	1	2	2	1	0	0
VT6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
VT7	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	0
VT10	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2. Режимы заряда/разряда емкостей делителя постоянного напряжения

Напряжение нагрузки	Конденсаторы, подключаемые к нагрузке	Конденсаторы, находящиеся в режиме зарядки	Открытые силовые ключи	Интервал работы МАИН
$U_d/3$	C2 C3	C2	VT2, VT9 VT3, VT10	[0; π]
$2U_d/3$	C1+C2 C2+C3	C3 C1	VT1, VT9 VT2, VT10	
U_d	C1+C2+C3	C2, C3	VT1, VT10	
$2U_d/3$	C2+C3 C1+C2	C3	VT2, VT10 VT1, VT9	
$U_d/3$	C3 C2	C1, C2 C3	VT3, VT10 VT2, VT9	
0	–	C1, C2, C3	–	
$U_d/3$	C2 C1	C2	VT8, VT5 VT7, VT4	[π ; 2π]
$2U_d/3$	C2+C3 C1+C2	C1 C3	VT8, VT6 VT7, VT5	
U_d	C1+C2+C3	C1, C2	VT7, VT6	
$2U_d/3$	C1+C2 C2+C3	C1	VT7, VT5 VT8, VT6	
$U_d/3$	C1 C2	C2, C3 C1	VT8, VT5 VT7, VT4	
0	–	C1, C2, C3	–	

КПД η рассчитаем по формуле [6]:

$$\eta = \frac{P - \Delta P}{P} = 1 - \frac{\Delta P}{P}, \quad (1)$$

где P – потребляемая инвертором мощность, ΔP – мощность потерь в инверторе.

Используя известные соотношения [6], найдем мощности P и ΔP через входное напряжения U_d , частоту коммутации f силовых ключей и количество формируемых уровней h выходного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} P &= U_d \cdot I_d, \\ \Delta P &= P_s + P_d + \sum P_{VD(VT)} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где I_d – входной ток инвертора; P_s – мощность статических потерь, P_d – мощность динамических потерь; $\sum P_{VD(VT)}$ – сумма потерь мощности в обратных диодах и ключах (в моменты времени выполнения последними функций обратных диодов).

Определим статические потери [6]:

$$P_s = (U_{CE}^{MOD} + \frac{1}{h} \sum_i U_{CE}^i) I_C \frac{M}{\pi}, \quad (3)$$

где U_{CE}^{MOD} – остаточное напряжение на открытом модулирующем ключе; U_{CE}^i – остаточное напряжение

на приборах, работающих с частотой ШИМ; M – коэффициент модуляции; I_C – средний ток, протекающий через силовой ключ.

Динамические потери находим из соотношения [6]:

$$P_d = P_{on} + P_{off}, \quad (4)$$

где P_{on} – мощность потерь при включении силового прибора; P_{off} – мощность потерь при выключении силового прибора.

Подставив (2), (3) и (4) в (1), получим выражение для расчета КПД исследуемого МАИН:

$$\eta = 1 - \frac{(U_{CE}^{MOD} + \frac{1}{h} \sum_i U_{CE}^i) I_C \frac{M}{\pi} + P_{on} + P_{off} + \sum P_{VD(VT)}}{U_d I_d}. \quad (5)$$

В качестве примера проведем анализ полученного соотношения (5) для рассмотренного МАИН, реализованного на основе IGBT-транзисторов.

Статические потери мощности определим следующим образом [6]:

$$P_s = U_{CE} \cdot I_C \cdot n \cdot \frac{M}{\pi}, \quad (6)$$

где U_{CE} – прямое падение напряжения на открытом ключе (для IGBT-транзисторов, предназначенных для

работы в рассматриваемом диапазоне частот, оно характеризуется значениями от 2,5В до 3,2В); n – количество ключей в цепи тока нагрузки.

