

## КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ВХОДНЫХ ТОКОВ В СИСТЕМАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ

А. А. Плахтий<sup>1</sup>, В. П. Нерубацкий<sup>1</sup>, В. Е. Кавун<sup>1</sup>, А. М. Машура<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

**Аннотация.** В статье предложен компенсационный алгоритм управления автономными инверторами напряжения, параллельно запитанных от одной электрической сети (на примере тягового электропривода подвижного состава), который позволяет реализовать взаимную компенсацию высших гармоник суммарных потребляемых токов, чем достигается улучшение качества входного тока, и как следствие улучшение электромагнитной совместимости с питающей сетью.

**Ключевые слова:** компенсация высших гармоник, ЭМС, автономный инвертор напряжения, однократная модуляция, ШИМ.

### Введение

Все большая часть электроподвижного состава (ЭПС) железных дорог и метрополитенов переходит с реостатно-контактных систем управления с коллекторными двигателями постоянного тока на асинхронный электропривод с автономными инверторами напряжения (АИН). Это ведёт к значительному улучшению энергоэффективности ЭПС, а именно повышению КПД и снижению эксплуатационных затрат. Однако асинхронный тяговый электропривод вызывает значительную эмиссию высших гармоник токов в контактную сеть и рельсовые цепи железнодорожной автоматики, что обостряет вопрос ухудшения качества электроэнергии в контактной сети и ухудшение электромагнитной совместимости тяговых преобразователей ЭПС с цепями железнодорожной автоматики. Классическим методом борьбы с высшими гармониками тяговых токов на электроподвижном составе является применение пассивных фильтров низких частот. Однако существенными недостатками такого метода являются значительные массогабаритные показатели, высокая стоимость, а также низкая эффективность подавления низкочастотных гармонических составляющих.

### Постановка задачи

Задачами исследования является анализ показателей эмиссии высших гармоник тяговых токов АИН при реализации различных алгоритмов модуляции, а также разработка алгоритма управления тяговыми АИН, позволяющего обес-

печить снижение эмиссии высших гармоник за счёт их взаимной компенсации.

### 1. Анализ качества входного тока АИН

Входной ток АИН содержит как постоянную составляющую, так и значительную часть высших гармоник. Качество постоянного тока принято оценивать коэффициентом пульсации  $K_n$ , который, согласно ГОСТ 23875-88 и ДСТУ 3466-96, определяется как отношение наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего напряжения (либо тока) к его постоянной составляющей:

$$K_n = \frac{I_{\max}}{I_{DC}}, \quad (1)$$

где  $I_{DC}$  – постоянная составляющая входного тока АИН;  $I_{\max}$  – среднеквадратическое значение наибольшей гармоники.

Таким образом,  $K_n$  учитывает влияние только одной наибольшей гармоники и не учитывает наличие прочих высших гармонических составляющих, хотя их суммарное воздействие на электрическую сеть может быть не менее существенным. В связи с этим в работе предложено качество потребляемого тока оценивать коэффициентом гармонических искажений по постоянному току  $THD_{DC}$ , согласно следующего выражения:

$$THD_{DC} = \frac{100 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_{DC}}, \quad (2)$$

где  $I_n$  – среднеквадратическое значение  $n$ -ой гармоники входного тока;  $N$  – номер гармоники, для которой проводится анализ,  $N = 50$ .

## 2. Алгоритмы модуляции в тяговых инверторах

Факторами, определяющими спектр и амплитуду высших гармоник входного тока АИН, являются тип модуляции и несущая частота. На данный момент в алгоритмах управления АИН на ЭПС используются как режимы однократной модуляции, так режимы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В свою очередь в широтно-импульсной модуляции как опорные сигналы, так и сигналы задания могут быть различными. Существуют односторонние и двусторонние опорные пилообразные сигналы в ШИМ. Сигнал задания ШИМ может быть синусоидальным, трапецеидальным либо реализован в режиме предмодуляции или перемодуляции. При этом различные алгоритмы модуляции обуславливают различные динамические потери в ключах, раз-

личные показатели синусоидальности выходного напряжения и тока, а также различные спектры высших гармоник и различные результирующие коэффициенты пульсаций входного тока [1].

