

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНДЕНСАТОРАХ ЯЧЕЕК В МОДУЛЬНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ УЛУЧШЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ

А. А. ПЛАХТИЙ^{1,2*}, В. П. НЕРУБАЦКИЙ², В. Р. ЦЫБУЛЬНИК²

¹ конструкторское бюро компании ООО «ВО ОВЕН», Харьков, УКРАИНА

² кафедра электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, УКРАИНА

* email: a.plakhtiy1989@gmail.com

АННОТАЦИЯ. За последние два десятилетия появился новый тип полупроводниковых преобразователей электроэнергии – модульные многоуровневые преобразователи. Данная топология схемотехнически состоит из n -го числа последовательно включенных транзисторно-емкостных модулей и позволяет реализовывать, как выпрямители, так и инверторы напряжения с различным числом уровней и фаз. В настоящее время данные преобразователи нашли широкое применение в системах передачи электроэнергии на высоком напряжении постоянного тока (back-to-back HVDC), производимых компаниями Siemens и ABB, с мощностью порядка 400-2000 МВА. Модульные многоуровневые преобразователи в сравнении с другими типами полупроводниковых преобразователей обладают рядом существенных преимуществ. Наличие большого числа уровней (100 и выше) дает возможность использования относительно низковольтных ключей и реализации низкой частоты коммутации, что обуславливает высокий КПД преобразователя. Заявленный КПД системы передачи электроэнергии системы электроснабжения HVDC с модульными многоуровневыми преобразователями производства Siemens составляет 99,5%. Кроме этого модульные многоуровневые преобразователи имеют повышенную надежность. Это обусловлено тем, что модульные преобразователи могут функционировать даже при условии выхода из строя отдельных транзисторно-емкостных модулей. Удобным в производстве является конструктивная модульность и масштабируемость преобразователя. Однако в управлении модульных многоуровневых преобразователей существует проблема стабилизации напряжения на конденсаторах ячеек. В ходе проведенных исследований было установлено, что при использовании классических алгоритмов управления многоуровневыми инверторами (пространственно-векторной и синусоидальной широтно-импульсной модуляции) в модульных многоуровневых преобразователях возникает дисбаланс напряжений на конденсаторах ячеек модульных многоуровневых инверторов. В результате этого напряжение на одной половине ячеек падает до нуля, а напряжение на другой половине ячеек возрастает в два раза. Это приводит к значительному ухудшению формы выходного напряжения. В статье представлено улучшенный алгоритм пространственно-векторной модуляции для модульного многоуровневого преобразователя, который обеспечивает стабилизацию напряжения в ячейках преобразователя, а также возможность регулирования амплитуды и частоты выходного напряжения. В программе Matlab/Simulink создана модель модульного пятиуровневого модульного инвертора. Результаты имитационного моделирования подтвердили работоспособность предложенного алгоритма управления.

Ключевые слова: модульный многоуровневый инвертор; стабилизация напряжения ММС; улучшенная пространственно-векторная ШИМ

STABILIZATION OF VOLTAGES ON CAPACITORS OF CELLS IN MODULAR MULTILEVEL INVERTERS WITH SPACE-VECTOR PWM

A. PLAKHTIY^{1,2,*}, V. NERUBATSKYI², V. TSIBULNYK²

¹ electronics- engineer of the design office of the company "VO OWEN" Ltd.

² assistant professor of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, UKRAINE

*email: a.plakhtiy1989@gmail.com

ABSTRACT. Over the two past decades, a new type of semiconductor power converter has appeared – modular multilevel converter. This topology consists of several transistor-capacitive modules, allowing to realize multilevel rectifiers and invertors with various number of levels and phases. Currently, the modular multilevel converters are widely used in high-voltage direct-current power supply systems (HVDC), produced by Siemens and ABB companies, with a rated power 400-2000 MVA. Modular multi-level converters in comparison with other types of semiconductor converters have a number of significant advantages. The presence of a large number of levels (100 and higher) makes it possible to use relatively low-voltage switches and realize a low switching frequency, which leads to a high efficiency of the converter. The declared efficiency of the power transmission system of the HVDC power supply system with modular multi-level converters manufactured by Siemens is 99.5%. In addition, modular multi-level converters have increased reliability. This is due to the fact that modular converters can function even if they are output from individual transistor-

© А. А. Плахтий, В. П. Нерубацкий, В. Р. Цыбульник, 2019

capacitive modules. Constructive modularity and scalability of the converter is convenient in production. However, there is the problem of stabilizing the voltage on the capacitors of the cells. In the course of the research it was found that when using classical control algorithms for multi-level inverters (space-vector and sinusoidal pulse-width modulation) there is an imbalance of voltages on capacitors. Tension in one voice pair doubles. This leads to a significant deterioration in the shape of the output voltage. The article uses improved space-vector modulation algorithms for a modular multi-level converter, which provide the ability to stabilize the voltage in the converter cells, as well as the ability to control the amplitude and frequency of the output voltage. The Matlab / Simulink program has created a model of a modular five-level modular inverter. In the Matlab / Simulink program, a modular five-level inverter model was created. Studies have shown that the classical spatial vector modulation algorithms in modular multi-level inverters lead to an imbalance of tension on the capacitors and in modular multi-level inverters, and as a result, a voltage arises, which leads to a significant increase in the shape of the output voltage. The article uses an improved space-vector modulation algorithm for a modular multi-level converter, which allows stabilizing the voltage in cells. The simulation results confirm the proposed theoretical aspects.

Keywords: modular multi-level inverter; voltage stabilization on MMC capacitors; improved space-vector PWM

Введение - история создания модульных многоуровневых преобразователей.

В 2003 году немецким ученым Рейнером Маквардом (Rainer Marquardt) была предложена новая топология полупроводниковых преобразователей электроэнергии - модульные многоуровневые преобразователи (ММП) [1, 2]. Данная топология схематически состоит из n -го числа последовательно включенных транзисторно-емкостных модулей и позволяет реализовывать, как выпрямители, так и инверторы напряжения с различным числом уровней и фаз. Схема модульного многоуровневого преобразователя представлена на рис. 1.

