

УДК 621.314.1

В.И. Авдзейко, А.А. Дроздова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов

Анализ способов формирования дискретных зон в конверторах с многозонным регулированием выходных параметров

Источники электропитания, работающие в ключевом режиме работы, создают импульсный характер потребляемого тока, приводящего к возникновению пульсаций тока и напряжения в питающей сети и на входе подключаемых потребителей. Традиционные схемы конверторов строятся на основе однотактных преобразователей или инверторов с полным диапазоном регулирования выходных параметров. Силовые элементы данных конверторов рассчитываются на полную мощность преобразуемой электрической энергии, а на выходе регулируемого инвертора формируется импульсное напряжение, амплитуда и длительность которого оказывают значительное влияние на параметры входных и выходных фильтров. Одним из эффективных путей снижения этого влияния является способ многозонного регулирования, основанный на разбиении диапазона регулирования на несколько зон. Проведен сравнительный анализ данных вариантов конверторов по размаху пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров, по величине тока ключей, а также по условиям возникновения режима прерывистых токов в зависимости от количества зон. Доказано преимущество разбиения диапазона регулирования на зоны с равномерным шагом квантования, а также эффективность этих схем по сравнению с конверторами с полной и неполной глубиной модуляции регулируемого параметра. Анализ вариантов схем с равномерными и неравномерными шагами квантования проведен на моделях, построенных с помощью программы MatLab Simulink.

Ключевые слова: конвертор, пульсации тока и напряжения, многозонное регулирование, импульсная составляющая, прерывистые токи, диапазон регулирования.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-133-139

В системах электропитания (СЭП) согласование параметров первичных источников электропитания с входными параметрами подключаемых потребителей обеспечивается статическими преобразователями. В СЭП постоянного тока эту задачу выполняют конверторы – преобразователи постоянного тока в постоянный ток (DC/DC). Снижение влияния конверторов, работающих в ключевом режиме работы, на питающую сеть и на работу потребителей обеспечивается сглаживающими входными и выходными фильтрами [1]. Традиционные схемы конверторов выполняются на однотактных, двухтактных или мостовых схемах, а регулирование выходных параметров осуществляется путем изменения длительности работы ключей от нуля до максимальной величины. Преобразователи с полным диапазоном регулирования получили название устройств с полной глубиной модуляции [2, 3], их силовые элементы рассчитываются из условия преобразования, регулирования и фильтрации полной мощности нагрузки, а напряжение на входе выходного фильтра содержит только регулируемую импульсную составляющую (U_{per}), амплитуда и длительность которой влияет на величину индуктивности и емкости входных и выходных фильтров.

Схемы с неполной глубиной модуляции позволяют уменьшить параметры фильтров [4–6], у которых осуществляется регулирование только части преобразуемой электрической энергии, а на входе выходного фильтра формируется напряжение, содержащее нерегулируемую постоянную (U_{np}) и регулируемую импульсную (U_{per}) составляющие. Нерегулируемая составляющая не требует фильтрации, а амплитуда и длительность регулируемой составляющей выбираются из условия обеспечения требуемого диапазона регулирования и не превышают 20% [4]. Недостатки подобных схем заключаются в ограниченном диапа-

зоне регулирования, в необходимости использования дополнительного внешнего источника электропитания и гальванической связи входных и выходных цепей.

Увеличить диапазон регулирования выходного напряжения преобразователей при снижении амплитуды импульсной составляющей позволяют способы многозонного широтно-импульсного регулирования (МР), предложенные и разработанные коллективом сотрудников ТУСУРа (г. Томск) под руководством профессора А.В. Кобзева [7, 8]. Принцип МР заключается в разбиении диапазона регулирования на несколько зон. Дискретное изменение выходного напряжения осуществляется путем переключения из одной зоны в другую, а внутри каждой зоны – с помощью широтно-импульсного регулирования [8, 9]. Преимущество и перспективность использования способов МР в преобразовательной технике обоснованы в публикациях [2, 3, 10–18].

Цель работы – анализ способов формирования дискретных зон в конверторах с многозонным регулированием выходных параметров.

Актуальность результатов проведенных исследований заключается в разработке перспективных способов МР выходного напряжения конверторов, обеспечивающих увеличение диапазона регулирования при снижении параметров силовых элементов.

Новизна исследований способов МР подтверждается использованием в качестве критерия оценки параметров элементов относительной импульсной составляющей; результатами анализа способов формирования зон; установленными зависимостями размаха пульсаций, тока регулируемых ключей, диапазона регулирования выходного напряжения и условий возникновения режимов прерывистых токов для исследуемых способов при изменении количества зон;

доказательством эффективности способов МР в СЭП постоянного тока средней и повышенной мощности.

Анализ способов формирования зон

Способы формирования дискретных зон в зависимости от метода квантования подразделяются на два – с равномерным и неравномерным шагом квантования. При первом способе все формируемые зоны выбираются равными, поэтому величина относительной импульсной составляющей в процессе регулирования изменяется ($n = U_{\text{рег}}/U_{\text{нр}} = \text{var}$), а во втором в каждой зоне величина относительной импульсной составляющей поддерживается постоянной ($n = U_{\text{рег}}/U_{\text{нр}} = \text{const}$).