Для исследования показателей эмиссии высших гармоник токов, потребляемых тяговыми АИН, с исследуемыми алгоритмами модуляции в программе Matlab была разработана имитационная модель четырёх параллельно включенных тяговых АИН с эквивалентной RL-нагрузкой (рис. 1). Моделирование проводилось со следующими параметрами: напряжение в звене постоянного тока 3 кВ; падение напряжения на ключе 2 В, индуктивность нагрузки 1 мГн, сопротивление нагрузки 2 Ом, частота первой гармоники модулируемого выходного напряжения 50 Гц, сопротивление сети 2 Ом.

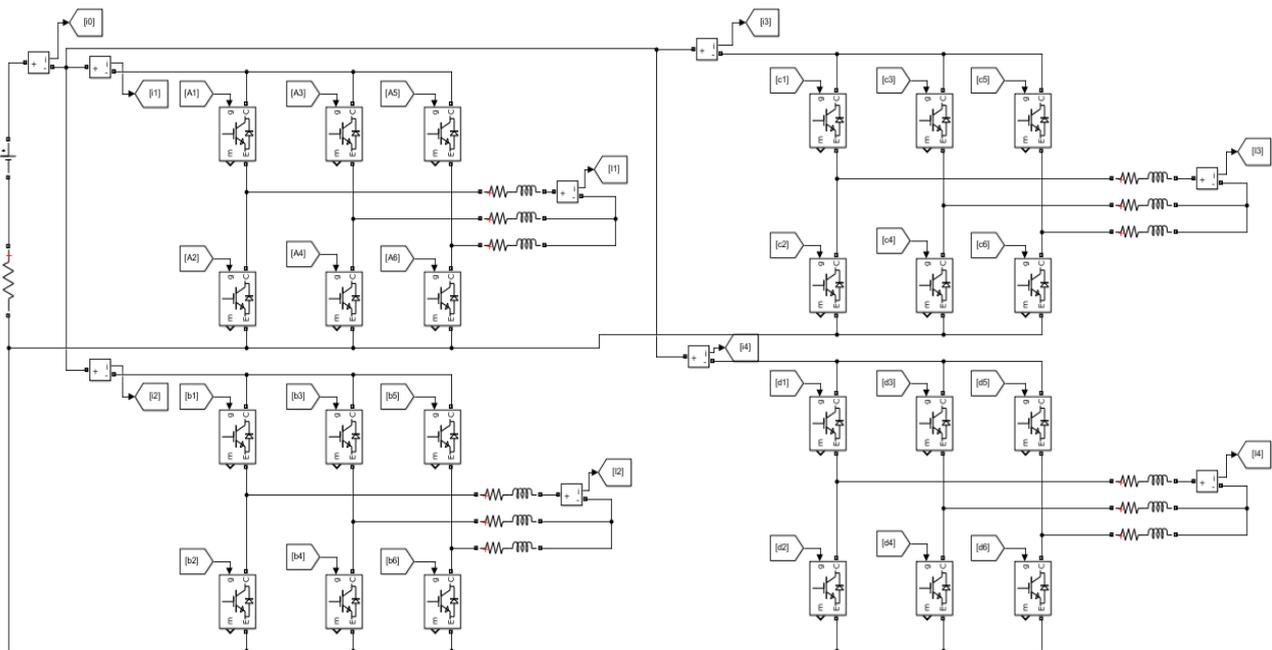


Рис. 1. Модель тягового электропривода с четырьмя инверторами напряжения

Режимы однократной модуляции являются одними из исторически первых алгоритмов модуляции в системах управления тяговыми АИН, а именно алгоритмы 120-ти, 150-ти и 180-ти градусного управления, которые приведены на рис. 2, 4, 6. Достоинством данных алгоритмов модуляции в АИН является низкая частота коммутации силовых ключей, равная частоте модулируемого выходного напряжения, что соответственно ведёт к низким динамическим потерям и высокому КПД АИН [2].

Форма входного тока в режимах однократной модуляции при наличии чисто резистивной нагрузки не будет содержать высших гармоник. Однако в результате наличия в нагрузке индук-

тивной составляющей форма входного тока является пульсирующей и обуславливает наличие высших гармоник, негативно влияющих на питающую сеть.

### 2.1. Режим 120-градусного управления

В режиме 120-градусного управления в каждый момент времени одновременно в проводящем состоянии находятся два силовых ключа АИН, при этом каждый силовой ключ находится в проводящем состоянии в течении одной трети периода модулируемого выходного напряжения. Сигналы управления силовыми ключами, а также форма выходного напряжения АИН в режиме 120-градусного управления приведены на рис. 2.