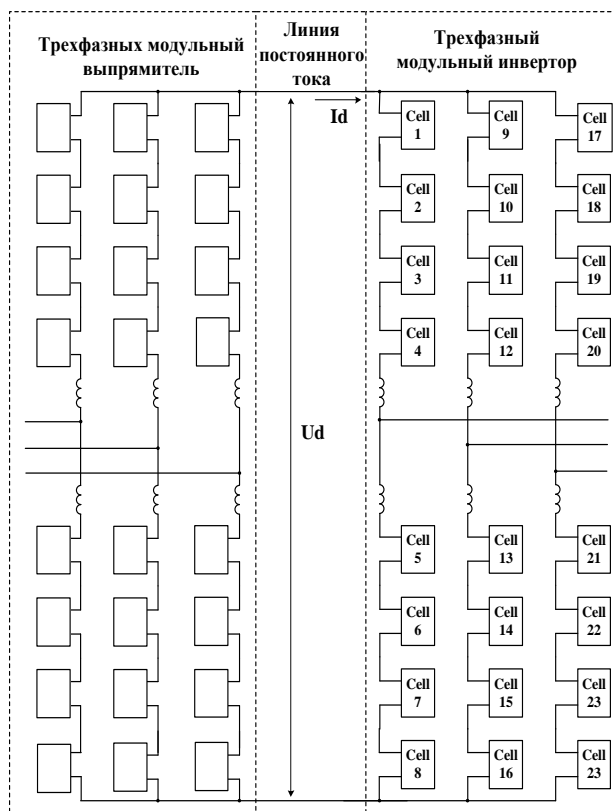


Рис. 1 – Схема пятиуровневого модульного многоуровневого преобразователя частоты

Каждое плечо модульного многоуровневого преобразователя состоит из нескольких последовательно включенных ячеек, что определяет число уровней выходного напряжения. Ячейки ММП состоят из IGBT транзисторов и могут быть построены по полумостовой либо по мостовой топологии, приведенные на рис. 2.

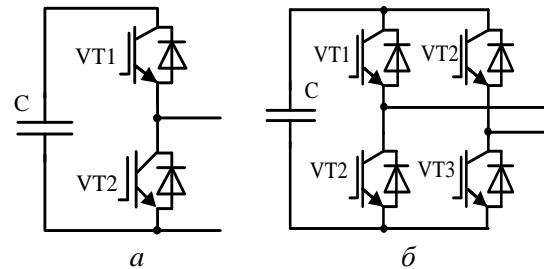


Рис. 2 – Схемы ячеек модульного многоуровневого преобразователя: а – полумостовая ячейка; б – мостовая ячейка

В настоящее время данные преобразователи нашли широкое применение в системах передачи электроэнергии на высоком напряжении постоянного тока, производимых компаниями Siemens и ABB, с мощностью порядка 400-2000 МВА с напряжением порядка 200-320 кВ. Модульные многоуровневые преобразователи в сравнении с другими типами полупроводниковых преобразователей обладают рядом существенных преимуществ. Наличие большого числа уровней (100 и выше) дает возможность использования относительно низковольтных ключей и реализации низкой частоты коммутации, что обуславливает высокий КПД преобразователя. Заявленный КПД системы передачи электроэнергии системы электропитания HVDC с модульными многоуровневыми преобразователями производства Siemens составляет 99,5%. Кроме этого модульные многоуровневые преобразователи имеют повышенную надежность. Это обусловлено тем, что модульные преобразователи могут функционировать даже при условии выхода из строя отдельных транзисторно-емкостных модулей. Удобным в производстве является конструктивная модульность и масштабируемость модульных многоуровневых преобразователей. Высокое число уровней напряжения позволяет обеспечить передачу электро-

энергии с низким содержанием высших гармоник напряжения и тока. Кроме этого ММП дает возможность объединения асинхронных электросетей переменного тока вставку постоянного тока.

Первая высоковольтная линия постоянного тока (HVDC) с модульными многоуровневыми преобразователями была реализована фирмой Siemens в 2010 году. Данная линия соединяла города Питсбург, и Сан-Франциско в Калифорнии, США [3]. Данная линия протяженностью 85 км рассчитана на мощность 400 МВА с напряжением ± 200 кВ. При этом среднее значение

За последующие 10 лет ММП нашли широкое применение в высоковольтных линиях постоянного

тока, производимых компаниями Siemens и ABB, вытесняя тем самым высоковольтные тиристорные многоуровневые преобразователи. При этом достаточно часто ММП используются при подключении мощных ветро-электрогенерирующих установок, а также при создании морских линий электроснабжения. Согласно источника [4] заявленным характеристикам КПД системы электроснабжения на постоянном токе составляет порядка 98-99%.

Перечень некоторых завершенных проектов линий постоянного тока с основными техническими характеристиками приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры существующих систем электроснабжения на постоянном токе с модульными многоуровневыми преобразователями

Компания заказчик	Расположение	P_{NOM} , MW	V_{DC} , kV	V_{AC}	Длительность линии
Trans Bay Cable	Питсбург-Сан-Франциско, США, 2013	400	± 200	230 kV/138 kV, 60 Hz	85 км
INELFE	Бэкса, Франция - Санта-Льогая-де-Альгема, Испания	2000	± 320	400 kV, 50 Hz	65 км
TenneT Holding B.V.	Ветровая электростанция «Dan Tusk», Северное море – Бюттель, Германия	864	± 320	155/300/380 kV, 50 Hz	205 км
Amprion GmbH and TransnetBW GmbH	Остерат – Филиппсбург, Германия	2000	± 380	400 kV, 50 Hz	340 км

В ряде публикации [2, 3, 4, 5] приведены результаты исследований работы модульных многоуровневых преобразователей с различными типами модуляции. Исходя из проведенного анализа научных публикация поставлены следующие цели работы.

Цели работы:

- создание имитационной модели ММИ;
- анализ причин возникновения дисбаланса напряжения на ячейках ММП;
- создание алгоритма стабилизации напряжения на ячейках ММП и подтверждение его на имитационной модели.

Математическое описание электрических процессов в модульных многоуровневых инверторах

Модули в плече ММИ соединены последовательно. Эквивалентная последовательная емкость C_i в плече преобразователя в котором включены N модулей

$$C_i = \frac{C_{\text{module}}}{N}. \quad (1)$$

В связи с тем, что число включенных модулей в ходе работы преобразователя меняется, то меняется и величина эквивалентная последовательная емкость.

При заданной форме тока в плече ММИ I_c изменение напряжение на емкости конденсатора U_c ячейки будет меняться согласно выражения

$$d \frac{U_c}{dt} = \frac{i}{C_i}. \quad (2)$$

Выходное переменное напряжение модульного многоуровневого инвертора может быть описано выражением

$$U_{AC} = \frac{U_{DC}}{2} - R_s \cdot I_{BП} - L \cdot \frac{dI_{BП}}{dt} - n_{BП} U_c, \quad (3)$$

где U_{AC} – выходное переменное напряжение ММИ;

$I_{BП}$ – ток в верхнем плече ММИ;

$n_{BП}$ – число включенных в верхнем плече ячеек;

U_c – напряжение на ячейке конденсаторов.