В зависимости от способа формирования зон и их количества меняются величина относительной импульсной составляющей, размах пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров, а также амплитуда тока ключей регулируемых инверторов. Для определения зависимости величины относительной импульсной составляющей от количества зон и выбора оптимального варианта проведен сравнительный анализ способов $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$. Особенность исследуемых вариантов заключается в формировании нерегулируемой составляющей $U_{\text{нр}}$ в первой зоне, напряжение которой выбирается в соответствии с выражением

$$\sum U_{\text{нр}} = U_{\text{max}}/k, \tag{1}$$

где $k = l+1$ – общее количество зон; l – количество регулируемых зон; $U_{\text{max}} = U_{\text{нр}} + U_i$ – максимальное напряжение на выходе выпрямителя.

Для способа $n = \text{const}$, напряжение формируемых зон можно представить с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{нр}} + U_{\text{нр}} n = U_{\text{нр}} (1+n); \\ U_2 &= U_1 + U_1 n = U_{\text{нр}} (1+n)^2; \\ U_3 &= U_2 + U_2 n = U_{\text{нр}} (1+n)^2 + (1+n); \\ &\dots\dots\dots; \\ U_i &= U_{\text{нр}} (1+n)^k, \end{aligned} \tag{2}$$

где U_i – верхняя зона.

В табл. 1 приведены значения относительной импульсной составляющей, величина напряжения формируемых уровней, рассчитанные по выражению (2), и диапазон регулирования выходного напряжения (8) для количества регулируемых зон от 2 до 5 для способа $n = \text{const}$.

При способе $n = \text{var}$ весь диапазон регулирования выходного напряжения разбивается на равное количество зон, а первая зона выполняется нерегулируемой. Напряжение для каждой формируемой зоны можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{\text{нр}} + \Delta U; \\ U_2 &= U_1 + \Delta U = U_{\text{нр}} + 2\Delta U; \\ U_3 &= U_2 + \Delta U = U_{\text{нр}} + 3\Delta U; \\ &\dots\dots\dots; \\ U_i &= U_{\text{нр}} + \Delta U i, \end{aligned} \tag{3}$$

где ΔU – шаг квантования по уровню.

В соответствии с (3) в табл. 1 представлены значения n , напряжения формируемых уровней и диапазон регулирования выходного напряжения для количества регулируемых зон от 2 до 5 для способа $n = \text{var}$.

Оба способа позволяют получить равные диапазоны регулирования выходного напряжения при одинаковом количестве зон.

Таблица 1

Относительные величины импульсной составляющей и формируемых уровней напряжения для способов $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$ при изменении количества регулируемых зон

Кол-во формируемых зон, l	$l = 2$		$l = 3$			$l = 4$				$l = 5$				
Диапазон регулирования, δ	0,67		0,75			0,8				0,83				
$n = \text{const}$														
Относительная импульсная составляющая, n	0,75		0,6			0,5				0,43				
Относительная величина формируемых уровней напряжения, U_i	0,57	1,0	0,39	0,62	1,0	0,30	0,44	0,66	1,0	0,24	0,34	0,49	0,69	1,00
$n = \text{var}$														
Относительная импульсная составляющая, n	1,0	0,5	1,0	0,5	0,3	1,0	0,5	0,33	0,25	1,0	0,5	0,33	0,25	0,2
Относительная величина формируемых уровней напряжения, U_i	0,67	1,0	0,5	0,75	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0	0,33	0,5	0,67	0,83	1,0

При способе $n = \text{const}$ величина относительной импульсной составляющей остается постоянной, а при $n = \text{var}$ она уменьшается при переходе из низшей в более верхнюю зону при неизменном количестве l . Для выявления зависимости параметров элементов схем от n выбран метод исследования конвертора на схемотехнической модели, созданной с помощью программы MATLAB Simulink, позволяющий учитывать большое количество переменных [19–22].

Принцип формирования выходного напряжения конвертора с МР

На рис. 1 приведена упрощенная схема конвертора с МР. В ее состав входят: входной фильтр ($L1$,

$C1$), инверторы напряжения ($И1$, $И2$ и $И3$) с выходными трансформаторами $Тр1$, $Тр2$ и $Тр3$, выходные обмотки которых w_{12} , w_{22} и w_{32} соединены последовательно и включены на вход выпрямителя ($Д1$ – $Д4$), к выходу которого через выходной фильтр ($L2$, $C2$) подключена нагрузка R_n .

Формирование зон основано на суммировании выходных напряжений мостовых инверторов путем последовательного соединения их вторичных обмоток и осуществляется следующим образом. Первый инвертор $И1$ работает в нерегулируемом режиме и формирует на нагрузке нерегулируемую составляющую выходного напряжения $U_{\text{нр}1} = U_i/k$. Выходное

напряжение остальных инверторов может быть равным нулю или суммироваться с выходными напряжениями вторичных обмоток и, соответственно, формирует последовательно – нулевое, регулируемое и нерегулируемое по длительности напряжение со 180-градусным управлением.