Динамические потери находим из соотношения [6]:

$$P_d = \frac{n \cdot U_k^2}{24 \cdot L_s} \cdot t_{on}^2 \cdot f + \frac{n \cdot I_{k,max}^2}{24 \cdot C_s} \cdot t_{off}^2 \cdot f = \frac{n \cdot f}{24} \cdot \left(\frac{U_k^2 \cdot t_{on}^2}{L_s} + \frac{I_{k,max}^2 \cdot t_{off}^2}{C_s} \right), \quad (7)$$

где U_k – коммутируемое напряжение силовым ключом, $I_{k,max}$ – максимальный коллекторный ток коллектора IGBT-транзистора, t_{on} и t_{off} – времена включения и выключения силовых приборов соответственно; f – опорная частота ШИМ; L_s и C_s – индуктивность снабберной и емкость демпфирующей цепи соответственно.

Индуктивность L_s и емкость C_s рассчитаем из выражений [6]:

$$\left. \begin{aligned} L_s &= \frac{U_d}{\frac{di}{dt}} \approx \frac{U_k}{\frac{I_{k,max}}{t_{on}}}, \\ C_s &\approx I_{k,max} \cdot \frac{t_{off}}{2 \cdot U_k} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Подставив (8) в (7), получим соотношение для расчета мощности динамических потерь МАИН для рассматриваемого случая:

$$P_d = \frac{n \cdot f \cdot U_k \cdot I_{k,max}}{24} \cdot (t_{on} + 2 \cdot t_{off}). \quad (9)$$

Подставив выражения (6) и (9) в (5), найдем выражение для расчета КПД многоуровневого инвертора, реализованного на IGBT-транзисторах:

$$\eta = 1 - \frac{U_{CE} \cdot I_c \cdot n \cdot \frac{M}{h \cdot \pi} + \frac{n \cdot f}{24} \cdot U_k \cdot I_{k,max}}{U_d \cdot I_d} \times \frac{(t_{on} + 2 \cdot t_{off}) + \sum P_{VD(V)}}{U_d \cdot I_d}. \quad (10)$$

Преобразуем (10) к виду, позволяющему выполнить анализ зависимостей КПД от опорной частоты ШИМ (f), количества уровней (h) и напряжения на входе инвертора (U_d). Для этого выразим средний ток транзистора I_c через максимальный ток нагрузки $I_{n,max}$ в виде:

$$I_c = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{n,max} \cdot \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{I_{n,max}}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \varphi) \Big|_{\varphi=0} = \frac{I_{n,max}}{\pi}. \quad (11)$$

Примем следующие допущения:

$$\left. \begin{aligned} I_{k,max} &= I_{n,max}; \\ I_d &= \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n,max}}{\pi}; \\ U_k &= U_d / h; \\ \sum P_{VD(VT)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Подставляя (11) и (12), в (10) получим:

$$\eta(f) = 1 - \frac{\left[\frac{U_{CE} \cdot n \cdot M}{\pi} + \frac{\pi \cdot n \cdot f \cdot U_d \cdot (t_{on} + 2t_{off})}{24h} \right]}{2\sqrt{2}U_d}. \quad (13)$$

Сравнивая соотношения (13) и (1) между собой и учитывая зависимости (2), получим из (13) соотношение для расчета относительных значений статических ($P_V = P_s / P$) и динамических ($P_k = P_d / P$) потерь мощности:

$$\left. \begin{aligned} P_V &= \frac{U_{CE} \cdot n \cdot M}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot U_d}, \\ P_k &= \frac{\pi \cdot n \cdot f \cdot (t_{on} + 2 \cdot t_{off})}{24 \cdot h \cdot 2\sqrt{2}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Проведем анализ зависимостей (13) и (14) для КПД, статических потерь мощности P_V , динамических потерь мощности P_k от: опорной частоты ШИМ (f), количества уровней выходного напряжения и величины входного напряжения U_d инвертора.