Токи в верхнем $I_{A_{ВП}}$ и токи нижнем плече $I_{A_{НП}}$ модульного многоуровневого преобразователя могут быть выражены через ток в звене постоянного напряжения I_{DC} , выходной переменный ток I_{AC} и ток пульсаций I_Z , связанный с зарядом и разрядом C_i

$$I_{A_{ВП}} = \frac{I_{DC}}{3} + \frac{I_{AC}}{2} + I_{ZA}, \quad (4)$$

$$I_{A_{НП}} = \frac{I_{DC}}{3} - \frac{I_{AC}}{2} + I_{ZA}. \quad (5)$$

Сумма циркулирующих токов I_Z в трех фазах равна нулю.

$$I_{ZA} + I_{ZB} + I_{ZC} = 0. \quad (6)$$

Ток, потребляемый в звене постоянного тока может быть описан выражением

$$\begin{aligned} I_{DC} &= I_{A_{НП}} + I_{B_{НП}} + I_{C_{НП}} \\ &= I_{A_{ВП}} + I_{B_{ВП}} + I_{C_{ВП}} \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_{A_{ВП}}$ – ток в верхнем плече ММИ, $I_{A_{НП}}$ – ток в нижнем плече ММИ.

Выходной ток, в фазах ММИ может быть системой уравнений

$$I_A = I_{A_{ВП}} - I_{A_{НП}}. \quad (8)$$

Отношение величин выходного и входного тока может быть выражено через коэффициент k

$$k = \frac{3I_{AC}}{2I_{DC}}. \quad (9)$$

Алгоритмы модуляции в многоуровневых инверторах

Как и классические многоуровневые автономные инверторы напряжения с фиксирующими диодами, ММС-преобразователи могут работать как в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции, так и в режиме пространственно-векторной модуляции.

Принцип формирования синусоидальной уровне-сдвинутой широтно-импульсной модуляции приведен на рис. 3.

При этом режим пространственно-векторной ШИМ (ПВШИМ) обуславливает ряд преимуществ, таких как большая выходная мощность, меньшая частота коммутации силовых ключей, что ведет к большему КПД.

Каждая фаза пятиуровневого ММС-преобразователя состоит из восьми ячеек. При этом в каждой фазе возможны пять коммутационных состо-

яний. При это каждое коммутационное состояние именуется вектором.

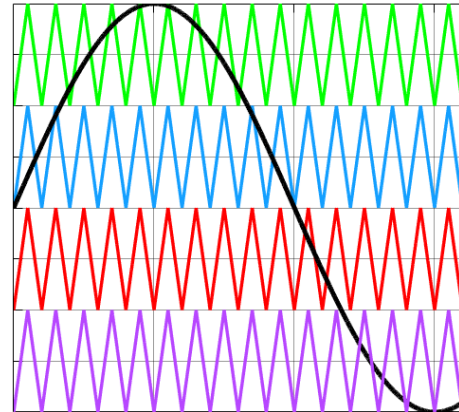


Рис. 3 - Синусоидальная ШИМ для пятиуровневого инвертора

Коммутационные состояния ячеек пятиуровневого ММИ определяющие вектора 0, 1, 2, 3, 4 приведены на рис.4, на котором красным выделены включенные ячейки (под включенным состоянием понимается включение транзистора VT1 из рис.2, а).

Алгоритм управления ключами при пространственно-векторной модуляции в трех фазах приведены на рис. 5. Таким образом, период выходного напряжения (один круг единого пространственного вектора) состоит из 24х временных интервалов (в.и.), каждый из которых определен состоянием одного из трех векторов, которые определяют номера включенных транзисторов.

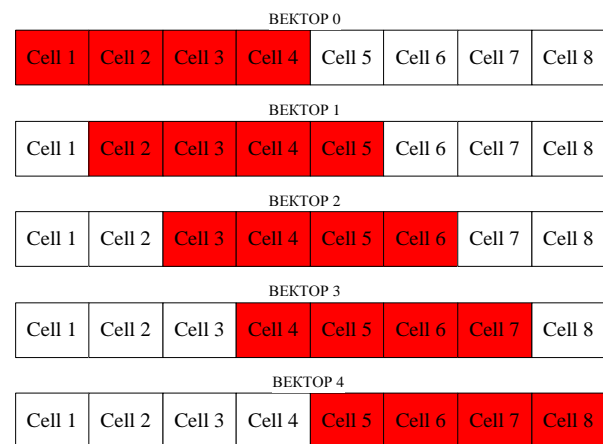


Рис.4 - Базовые коммутационные состояния ячеек, определяющие векторы 0, 1, 2, 3, 4

Временная диаграмма включения ключей ячеек ММИ для формирования одного периода выходного переменного напряжения приведена в таблице 2 (красным обозначено включенное состояние ячейки, под «включенным» понимается проводящее состояние транзистора VT1 из рис.2, а).

Таблица 2 – Временная диаграмма базового алгоритма включения ключей 5-уровневого модульного мно-

№ в. и	№ вектора в фазе А	Номер ячейки в фазе А								№ вектора в фазе В	Номер ячейки в фазе В						№ вектора в фазе С	Номер ячейки в фазе С										
		1	2	3	4	5	6	7	8		9	10	11	12	13	14		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	0									4																		
2	0									3																		
3	0									2																		
4	0									1																		
5	0									0																		
6	1									0																		
7	2									0																		
8	3									0																		
9	4									0																		
10	4									0																		
11	4									0																		
12	4									0																		
13	4									0																		
14	4									1																		
15	4									2																		
16	4									3																		
17	4									4																		
18	3									4																		
19	2									4																		
20	1									4																		
21	0									4																		
22	0									4																		
23	0									4																		
24	0									4																		

гоуровневого инвертора при классической пространственно-векторной модуляции.

Анализ алгоритма ПВШИМ показал, что в течении периода выходного напряжения ММИ различные ячейки имеют различную длительность включения. При этом во время включенного состояния ячейки через конденсатор течет ток, который вызывает либо рост, либо спад напряжения на ней, в зависимости от направления протекания тока.