В первой зоне работает только инвертор И1, напряжение на входе выпрямителя равно U_1 . Алгоритм работы ключей инверторов И2 и И3 обеспечивает нулевое напряжение на выходных обмотках w_{22} и w_{32} . Во второй зоне инвертор И1 формирует напряжение U_1 , а инвертор И2 работает в режиме с широтно-импульсным регулированием. На вход выпрямителя поступает суммарное напряжение U_1+U_2 , выходное напряжение инвертора И3 равно нулю. В третьей зоне инверторы И1 и И2 переключаются синфазно со 180-градусным управлением, нерегулируемая составляющая на входе выпрямителя равна $U_{нр} = U_1+U_2$. Инвертор И3 формирует регулируемое по длительности напряжение U_3 , которое суммируется с напряжениями U_1 и U_2 . Далее процесс, при наличии дополнительных инверторов, происходит аналогично. Диапазон регулирования выходного напряжения $\delta = U_{пер}/U_{пер}+U_{нр}$ и величина относитель-

ной импульсной составляющей $n_i = U_{пер i}/U_{нр i}$ в каждой зоне зависят от способа формирования зон и от их количества.

В связи с тем, что амплитуда и длительность импульсной составляющей прямо пропорциональны размаху пульсаций на элементах фильтров и току ключей инверторов, ее относительная величина выбрана в качестве критерия оценки эффективности способов регулирования выходного напряжения конверторов.

Исследование влияние величины относительной регулируемой импульсной составляющей на параметры элементов многозонного конвертора

Установление зависимости размаха пульсаций тока дросселей, напряжения на конденсаторах фильтров и тока регулируемых ключей инверторов от импульсной составляющей и от количества и способа формирования дискретных зон выполнено с помощью схемотехнической модели конвертора с МР (рис. 1), созданной с помощью программы MatLab Simulink, позволяющей учитывать большое количество переменных [19, 20].

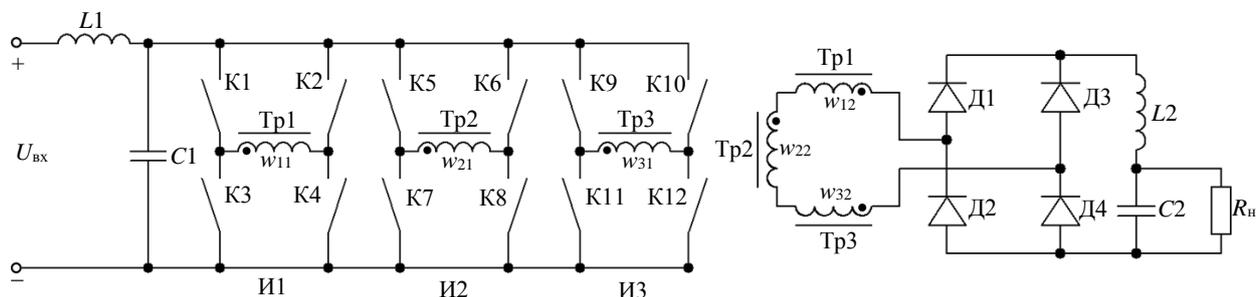


Рис. 1. Упрощенная силовая схема конвертора с МР

В процессе исследования выбраны следующие параметры схемы: входное и выходное напряжение конвертора равно 300 В, максимальная мощность нагрузки 1000 ВА, номинальное выходное напряжение 225 В, частота коммутации регулируемого инвертора равна $f = 10$ кГц, сопротивление нагрузки $R_n = 87,23$ Ом, $L1 = 1,1$ мГн, $C1 = 80$ мкФ, $L2 = 1,2$ мГн, $C2 = 65$ мкФ. Предварительный расчет параметров фильтров выполнен с помощью формул, приведенных в статье [18]. Параметры фильтров выбраны из следующих условий: размах пульсаций потребляемого тока ($\Delta I_n = \Delta I_{L1}$) во всех режимах не должен превышать 0,1% $I_{н max}$, а размах пульсаций напряжения на конденсаторах (ΔU_{C1} и ΔU_{C2}) не должен превышать 0,1% $U_{н max}$ во всем диапазоне регулирования выходного напряжения. При разработке модели приняты допущения об идеальности всех элементов схемы и неизменности тока нагрузки и напряжения питания в период проведения измерений.

На рис. 2 приведены диаграммы напряжения и токов на элементах входных и выходных фильтров при двух зонах регулирования: $n = const = U_{пер}/U_{нр} = 0,33$ и $\Delta U = 100$ В. Ток дросселя $L1$ содержит постоянную составляющую тока потребления $I_{потр}$ и импульсную ΔI_{L1} , характеризующую влияние конвертора на питающую сеть. Напряжение на конденсаторе $C1$ ($U_{вх}$) является напряжением питания инверторов И1–И3. Ток

дросселя $L2$ содержит постоянную составляющую, равную току нагрузки, и импульсную составляющую, влияющую, как будет показано ниже, на возникновение режима прерывистых токов в дросселе $L2$. U_{C2} является напряжением питания потребителей, а размах пульсации напряжения ΔU_{C2} ограничивается требованиями потребителя и ТУ конденсаторов.