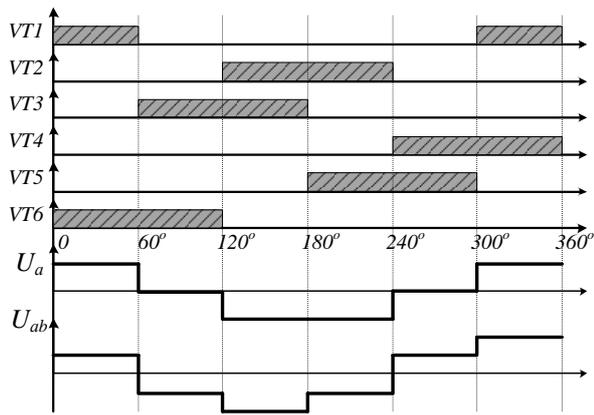


Рис. 2. Сигналы управления ключами и форма выходного напряжения при 120-градусном управлении

Результаты выполненного Фурье-анализа формы входного тока АИН, работающего в режиме 120-градусного управления, с указанными параметрами нагрузки приведено на рис. 3

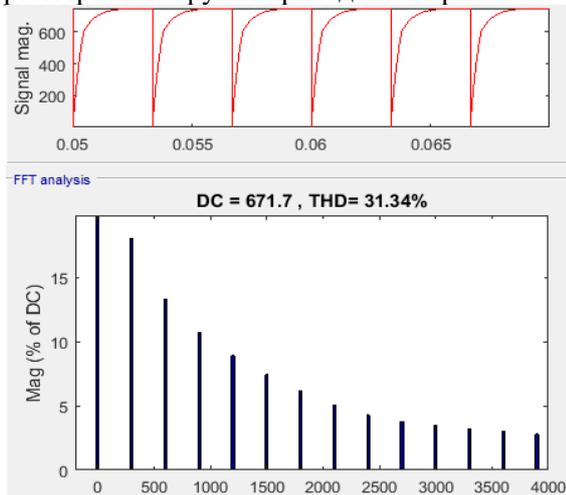


Рис. 3. Спектр высших гармоник входного тока АИН при 120-градусном управлении

Для полученной формы входного тока АИН в режиме 120-градусного управления характерны гармоники с частотами, шестикратными частоте выходного напряжения (т. е. 300 Гц, 600 Гц, 900 Гц и т. д.). В полученном спектре постоянная составляющая  $I_{DC}$  равна 671,7 А, наибольшую амплитуду имеет 6-ая гармоника 121,22 А, а коэффициент пульсации  $K_n$  составляет 18,05 %. В тоже время при учёте остальных высших гармоник  $THD_{DC}$  составляет 31,34 %.

## 2.2. Режим 180-градусного управления

В режиме 180-градусного управления в проводящем состоянии одновременно находятся три ключа инвертора, при этом каждый из ключей находится в проводящем состоянии в течении половины интервала проводящего состояния. Сигналы управления силовыми ключами, а так-

же форма выходного напряжения АИН в режиме 180-градусного управления приведены на рис. 4.

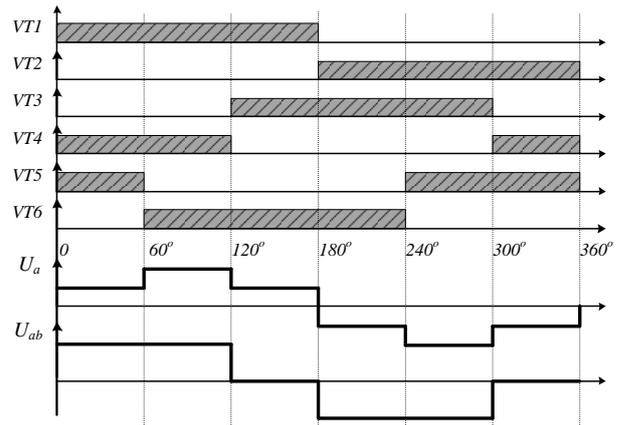


Рис. 4. Сигналы управления ключами АИН и форма выходного напряжения фазы А в режиме 180-градусного управления

Форма потребляемого тока АИН в режиме 180-градусного управления не значительно отличается от формы тока в режиме 120-градусного управления, однако глубина провала мгновенного значения тока значительно меньше, что ведёт к снижению амплитуд высших гармоник.