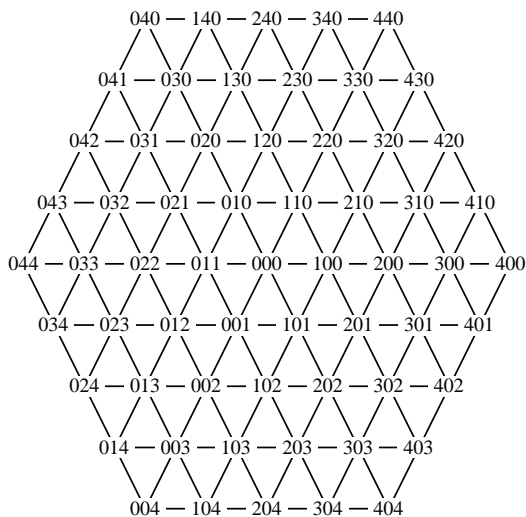


Рис. 5. - Коммутационные состояния силовых ключей в пространственно-векторной модуляции

Анализ алгоритма управления ячейками 5-уровневого ММИ, который состоит из 24 временных

интервалов (в.и.), показал, что ячейка №1 включена 9 интервалов, а ячейка №4 включена 15 интервалов. Неравномерная нагрузка ячеек ММС преобразователя ведет к тому, что напряжение на определенных ячейках растёт выше относительно номинального, а на других ячейка напряжение падает ниже номинального и со временем снижается до нуля, что подтверждено в следующем разделе имитационным моделированием.

Моделирование модульного многоуровневого инвертора

В среде имитационного моделирования Matlab/Simulink была разработана модель пятиуровневого модульного инвертора ячейки, которого построены по полумостовой топологии (рис. 2, а). Разработанная имитационная модель 5-ти уровневого ММИ приведена на рис. 6. Параметры имитационной модели приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры имитационной модели

Параметр	Значение
Напряжение в звене постоянного тока, кВ	8
Емкость конденсатора ячейки ММС, мФ	1
Напряжение ячейки ММИ, кВ	2
Активное сопротивление нагрузки, Ом	20
Индуктивность нагрузки, мГн	0,1

Моделирование проводилось при условии, что в момент пуска все конденсаторы ячеек ММС преобразователя заряжены до напряжения 2 кВ.

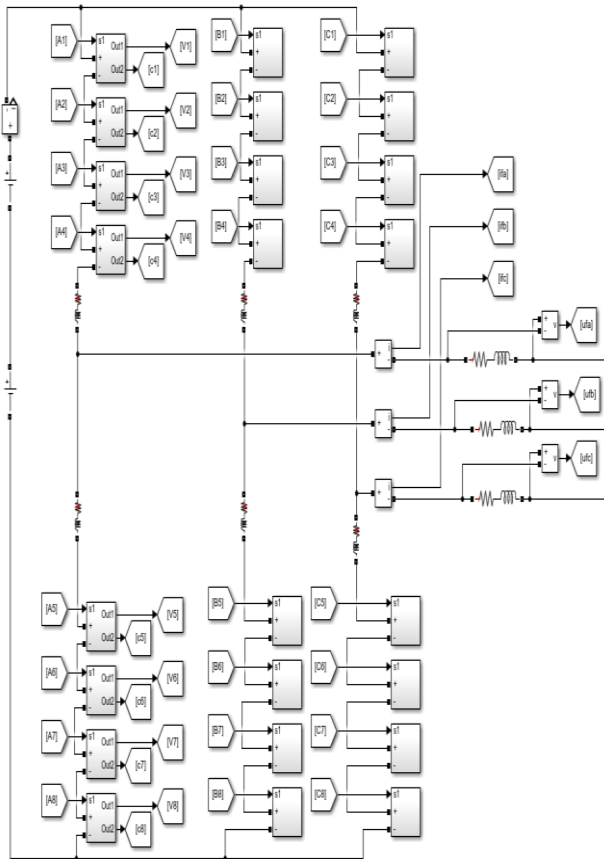


Рис. 6. - Имитационная модель модульного много-уровневого инвертора

Результаты моделирования работы ММИ, а именно напряжение на ячейках 1, 2, 3, 4 в режиме классической пространственно-векторной модуляции (из табл. 1) приведено на рис. 7.

В ходе моделирования было установлено, что при указанных параметрах схемы напряжение на ячейках 2, 3, 6, 7 за время работы преобразователя 5 секунд падает до нуля, а напряжение на ячейках 1, 4, 5, 8 увеличивается в два раза. Напряжение на ячейках других фаз ведут себя аналогично.

Падение напряжения на конденсаторах половины ячеек ведет ММС преобразователя ведет к уменьшению ступеней в формировании выходного напряжения, что ведет к ухудшению синусоидальности работы выходного напряжения. По сути половина ячеек при этом не работает.

Форма выходного напряжения в фазе ММИ, а также его Фурье-анализ, в начальный момент времени работы преобразователя и через 5 секунд ее работы приведена на рис.8. Как видно из рис. 8, форма выходного напряжения ММС за время падения напряжения на конденсаторах ячеек значительно ухудшается. Это обусловлено уменьшением числа ступенек в формировании выходного напряжения, а соответственно приводит к значительному ухудшению синусоидальности выходного напряжения. Ана-

логичное явление происходит и при синусоидальной ШИМ.

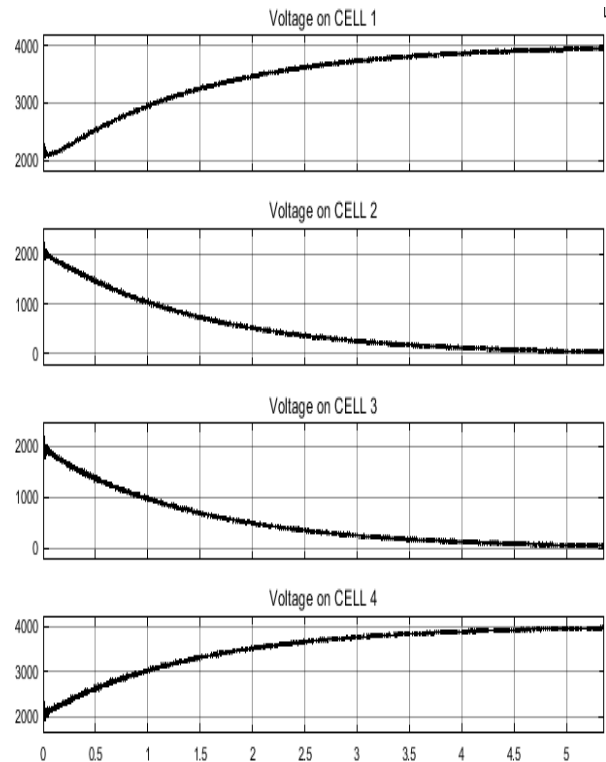
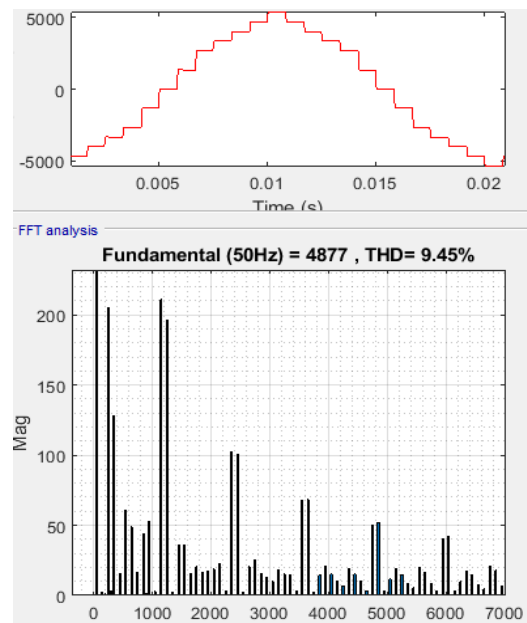