Первый нерегулируемый инвертор при $n = const$ и $n = var$ выполняется со 180-градусным управлением и формирует нерегулируемую составляющую с амплитудой U_{max}/k в форме напряжения на выходе выпрямителя. Алгоритм работы регулируемых инверторов при переходе из нижней в верхнюю зону приведен выше. Амплитудные значения напряжений формируемых зон и напряжений на вторичных обмотках трансформаторов инверторов, в зависимости от количества регулируемых зон и способа их формирования, в процессе моделирования устанавливались в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.

Исследования показали, что размах пульсаций тока дросселей и напряжения на конденсаторах фильтров достигает максимальных значений при работе схемы в верхнем диапазоне регулирования при формировании любого количества l при длительности регулируемого импульса $\Theta = T/4$. На рис. 3 приведены графики размаха пульсаций на элементах фильтров

при $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$ по критерию относительной импульсной составляющей.

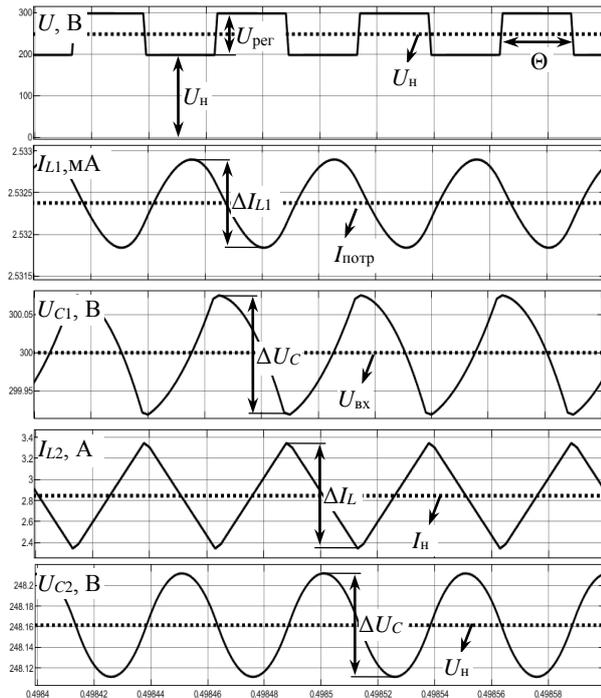


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов на элементах фильтров

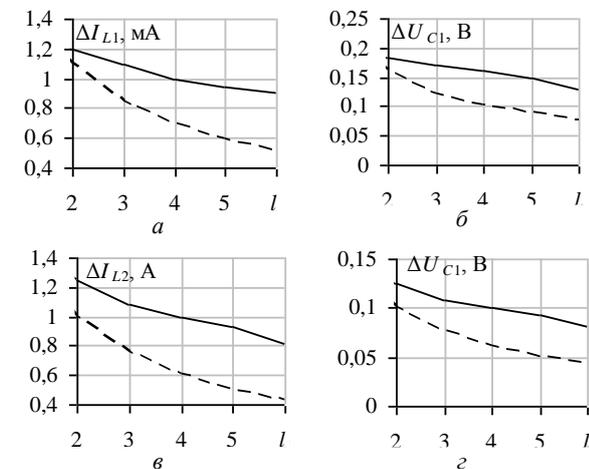


Рис. 3. Размах пульсаций на элементах входного (а, б) и выходного (в, г) фильтров при увеличении количества регулируемых зон для способа $n = \text{const}$ (—) и $n = \text{var}$ (---)

Из рис. 3 видно, что при $n = \text{const}$ в диапазоне изменения l от 2 до 6 размах пульсаций тока дросселя (ΔI_{L1}) и напряжения на конденсаторе (ΔU_{C1}) входного фильтра уменьшается в 1,4 раза, а на элементах выходного фильтра – в 1,5 раза. Для $n = \text{var}$ размах пульсаций тока дросселя (ΔI_{L1}) и напряжения на конденсаторе (ΔU_{C1}) входного фильтра с ростом l от 2 до 6 уменьшается в 2,7 раза, а на элементах выходного фильтра (ΔI_{L2} и ΔU_{C2}) – в 3,5 раза. Эффективность способа формирования дискретных зон при $n = \text{var}$ увеличивается с ростом количества формируемых зон.

Исследование режимов прерывистых токов

Ток дросселя выходного фильтра I_{L2} , как показано на рис. 4, содержит импульсную ΔI_{L2} и постоянную составляющие $I_L = I_n$.