Полученный спектр высших гармоник входного тока АИН с 180-градусным управлением приведен на рис. 5.

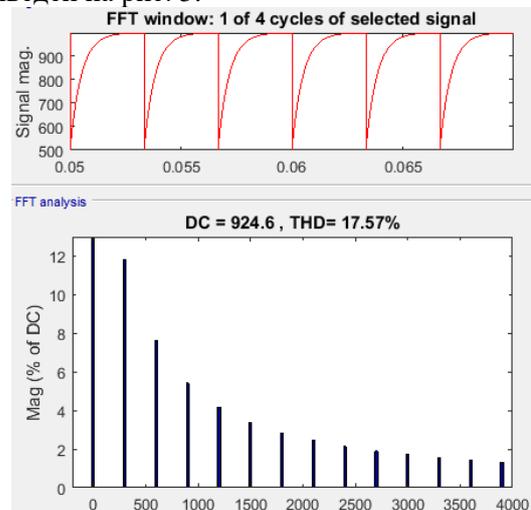


Рис. 5. Спектр высших гармоник входного тока АИН при 180-градусном управлении

Режиму 180-градусного управления при тех же параметрах нагрузки и питающего напряжения соответствует большое значение постоянной составляющей входного тока 924,6 А, а, соответственно, и большая мощность. Кроме этого режим 180-управления обеспечивает улучшенное значение коэффициента гармонических искажений по постоянному току  $THD_{DC}$  и лучшее значение коэффициента пульсаций. Наибольшая 6-ая гармоника равна 109,21 А, а коэффициент

пульсаций  $K_n$  составляет 11,81 %,  $THD_{DC}$  составляет 17,57 %.

### 2.3. Режим 150-градусного управления

В режиме 150-градусного управления ключи находятся в проводящем состоянии в течении  $150^\circ$  от периода выходного напряжения. Одновременно во включенном состоянии попеременно находятся 2, потом 3 ключа. Сигналы управления силовыми ключами АИН в режиме 150-градусного управления приведены на рис. 6.

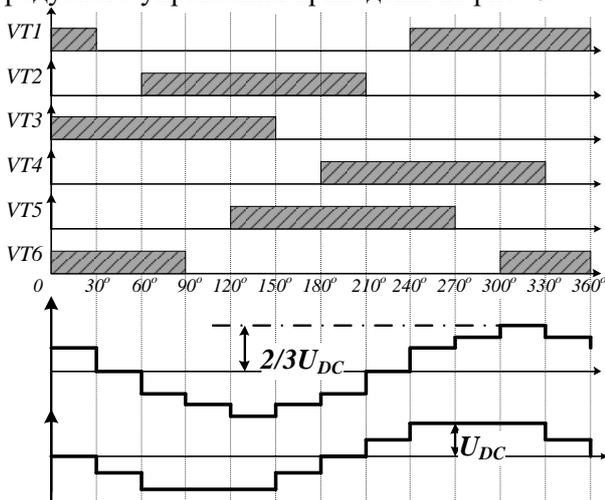


Рис. 6. Сигналы управления ключами АИН и форма выходного напряжения фазы А в режиме 150-градусного управления

Результаты Фурье-анализа входного тока АИН в режиме 150-управления приведено на рис. 7.

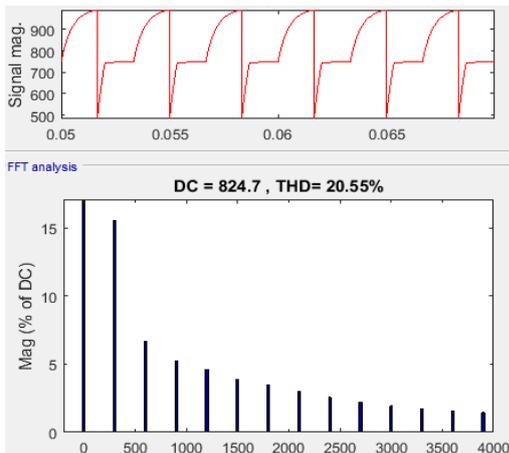


Рис. 7. Спектр высших гармоник входного тока АИН при 150-градусном управлении

В полученном спектре входного тока при 150-градусном управлении постоянная составляющая  $I_{DC}$  равна 824,7 А, наибольшую амплитуду имеет 6-ая гармоника – 128,15 А, а коэффициент пульсации  $K_n$  составляет 15,53 %. В тоже время при учёте остальных высших гармоник  $THD_{DC}$  составляет 20,54 %.