Рис. 7 - Напряжение на конденсаторах 1й, 2й, 3й, 4й ячеек ММС при реализации алгоритма классической пространственно-векторной модуляции из табл. 1



a

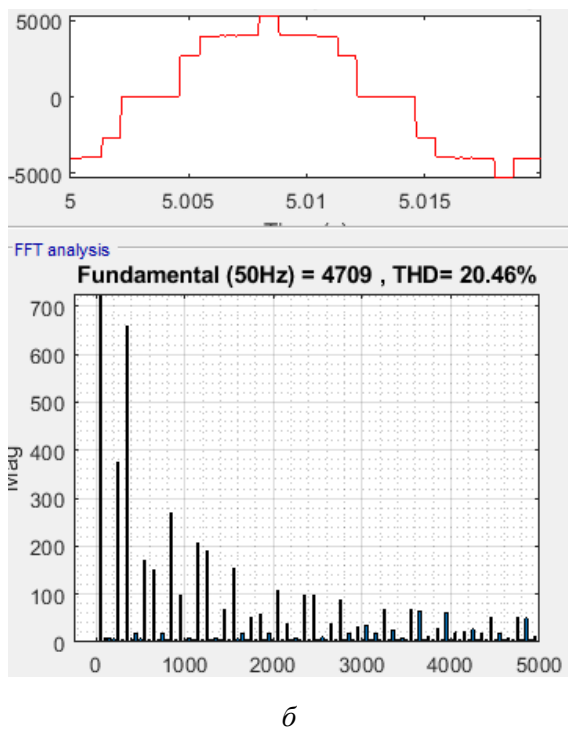


Рис. 8 - Фурье-анализ выходного напряжения ММИ при использовании классической пространственно векторной ШИМ:
а – в начальное время работы;
б – через 5 сек работы схемы.

Таким образом установлено, что классическая пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ) обуславливает нестабильность напряжения на ячейках ММИ и вызывает значительно ухудшение качества выходного напряжения.

Алгоритм пространственно-векторной модуляции с функцией балансирования напряжения на ячейках ММИ

В работе предложено, улучшенный алгоритм ПВШИМ, обеспечивающий балансирование напряжения на ячейках ММИ. В связи с тем, что ММИ работает по принципу управляемого ёмкостного делителя напряжения, то для формирования необходимого потенциала выходного напряжения в фазе важно соотношение включенных ячеек в верхнем и нижнем плече ММИ. При этом абсолютно не важно какие именно ячейки включены, т.к. важно соотношение включенных ячеек в верхнем и нижнем плече. Приведенные на рис.9 комбинации включенных ячеек в фазе А будут формировать тот же потенциал выходного напряжения определяющий вектор «1».

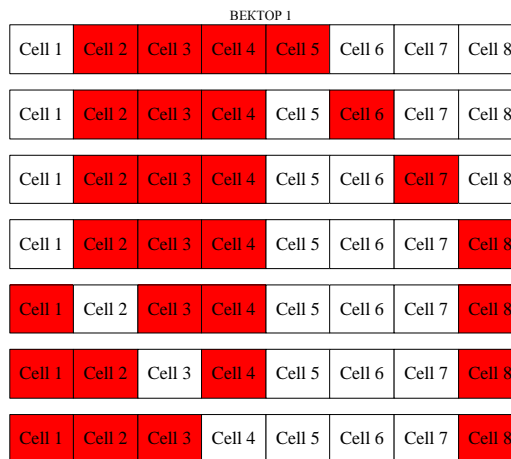


Рис.9. - Возможные коммутационные состояния ячеек пятиуровневого ММИ для формирования вектора «1»

Как показало моделирование, алгоритм классической ПВШИМ обуславливает рост напряжения на ячейках 1, 4, 5, 8, а напряжение на ячейках 2, 3, 6, 7 снижается до нуля. Следовательно, если во всех векторах взаимно заменить коммутационное состояние в парах ячеек 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, как это показано на рисунке 10, то данный алгоритм будет, реализовывать обратную динамику изменения напряжения на ячейках ММИ т.е. напряжение на ячейках 1, 4, 5, 8 будет спадать, а напряжение на ячейках 2, 3, 6, 7 будет расти.

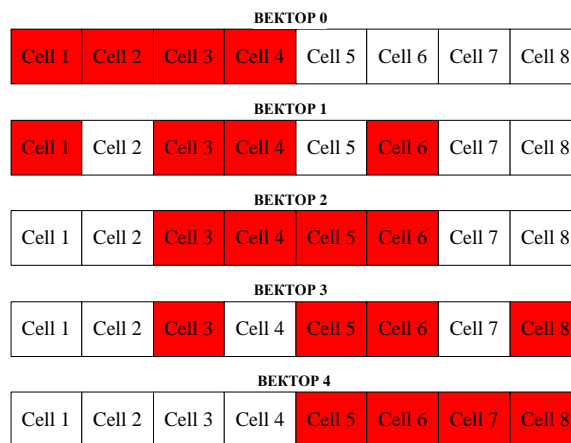


Рис.10 - Предложенный коммутационные состояния ячеек, определяющие векторы «0», «1», «2», «3», «4» для инверсной ПВШИМ

Временная диаграмма алгоритма включения ключей 5-уровневого ММС инвертора содержащая, вызывающая обратную динамику роста/спада напряжения на ячейках ММИ относительно классической ПВШИМ приведено в табл. 4.