На рис. 3 показана рассчитанная из (13) зависимость КПД инвертора от частоты, для следующих численных значений параметров инвертора: $U_d = 360$ В, $U_{CE} = 3,2$ В, $n = 2$, $f_{nes} = 1000 \dots 36000$ Гц, $h = 3$, $t_{on} = 10^{-6}$ с, $t_{off} = 6,5 \cdot 10^{-7}$ с, $M = 0,95$. Как видно из рис. 4, при изменении опорной частоты ШИМ от 1 до

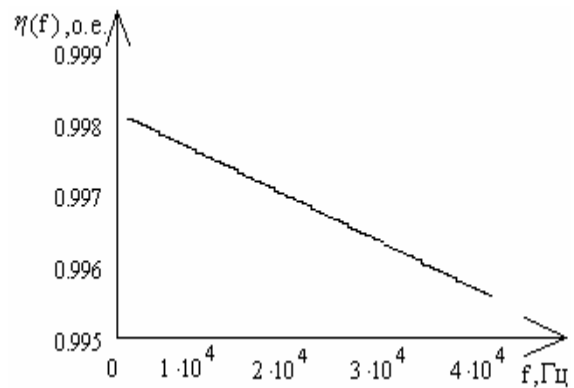


Рис. 3. Зависимость КПД от опорной частоты

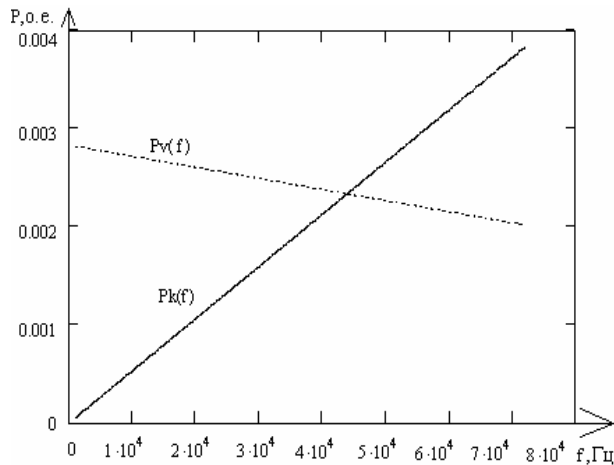


Рис. 4. Зависимость потерь в инверторе от изменения частоты

36 кГц наблюдается незначительное снижение КПД (в итоге результата роста динамических потерь в силовых приборах и при небольшом уменьшении статических потерь согласно рис. 4 за счет уменьшения коэффициента модуляции).

На рис. 5 представлены зависимости относительных потерь ($P_v(h) = P_s / P$, $P_k(h) = P_d / P$) в четырехуровневом МАИН от количества формируемых уровней h при неизменной опорной частоте ($f = 36000$ Гц) и входном напряжении ($U_d = 360$ В), которые рассчитаны из (14) (с теми же значениями параметров инвертора).

Из рис. 5 видно, что при увеличении числа уровней выходного напряжения МАИН, наблюдается снижение динамических потерь, а статические потери оста-