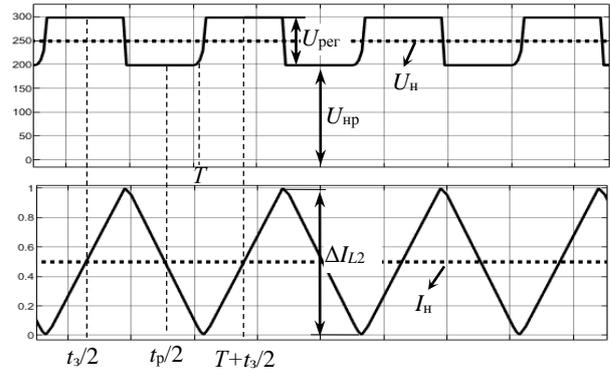


Рис. 4. Диаграммы напряжения на входе выходного фильтра и ток дросселя $L2$ при возникновении режима прерывистых токов

Постоянная составляющая определяется напряжением на нагрузке U_n и сопротивлением нагрузки R_n , а импульсная – амплитудой и длительностью импульсной составляющей U_{per} на входе выходного фильтра. В промежутке времени от $t_{3/2}$ до $t_p/2$ ток пульсации ΔI_{L2} суммируется с током нагрузки I_n , а на отрезке времени от $t_p/2$ до $T + t_{3/2}$ вычитается из тока нагрузки. При уменьшении тока нагрузки постоянная составляющая I_n также снижается, и при условии равенства $I_n = \Delta I_{L2}/2$ ток дросселя становится равным нулю и возникает режим прерывистых токов.

На рис. 5 представлены расчетные значения минимального тока нагрузки в зависимости от количества регулируемых зон, при которых возникает режим прерывистых токов для способов $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$.

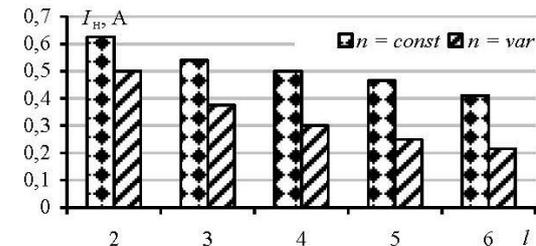


Рис. 5. Минимальные значения тока нагрузки при которых возникает режим прерывистых токов при изменении l для $n = \text{const}$ и $n = \text{var}$

Способ $n = \text{var}$ обеспечивает меньшую величину пульсации тока дросселя при изменении тока нагрузки и увеличении l , чем при $n = \text{const}$. В соответствии с рис. 4 при $l = 2$ диапазон изменения тока нагрузки находится в пределах от 0,625 до 3,44 А ($\delta = 0,818$) при $n = \text{const}$ и от 0,5 до 3,44 А ($\delta = 0,855$) при $n = \text{var}$, а при $l = 5$ $I_{n \text{ min}} = 0,465$ А ($\delta = 0,881$) при $n = \text{const}$ и 0,25 А ($\delta = 0,927$) при $n = \text{var}$.

Таким образом, оба способа МР позволяют увеличивать диапазон регулирования тока нагрузки, но способ $n = \text{var}$ обеспечивает меньшую величину пульсации тока дросселя и больший диапазон регулирования тока нагрузки, чем способ $n = \text{const}$.

Исследование влияния количества зон на величину тока ключей регулируемых инверторов

При МР ток ключей регулируемых инверторов зависит от количества зон и способа их формирования. Ключи нерегулируемых инверторов переключаются со 180-градусным управлением. На рис. 6 при-

ведены средние значения тока ключей при изменении количества зон для обоих способов их формирования.

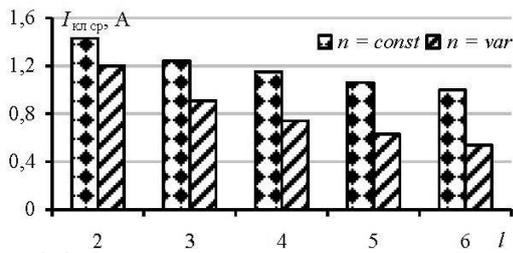


Рис. 6. Средние значения тока регулируемых ключей инверторов при изменении l для $n = const$ и $n = var$ при номинальной мощности нагрузки

Преимущество способа формирования дискретных зон $n = var$, по сравнению со способом $n = const$, возрастает при увеличении количества регулируемых зон. Если при $l = 2$ средний ток ключа в 1,2 раза меньше для $n = var$, чем при $n = const$, то при $l = 6$ разница составляет 1,85 раза.

Оценка эффективности МР

Оценка эффективности конвертора с МР, по сравнению со схемами с полной и неполной глубиной модуляции, проведена при использовании схемы, приведенной на рис. 1. Схема с полной глубиной модуляции получается при использовании только одного регулируемого инвертора напряжения И1 с выходным трансформатором. Напряжение на входе выходного фильтра в этой схеме имеет только регулируемую импульсную составляющую $U_{рег}$. Схема с не-

полной глубиной модуляции содержит два инвертора напряжения: И1 и И2. Инвертор И1 выполняется со 180-градусным управлением и формирует на входе выходного фильтра постоянную составляющую напряжения, а выходное напряжение И2 регулируется от 0 до 180 градусов и формирует регулируемую составляющую напряжения $U_{рег}$, амплитуда которого задается требуемым диапазоном регулирования.

При диапазоне регулирования $\delta = 0,5$ амплитуды регулируемой и нерегулируемой составляющими равны. Схемы с многозонным регулированием при двух регулируемых зонах содержат один нерегулируемый инвертор И1 с выходным напряжением 100 В и два поочередно включаемых в регулируемый режим инверторов И2 и И3. Увеличение зон регулирования обеспечивалось путем соответствующего увеличения количества инверторов напряжения. Результаты сравнения сведены в табл. 2.