Таблица 4 – Временная диаграмма инверсной ПВШИМ (алгоритма включения ключей 5-уровневого

№ в.и	№ vector	Номер ячейки в фазе А								№ vector	Номер ячейки в фазе В								№ vector	Номер ячейки в фазе С							
		1	2	3	4	5	6	7	8		9	10	11	12	13	14	15	16		17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	■	■	■	■					4				■	■	■	■	4					■	■	■	■	
2	0	■	■	■	■					3			■	■	■	■		4					■	■	■	■	
3	0	■	■	■	■					2			■	■	■	■		4					■	■	■	■	
4	0	■	■	■	■					1	■		■	■	■	■		4					■	■	■	■	
5	0	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		4					■	■	■	■	
6	1	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		4					■	■	■	■	
7	2	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		4					■	■	■	■	
8	3	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		4					■	■	■	■	
9	4	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		4					■	■	■	■	
10	4	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		3		■	■		■	■	■	■	
11	4	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		2		■	■		■	■	■	■	
12	4	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		1	■	■		■	■	■	■	■	
13	4	■	■	■	■					0	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
14	4	■	■	■	■					1	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
15	4	■	■	■	■					2	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
16	4	■	■	■	■					3	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
17	4	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
18	3	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
19	2	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
20	1	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
21	0	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		0	■	■		■	■	■	■	■	
22	0	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		1	■	■		■	■	■	■	■	
23	0	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		2	■	■		■	■	■	■	■	
24	0	■	■	■	■					4	■	■	■	■	■	■		3	■	■		■	■	■	■	■	

ММИ реализующего инверсную динамику роста/спада напряжения на ячейках)

Результаты моделирования работы пятиуровневого ММИ при реализации инверсной ПВШИМ (временной диаграммы из таблицы 4) приведено на рис.11.

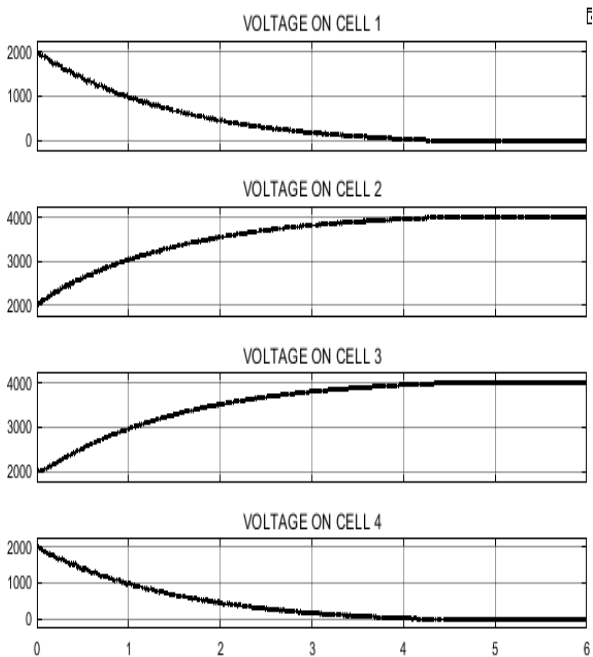


Рис.11 - Напряжение на конденсаторах ячеек ММИ при реализации алгоритма инверсной ПВШИМ (алгоритм из табл.2)

Как видно из результатов моделирования замена в векторах значения пар ячеек 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 привело к инверсной динамике изменения напряжения на ячейках.

Для стабилизации напряжения на ячейках ММИ, поочередное переключение алгоритмов модуляции, приведенных в таблице 1 и таблице 2 приводит соответственно росту и спаду напряжения на ячейках ММИ. Таким образом, возможно задание гистерезисного регулирования напряжения на ячейках ММИ с заданием порога отклонения напряжения на ячейке относительно заданного значения. Принцип стабилизации напряжения на ячейках ММИ путем переключения коммутационных таблиц (из таблицы 1 в таблицу 2 и обратно) подтвержденный результатами моделирования при задании допустимого порога отклонения на ячейке $2000 \pm 200V$ приведены на рис.12.

Как видно из рис.12, напряжения на ячейках ММИ не отклоняется более заданного значения. В ходе дальнейшего моделирования было установлено, что и после 60 секунд работы ММИ напряжения на ячейках не отклоняются выше допустимого значения. Таким образом, при задании достаточно малого допустимого порога отклонения напряжения на ячейках ММИ, можно практически обеспечить отсутствие существенных отклонений напряжений, как это показано на рис.13.

Результаты моделирования показали, что применение предложенного алгоритма стабилизации напряжения на ячейках ММС путем балансирования позволяет достичь при заданных параметрах моделирования отклонение напряжения $\pm 50V$, что обуславливает коэффициент пульсации 5%. Дальнейшее сни-

жение пульсации может быть достигнуто путем увеличения.

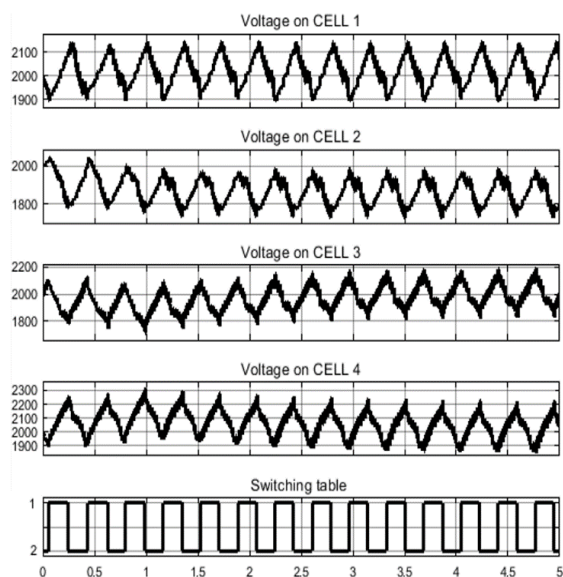


Рис. 12 - Напряжение на ячейках ММИ преобразователя после применения попеременного переключения коммутационной таблицы 1 и таблицы 2 при задании допустимого отклонения $\pm 100V$

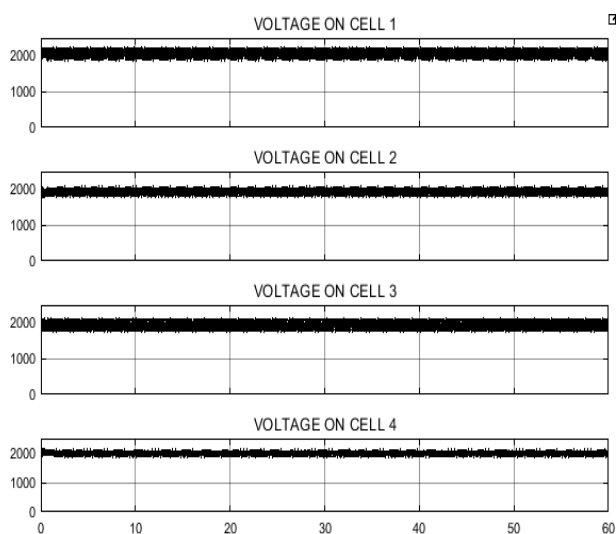


Рис. 13.- Напряжение на ячейках ММС преобразователя после применения предложенного алгоритма балансирования

Форма выходного напряжения пятиуровневого ММИ после пятидесяти секунд его работы при реализации предложенного алгоритма управления с попеременным переключением коммутационных таблиц приведено на рис.13.