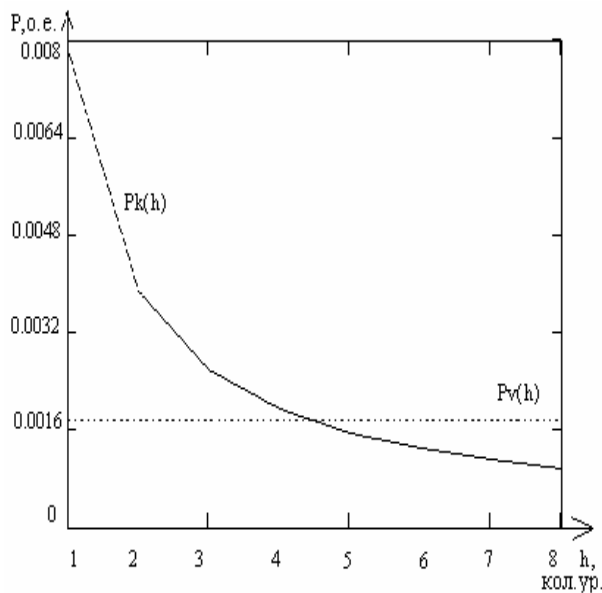


Рис. 5. Зависимость потерь от количества уровней выходного напряжения

ются неизменными. Это объясняется тем, что в контуре тока нагрузки при формировании разных потенциальных уровней выходного напряжения количество силовых ключей не изменяется. Уменьшение динамических потерь P_d (рис. 5) связано с уменьшением значений коммутируемых напряжений на силовых приборах при увеличении количества уровней ($U_k = U_d / h$), что также является причиной некоторого увеличения КПД (рис. 6).

На рис. 7 и рис. 8 приведены зависимости потерь мощности, КПД многоуровневого инвертора от значе-