Схема с неполной глубиной модуляции позволяет уменьшить размах пульсаций и минимальный ток на 50%, а ток ключей – в 2,2 раза, по сравнению со схемой с полной глубиной модуляции. Схема с МР при 2 регулируемых зонах позволяет уменьшить размах пульсации входного тока в 1,9 раза, а пульсации ΔI_{L2} , ΔU_{C1} , ΔU_{C2} и ток нагрузки – более 2 раз, ток ключей в 3,17 раза. Увеличение регулируемых зон до 5 позволяет снизить размах пульсаций на элементах входного фильтра в 3,5 раза, ΔI_{L2} , ΔU_{C2} и ток нагрузки – в 4,5 раза, ток ключей в 6 раз. Значения $I_{н}$ в табл. 2 отражают минимальный ток нагрузки.

Таблица 2

Снижение показателей схем с неполной глубиной модуляции и схемы с МР по сравнению со схемой с полной глубиной модуляцией, в раз

Сравниваемые показатели	Схема с неполной модуляцией, $U_{нр} = U_{рег}$	Схема с многозонной модуляцией, $n = var$	
		$l = 2$	$l = 5$
Размах пульсации потребляемого тока	1,50	1,91	3,56
Размах пульсации напряжения питания инверторов	1,57	2,06	3,67
Размах пульсации тока дросселя выходного фильтра	1,50	2,27	4,54
Размах пульсации выходного напряжения	1,52	2,30	4,60
Ток ключей регулируемых инверторов	2,18	3,17	6,03
Минимальный ток нагрузки, при котором возникает режим прерывистых токов	1,50	2,27	4,54

При полной глубине модуляции (режим ключа) диапазон регулирования обеспечивается от 1,135 до 3,44 А, при работе только с одной регулируемой зоной (неполная глубина модуляции) – от 0,755 до 3,44 А, а при двух зонах при $n = const$ – от 0,625 до 3,44 А и от 0,5 до 3,44 А при $n = var$.

Величина тока регулируемых ключей влияет на динамические потери в регулируемых инверторах. Размах пульсаций тока потребления характеризует влияние конвертора на питающую сеть, а размах пульсаций на конденсаторе С2 оказывает влияние на работу подключаемых потребителей.

Проведенное сравнение доказывает целесообразность применения многозонного регулирования в схемах конверторов средней и повышенной мощности. Основным недостатком схем с многозонным регулированием выходного напряжения заключается в увеличении количества силовых полупроводниковых приборов. Это необходимо учитывать при оптимизации структуры СЭП при заданном диапазоне регулирования выходных параметров.

Заключение

В работе выполнен анализ способа МР, основанного на разбиении полного диапазона регулирования на несколько дискретных зон, установлена зависимость способа формирования зон и их количества на величину элементов фильтров и ключей конвертора. Критериями для оценки параметров элементов конверторов выбраны амплитуда и относительная длительность регулируемой составляющей напряжения. Доказано, что формирование дискретных зон обеспечивает снижение параметров входных и выходных фильтров в СЭП постоянного тока. При этом способ МР эффективнее реализовывать с равномерным квантованием дискретных зон. Показано, что при МР за счет разбиения полного диапазона регулирования на несколько поддиапазонов достигается снижение влияния СЭП на питающую сеть и на работу подключаемых потребителей, а также уменьшение тока ключей регулируемых инверторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00403, <https://rscf.ru/project/23-29-00403/>.

Литература

1. Григораш О.В. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения / О.В. Григораш, Ю.П. Степура, А.Е. Усков. – Краснодар: Кубанский гос. аграрный ун-т, 2011. – 188 с.

2. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин, Н.Н. Лаптев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.

3. Земан С. Анализ импульсно-модуляционных способов регулирования последовательного инвертора / С. Зиман, А. Осипов // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 88–91.

4. Кобзев А.В. Энергетическая электроника: учеб. пособие / А.В. Кобзев, Б.И. Коновалов, В.Д. Семенов. – Томск: Том. межвуз. центр дистанционного образования, 2010. – 164 с.

5. Найвельт Г.С. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов, Г.П. Затикян, Л.Н. Шаров, С.А. Кузнецов, В.А. Алексеев, Л.М. Киселев, В.И. Тихонов, Ю.Н. Шуваев. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.

6. Malo S. Output Voltage Regulation of a High-Efficiency High Step-Up DC-DC Power Converter / S. Malo, R. Grino // Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales. – 2007. – P. 854–859. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374709.

7. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.

8. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.

9. Томасов В.С. Импульсные полупроводниковые преобразователи в системах управления приборных комплексов нового поколения // Научно-технический вестник Санкт-Петербург. гос. ин-та точной механики и оптики (технического ун-та). – 2003. – № 11. – С. 5–20.

10. Олещук И. Синхронная многозонная модуляция для регулирования силовых электронных преобразовательных систем на базе инверторов напряжения: обзор результатов последних исследований // Электронная обработка материалов. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 51–70.

11. Strzelecki R. Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application / R. Strzelecki, W. Matelski, R. Małkowski, V. Tomasov, L. Wolski, A. Krahl // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – 2019. – P. 132–137. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764193.