Как видно из рис. 13 и рис.14 предложенный алгоритм обеспечивает стабильность напряжения на ячейках ММС-преобразователя и не вызывает ухудшения формы выходного напряжения во времени.

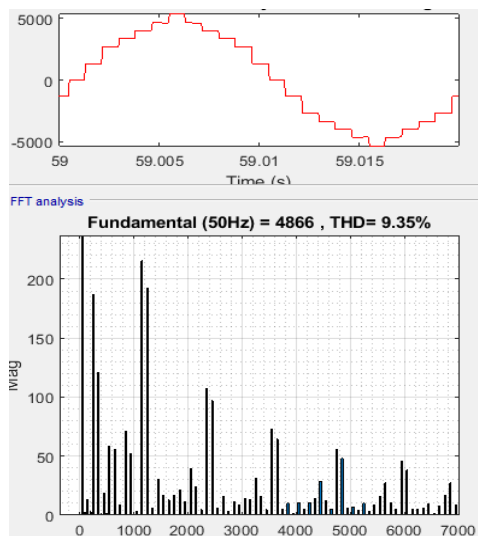


Рис. 14 - Форма и гармонический анализ выходного напряжения пятиуровневого ММС после 5 секунд работы схемы при реализации предложенного подхода в регулировании

Выводы

1. Показано, что алгоритм классической пространственно-векторной модуляции, приведенный в таблице 2, вызывает дисбаланс напряжений на ячейках ММИ, при котором напряжение на одной половине ячеек падает до нуля, а на другой половине ячеек вырастает в два раза, что вызывает значительное ухудшение формы выходного напряжения. Показано, что в пятиуровневом ММИ напряжение на ячейках 2, 3, 6, 7 за время работы преобразователя 5 секунд падает до нуля, а напряжение на ячейках 1, 4, 5, 8 увеличивается в два раза (рис.7).

2. Предложен алгоритм инверсной пространственно-векторной ШИМ, приведенный в таблице 4, который вызывает обратную динамику роста и спада напряжений на ячейках ММИ т.е. напряжение на ячейках 2, 3, 6, 7 за время работы преобразователя вдвое увеличивается, а напряжение на ячейках 1, 4, 5, 8 падает до нуля (рис.11).

3. Предложен алгоритм стабилизации напряжения на ячейках ММИ, идея которого состоит в поочередном переключении классического алгоритма ПВШИМ и инверсного алгоритма ПВШИМ по условию гистерезисного отклонения напряжения на ячейках ММИ от номинального значения, как это приведено на рис.12.

4. Для подтверждения работоспособности предложенного алгоритма стабилизации напряжения на ячейках ММИ была разработана Matlab-модель пятиуровневого ММС, которая подтвердила теоретические предпосылки.

5. Предложенный алгоритм поочередного переключения классической ПВШИМ и инверсной ПВШИМ применим не только для пятиуровневых ММС, но и для ММС с любым числом уровней.

Список литературы

1. **Lesnicar, A., & Marquardt, R.** (n.d.). An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. 2003 *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, doi:10.1109/ptc.2003.1304403
2. **X R.L. Sellick, M. Akerberg**, "Comparison between HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme", *IET AC-DC 2012*, November 2012
3. **D. Van Hertem and M. Ghandhari**, "Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3156–3163, Dec. 2010.
4. **R. Marquardt**, "Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation," in *Proc. IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE)*, Jun. 2011, pp. 1425–1431.
5. **X. Li, W. Liu, Q. Song, H. Rao, and S. Xu**, "An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2013, pp. 6182–6188.
6. **M. Merlin, T. Green, P. Mitcheson, D. Trainer, D. Critchley, and R. Crookes**, "A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability," in *9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC)*, Oct. 2010, pp. 1–5.
7. **R. Feldman, M. Tomasini, E. Amankwah, J. Clare, P. Wheeler, D. Trainer, and R. Whitehouse**, "A hybrid modular multilevel voltage source converter for HVDC power transmission," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1577–1588, Jul. 2013.
8. **Степанов В.М.** Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятий на потери электрической энергии / Степанов В.М., Базыль И.М. // *Известия ТулГУ. Технические науки Вып. 12 Ч2.* – 2013. – № 12. – с. 27-31.
9. **Жежеленко И.В.** Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения // *Электрика.* – 2010. – № 4. – с. 3-6.
10. **Жежеленко И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: *Энергоатомиздат*, 2004.
11. **Лютаревич А. Г.**, Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / **Лютаревич А. Г., Вырва А.А., Долингер С.Ю., Осипов Д. С., Четверик И. Н.** // *Омский научный вестник.* №1, 2009, С.109-113.
12. **Beaty, H. Wayne**, Standard Handbook for Electrical Engineers (14th ed.). McGraw-Hill, 2000, p. 34–50.
13. **Hayt, W. H., Buck J.A.** Engineering Electromagnetics, Sixth edition, 2006, p.561.
14. **Ben C. Johnson**, The Practical Issues involved in Designing, Specifying and Installing Skin Effect Current Tracing Systems, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE)*, 2012, pp.1-13.
15. **Denys I. Zaikin**, Round and tubular wire skin effect modeling and usage SPICE as Maxwell's equations solver, *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2015, Pp: 650 – 653. doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377551.
16. **Dias R. A., / Dias R. A., Lira G. R. S., Costa E. G., Ferreira R. S., Andrade A. F.** // Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations, 2018 *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2018, pp. 1 – 6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395687.
17. **Tsuchiya A**, Effect of Anomalous Skin Effect on Transmission-Line Loss [J] / Tsuchiya A, Onodera H. // *leice Technical Report Microwaves*, 2011, 111(351):77-81.
18. **Arcega F. J., Pardina A.** Study of Harmonics Thermal Effect in Conductors Produced by Skin Effect. *IEEE latin america transactions*. 2014, 12(8), Pp. 1488-1495. doi: 10.1109/TLA.2014.7014518.