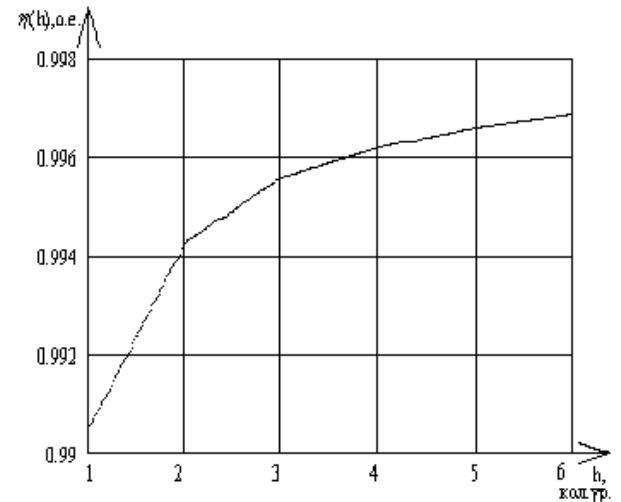


Рис. 6. Зависимость КПД от количества уровней выходного напряжения

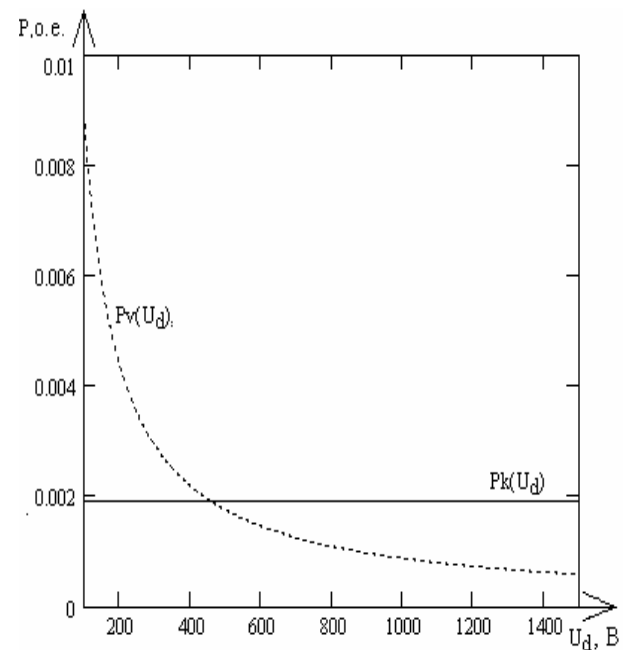


Рис. 7. Зависимость потерь в инверторе от изменения входного напряжения

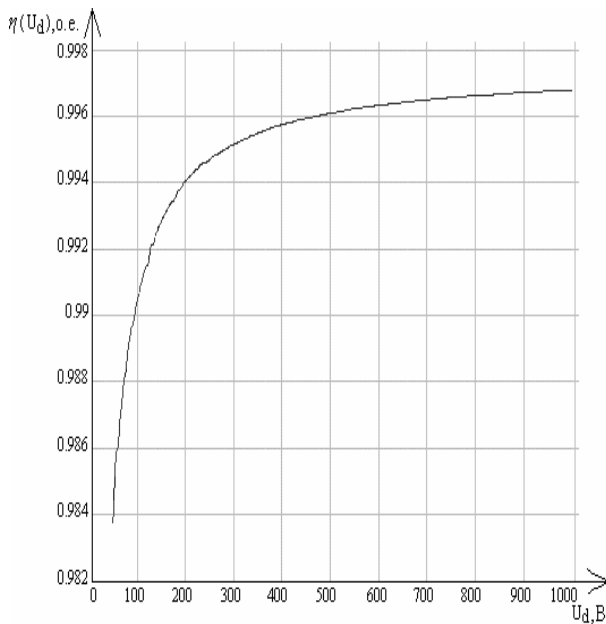


Рис. 8. Зависимость КПД от входного напряжения

ния входного напряжения (U_d) при фиксированных значениях частоты ($f = 36$ кГц) и количества уровней ($h = 3$). Как видно из рис. 7, с увеличением входного напряжения инвертора относительное значение статических потерь мощности уменьшается (при этом абсолютное значение статических потерь мощности с принятыми допущениями не изменяется), что и является причиной возрастания КПД исследуемого инвертора (рис. 8).

Выводы

1. Установлена возможность создания многоуровневого АИН с одноуровневым источником питания. Выявлено, что с увеличением количества уровней ($h = 3, 4$), формируемого выходного напряжения за-

метно увеличивается КПД преобразования. Большое количество уровней можно считать нецелесообразным, так как КПД далее растет незначительно, но при этом существенно возрастает количество силовых приборов и увеличиваются соответственно массогабаритные показатели инвертора.

2. КПД многоуровневого инвертора с увеличением частоты преобразования уменьшается незначительно. При этом до частот, равных 45 кГц, можно считать, что частотный диапазон МАИН определяется частотными свойствами используемых силовых приборов.

3. Анализ зависимости КПД многоуровневого АИН от значения питающего напряжения свидетельствует о целесообразности использования МАИН при входных напряжениях более 400 В. Максимальные значения входных напряжений ограничиваются параметрами используемых силовых приборов и количеством уровней формируемого напряжения.

Перечень ссылок

1. Руденко В. С., Гончаров Ю. П., Будьонний О. В., Морозов В. Г. Перетворювальна техніка: Підручник, Ч2, Вид-во – Харків: Фоліо, 2000 – 360 с.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Уч. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Асанов А. З., Романовский Э. А. Плавное регулирование уровня сигнала в многоуровневых инверторах напряжения // Электротехника. – 2000 – № 12. – С. 21–26.
4. Никитин В. М. Управление значением выходного напряжения трехфазного инвертора // Электротехника. – 1996 – № 4 – С. 34–40.
5. Переверзев А. В., Кузнецов Д. А. Многоуровневый инвертор напряжения: патент № 18870, 2006.
6. Семенов В. В. Основы автономных преобразователей: Уч. пособие. – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 40 с.

Поступила в редакцию 08.10.07 г.

После доработки 30.11.07 г.

Запропоноване схемне рішення автономного багаторівневого інвертора напруги. Визначені робоча область вхідних напруг і робочих частот інвертора, отримано співвідношення для розрахунку його втрат та ККД. Надані рекомендації до вибору робочих частот і кількості рівней квантування вихідної напруги інвертора.

The circuit of the multilevel independent inverter of voltage is offered. The working area of input voltage and working frequencies of the inverter are determined; parties for calculation of its losses and efficiency are received. Change of efficiency from input voltage size is investigated and recommendations are given as to the choice of working frequencies and level numbers of target voltage quantization.