12. Брылина О.Г. Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широотно-импульсной модуляцией // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 70–77.

13. Lusgin V.I. Energy-efficient installations of multi-zone multi-frequency induction heating of steel billets for large deformation / V.I. Lusgin, I.E. Lopatin, E.P. Shalina, A.Y. Petrov, S.M. Fatkhullin, I.G. Alekseev // Advanced Problems of Electrotechnology. – 2020. – No. 1. – P. 1–10.

14. Kosykh E. Analysis of the Control System for a Soft Starter of an Induction Motor Based on a Multi-Zone AC Voltage Converter / E. Kosykh, N. Udovichenko, N. Lopatkin, G. Zinoviev, E. Grishanov, R. Sarakhanova // Electronics. – 2023. – No. 12. – P. 1–24.

15. Mohsin M.H. Sinusoidal inverter using pulse width amplitude modulation / M.H. Mohsin, N.K. Alshamaa, A.H. Dalal, A.H. Sabah // The Fourth Postgraduate Engineering Conference. – 2020. – P. 1–7. DOI:10.1088/1757-899X/745/1/012022.

16. Bambang S. Improved voltage of cascaded inverters using sine quantization progression / S. Bambang, A. Mochamad, P. Mauridhi // TELKOMNIKA. – 2010. – Vol. 8, No. 2. – P. 123–130.

17. Анисимова Т.В. Инверторы с многозонной модуляцией / Т.В. Анисимова, А.Н. Данилина // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 52. – С. 1–15.

18. Авдзейко В.И. Расчет выходных фильтров систем электропитания с многозонным регулированием / В.И. Авдзейко, А.А. Дроздова, В.М. Рулевский, Д.Ю. Ляпунов // Электричество. – 2023. – № 9. – С. 31–37.

19. Martynyuk V.V. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter / V.V. Martynyuk, V.D. Kosenkov, O.V. Geydarova, M.V. Fedula // Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2019. – Is. 77. – P. 17–29.

20. Cossart Q. Model reduction of converters for the analysis of 100% power electronics transmission systems / Q. Cossart, F. Colas, X. Kestelyn // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 2018. – P. 1254–1259. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352358.

Авдзейко Владимир Игоревич

Канд. техн. наук, вед. н.с. отд. проектирования и развития инновационной инфраструктуры
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-6638-2684
Тел.: +7-909-546-48-86
Эл. почта: avdzejkovi@yandex.ru

Дроздова Анастасия Александровна

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9934-5006
Тел.: +7-999-619-37-70
Эл. почта: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Рулевский Виктор Михайлович

Д-р техн. наук, ректор ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-3546-3921
Тел.: +7(382-2) 51-05-30
Эл. почта: rector@tusur.ru

Ляпунов Данил Юрьевич

Канд. техн. наук, инж. отд. № 13 Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9326-3595
Тел.: +7-903-913-61-37
Эл. почта: danillyapunov@yandex.ru

Avdzeiko V.I., Drozdova A.A.,
Rulevskiy V.M., Lyapunov D.Yu.

Analysis of methods to form discrete zone in converters with multi-zone control of output parameters

Power supplies operating in the key mode of operation create a pulsed character of current consumption, leading to current and voltage ripples in the supply network and at the input of connected consumers. Conventional converter circuits are based on single-cycle converters or inverters with full range of output parameters regulation. Power elements of these converters are calculated for the full power of the converted electrical energy, and at the output of the regulated inverter a pulse voltage is formed, the amplitude and duration of which have a significant impact on the parameters of input and output filters. One of the efficient ways to reduce this influence is the method of multi-zone regulation is based on the division of the regulation range into several zones. In the article, a comparative analysis of the given variants of converters is carried out in terms of the current ripple spread of inductors and voltage on filter capacitors, of the current value of keys, as well as of the conditions of intermittent currents occurrence depending on the number of zones. The advantage of dividing the control range into zones with uniform quantisation step is proved, as well as the efficiency of these schemes in comparison with converters with full and incomplete modulation depth of the regulated parameter. The analysis

of schemes variants with uniform and non-uniform quantisation steps is carried out on the models built with the help of MATLAB Simulink software.

Keywords: converter, current and voltage ripple, multi-zone regulation, pulse component, intermittent currents, regulation range.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-3-133-139