References (transliterated)

1. **Lesnicar, A., & Marquardt, R.** (n.d.). An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. 2003 *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, doi:10.1109/ptc.2003.1304403
2. **X R.L. Sellick, M. Akerberg**, "Comparison between HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme", *IET ACDC 2012*, November 2012
3. **D. Van Hertem and M. Ghandhari**, "Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3156–3163, Dec. 2010.
4. **R. Marquardt**, "Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation," in *Proc. IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE)*, Jun. 2011, pp. 1425–1431.
5. **X. Li, W. Liu, Q. Song, H. Rao, and S. Xu**, "An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2013, pp. 6182–6188.
6. **M. Merlin, T. Green, P. Mitcheson, D. Trainer, D. Critchley, and R. Crookes**, "A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability," in *9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC)*, Oct. 2010, pp. 1–5.
7. **R. Feldman, M. Tomasini, E. Amankwah, J. Clare, P. Wheeler, D. Trainer, and R. Whitehouse**, "A hybrid modular multilevel voltage source converter for HVDC power transmission," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1577–1588, Jul. 2013.
8. **Stepanov V.M., Bazyl' I.M.** Vliyaniye vysshikh harmonik v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy na poteri elektricheskoy energii [Influence of higher harmonics in power supply systems of enterprises on losses of electric energy]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki [Proceedings of Tula State University. Technical science]*, 2013, **12** (2), 27-31.
9. **Zhelezko I.V.** Elektricheskiye poteri ot vysshikh harmonik v sistemakh elektrosnabzheniya [Electrical losses from higher harmonics in power supply systems]. *Elektrika [Electrics]*, 2010, **4**. 3-6.
10. **Zhezhelenko I. V.** Vysshieye harmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Higher harmonics in industrial power supply systems], Moscow, *Energoatomizdat [Energoatomizdat]*, 2004.
11. **Ljutarevich A. G., Vyrvva A.A., Dolinger S.YU., Osipov D. S., Chetverik I. N.**, Otsenka dopolnitel'nykh poter' moshchnosti ot vysshikh harmonik v elementakh sistem elektrosnabzheniya [Estimation of additional power losses from higher harmonics in elements of power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2009, **1**, 109-113.
12. **Beaty, H. Wayne**, Standard Handbook for Electrical Engineers (14th ed.). McGraw-Hill, 2000, 34–50.
13. **Hayt, W. H., Buck J.A.** Engineering Electromagnetics, Sixth edition, 2006. 561.

14. **Ben C J.** The Practical Issues involved in Designing, Specifying and Installing Skin Effect Current Tracing Systems, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE)*, 2012, 1-13.
15. **Denys I. Zaikin,** Round and tubular wire skin effect modeling and usage SPICE as Maxwell's equations solver, *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, 2015, Pp: 650 – 653. doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377551
16. **Dias R. A., Lira G. R. S., Costa E. G., Ferreira R. S., Andrade A. F.,** Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations, *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, pp. 1 – 6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395687
17. **Tsuchiya A, Onodera H.** Effect of Anomalous Skin Effect on Transmission-Line Loss [J]. *leice Technical Report Microwave*, 2011, 111(351), 77-81.
18. **Arcega F. J., Pardina A.** Study of Harmonics Thermal Effect in Conductors Produced by Skin Effect. *IEEE latin america transactions.* 2014., **12(8)** 1488-1495. doi: 10.1109/TLA.2014.7014518

Сведения об авторах (About authors)

Плахтий Александр Андреевич – инженер-электроник конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН». По совместительству доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, Украина; email: a.plakhtiy1989@gmail.com

Alexandr Plakhtiy– Electronics engineer of the design office of the company "VO OWEN" / part-time associate professor of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine; email: a.plakhtiy1989@gmail.com

Нерубацкий Владимир Павлович – доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, Украина; email: nvp9@i.ua

Volodymyr Nerubatskyi– assistant professor of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics and Electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, Ukraine; email: nvp9@i.ua

Цыбульник Владислав Романович– магистр кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Харьков, Украина; email: naytus2244@gmail.com

Vladymyr Tsybulnyk– master of the of department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkov, UKRAINE. email: naytus2244@gmail.com

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Плахтий, А. А. Стабилизация напряжений на конденсаторах ячейек в модульных многоуровневых инверторах путем применения улучшенной пространственно-векторной ШИМ / **А. А. Плахтий, В. П. Нерубацкий, В. Р. Цыбульник** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 42-52. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.06.

Please cite this article as:

Plakhtiy, A., Nerubatskyi, V., Tsybulnyk, V. Stabilization of voltages on capacitors of cells in modular multilevel inverters with space-vector PWM. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 42-52, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.06.

Будь ласка, посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Плахтий, О. А. Стабілізація напруги на конденсаторах комірок в модульних багаторівневих інверторах шляхом застосування поліпшеної просторово-векторної ШІМ / **О. А. Плахтий, В. П. Нерубацкий, В. Р. Цыбульник** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 42-52. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.06.

АНОТАЦІЯ. За останні два десятиліття з'явився новий тип напівпровідникових перетворювачів електроенергії - модульні багаторівневі перетворювачі. Дана топологія схемотехнічно складається з n -го числа послідовно включених транзисторних-емнісних модулів і дозволяє реалізувати, як випрямлячі, так і інвертори напруги з різною кількістю рівнів і фаз. В даний час дані перетворювачі знайшли широке застосування в системах передачі електроенергії на високій напрузі постійного струму (back-to-back HVDC), вироблених компаніями Siemens і ABB, з потужністю близько 400-2000 МВА. Модульні багаторівневі перетворювачі в порівнянні з іншими типами напівпровідникових перетворювачів мають ряд істотних переваг. Наявність великої кількості рівнів (100 і вище) дає можливість використання щодо низьковольтних ключів і реалізації низької частоти комутації, що обумовлює високий ККД перетворювача. Заявлений ККД системи передачі електроенергії системи електропостачання HVDC з модульними багаторівневими перетворювачами виробництва Siemens складає 99,5%. Крім цього модульні багаторівневі перетворювачі мають підвищену надійність. Це обумовлено тим, що модульні перетворювачі можуть функціонувати навіть за умов виходу з ладу окремих транзисторних-емнісних модулів. Зручним у виробництві є конструктивна модульність і масштабованість перетворювача. Однак в управлінні модульних багаторівневих перетворювачів існує проблема стабілізації напруги на конденсаторах осередків. В ході проведених досліджень було встановлено, що при використанні класичних алгоритмів управління багаторівневими інверторами (просторово-векторної і синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції) в модульних багаторівневих перетворювачів виникає дисбаланс напруг на конденсаторах осередків модульних багаторівневих інверторів. В результаті цього напруга на одній половині осередків падає до нуля, а напруга на іншій половині осередків зростає в два рази. Це призводить до значного погіршення форми вихідної напруги. У статті представлено покращений алгоритм просторово-векторної модуляції для модульного багаторівневого перетворювача, який забезпечує стабілізацію напруги в осередках перетворювача, а також можливість регулювання амплітуди і частоти вихідної напруги. У програмі Matlab / Simulink створена модель модульного п'ятирівневого модульного інвертора. Результати імітаційного моделювання підтвердили працездатність запропонованого алгоритму управління.

Ключові слова: модульний багаторівневий інвертор; стабілізація напруги ММС; полішена просторово-векторна ШІМ

Надійшла (received) 04.07.2019