References

1. Grigorash O.V., Stepura Yu.P., Uskov A.E. *Statische preobrazovateli i stabilizatory avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya* [Static converters and stabilizers of autonomous power supply systems]. Publishing office of Kuban State Agrarian University, 2011, 188 p. (in Russ.).
2. Moin V.S., Laptev N.N. *Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli* [Stabilized transistor converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 376 p. (in Russ.).
3. Zeman S., Osipov A. *Analiz impul'sno-modulyatsionnykh sposobov regulirovaniya posledovatel'nogo invertora* [Analysis of pulse-modulation methods for regulating a series inverter]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2007, no. 4, pp. 88–91.
4. Kobzev A.V., Konovalov B.I., Semenov V.D. *Energeticheskaya elektronika: Uchebnoye posobiye* [Power Electronics: Textbook]. Tomsk, Tomsk Interuniversity Center for Distance Education Publ., 2010, 164 p. (in Russ.).
5. Naivelt G.S. et al. *Istochniki elektropitaniya ra-dioelektronnoy apparatury* [Power sources for radio-electronic equipment]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1985, 576 p. (in Russ.).
6. Malo S., Grino R. Output Voltage Regulation of a High-Efficiency High Step-Up DC-DC Power Converter. *Instituto de Orgazinación y Control de Sistemas Industriales*, 2007, pp. 854–859. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374709.
7. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impul'snaya modulyatsiya* [Multi-zone pulse modulation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 304 p. (in Russ.).
8. Kobzev A.V., Mikhhalchenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulyatsionnyye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies for electronic equipment]. Tomsk, Radio and Communications Publ., 1990, 336 p. (in Russ.).
9. Tomasov V.S. *Impul'snyye poluprovodnikovyye preobrazovateli v sistemakh upravleniya pribornyykh kom-pleksov novogo pokoleniya* [Pulse semiconductor converters in control systems of new generation instrument complexes]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoy mekhaniki i optiki (tekhnicheskogo universiteta)* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics published by ITMO University], 2003, no. 11, pp. 5–20 (in Russ.).
10. Oleshchuk I. Sinkhronnaya mnogozonnaya modulyatsiya dlya regulirovaniya silovykh elektronnykh preobrazovatel'nykh sistem na baze invertorov napryazheniya: obzor rezul'tatov poslednykh issledovaniy [Synchronous multi-zone modulation for regulation of power electronic converter systems based on voltage inverters: a review of the latest research results]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 2022, vol. 58, no. 5, pp. 51–70 (in Russ.).
11. Strzelecki R., Strzelecki R., Matelski W., Małkowski R., Tomasov V., Wolski L., Krahel A. Distribution Transformer with Multi-Zone Voltage Regulation for Smart Grid System Application. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2019, pp. 132–137. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764193
12. Brylina O.G. *Sticheskiye i dinamicheskiye spek-tral'nyye kharakteristiki mnogozonnogo preobrazovatelya s chastotno-shirotno-impul'snoy modulyatsiyey* [Static and dynamic spectral characteristics of a multi-zone converter with frequency-pulse-width modulation]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering], 2013, vol. 13, no. 1, pp. 70–77 (in Russ.).
13. Lusgin V.I., Lopatin I.E., Shalina E.P., Petrov A.Y., Fatkhullin S.M., Alekseev I.G. Energy-efficient installations of multi-zone

multi-frequency induction heating of steel billets for large deformation. *Advanced Problems of Electrotechnology*, 2020, no. 1, pp. 1–10.

14. Kosykh E., Udovichenko N., Lopatkin N., Zinoviev G., Grishanov E., Sarakhanova R. Analysis of the Control System for a Soft Starter of an Induction Motor Based on a Multi-Zone AC Voltage Converter. *Electronics*, 2023, no. 12, pp. 1–24.

15. Mohsin M.H. Alshamaa N.K., Dalal A.H., Sabah A.H. Sinusoidal inverter using pulse width amplitude modulation. *The Fourth Postgraduate Engineering Conference*, 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/745/1/012022.

16. Bambang S., Mochamad A., Mauridhi P. Improved voltage of cascaded inverters using sine quantization progression. *TELKOMNIKA*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 123–130.

17. Anisimov T.V., Danilina A.N. *Inventory s mnogozonnoy modulyatsiyey* [Inverters with multi-zone modulation]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Electronic Journal Proceedings of MAI], 2012, no. 52, p. 1–15 (in Russ.).

18. Avdzeiko V.I., Drozdova A.A., Rulevsky V.M., Lya-punov D.Yu. *Raschet vykhodnykh fil'trov sistem elektropitaniya s mnogozonnym regulirovaniyem* [Calculation of output filters of power supply systems with multi-zone regulation]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2023, no. 9, pp. 31–37 (in Russ.).

19. Martynyuk V.V., Kosenkov V.D., Geydarova O.V., Fedula M.V. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter. *Bulletin of NTUU KPI. Series Radiotechnique. Radioapparatus Building*, 2019, Is. 77, pp. 17–29.

20. Cossart Q., Colas F., Kestelyn X. Model reduction of converters for the analysis of 100% power electronics transmission systems. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 1254–1259. DOI: 10.1109/ICIT.2018.8352358

Vladimir I. Avdzeiko

Candidate of Sciences in Engineering, Leading Researcher, Department of Design and Development of Innovative Infrastructures, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-6638-2684
Phone: +7-909-546-48-86
Email: avdzyekovi@yandex.ru

Anastasiya A. Drozdova

Postgraduate student, Department of Television and Control, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9934-5006
Phone: +7-999-619-37-70
Email: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Viktor M. Rulevskiy

Doctor of Science in Engineering, Rector, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-3546-3921
Phone: +7 (382-2) 51-05-30
Email: rector@tusur.ru

Danil Yu. Lyapunov

Candidate of Sciences in Engineering, Engineer of Department No. 13, Research Institute of Automation and Electromechanics, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9326-3595
Phone: +7-903-913-61-37
Email: danillyapunov@yandex.ru