В целом режимы однократной модуляции схожи тем, что обуславливают равную пульсность входного тока и схожий спектр гармоник, а также частоту коммутации силовых ключей, равную частоте выходного напряжения, что соответственно ведёт к низким динамическим потерям в силовых ключах, и, как результат, реализации достаточно высокого КПД. При этом режимы отличаются различной потребляемой мощностью, а также различными амплитудами высших гармоник. Наилучшие показатели качества входного тока характерны режиму 180-градусного управления. В тоже время общими недостатками режимов однократной модуляции являются наличие низкочастотных гармонических составляющих, а также отсутствие возможности регулирования амплитуды выходного напряжения и тока, что обуславливает необходимость использования в тяговых инверторах режимов широтно-импульсной модуляции.

### 2.4. Режимы широтно-импульсной модуляции

Широтно-импульсная модуляция в классическом аналоговом исполнении реализуется путём сравнения высокочастотного пилообразного сигнала и низкочастотного синусоидального сигнала. Преимуществом ШИМ перед однократной модуляцией является возможность регулирования амплитуды первой гармоники выходного напряжения, и, соответственно, тока, что является необходимым как при скалярном, так и при векторном управлении асинхронного электропривода [3].

Односторонняя и двусторонняя ШИМ (рис. 8) с синусоидальным сигналом задания являются наиболее распространёнными аналоговыми видами модуляции, и основаны они на сравнении пилообразного сигнала с синусоидой.

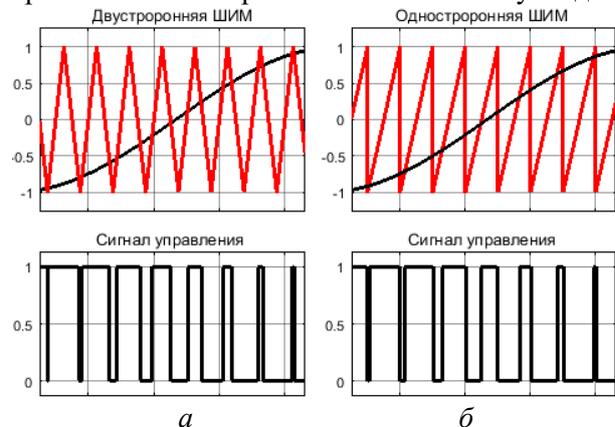


Рис. 8. Широтно-импульсная модуляция: а – с односторонним опорным сигналом; б – с двусторонним опорным сигналом

Результаты Фурье-анализа форм входного тока АИН с односторонней и двусторонней ШИМ с частотой 1 кГц приведено на рис. 9.

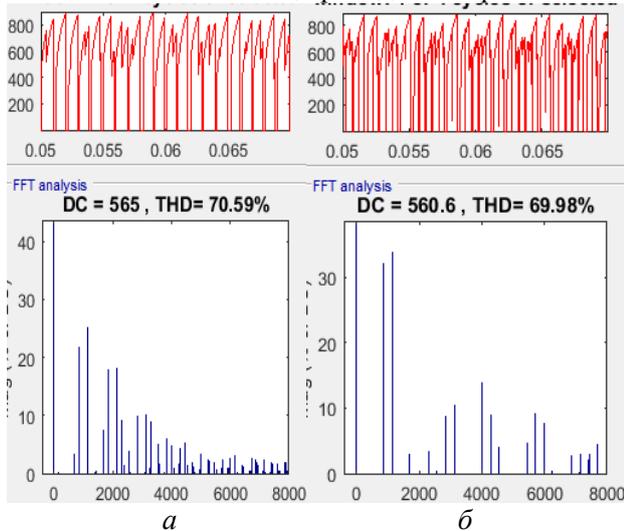


Рис. 9. Фурье-анализ входного тока АИН:  
а – для односторонней ШИМ;  
б – для двусторонней ШИМ

Как видно из рис. 9, спектры входных токов АИН достаточно сильно отличаются. Для режима односторонней ШИМ постоянная составляющая  $I_{DC}$  равна 565,02 А, наибольшую амплитуду имеет 20-я гармоника – 223 А, а коэффициент пульсации  $K_n$  составляет 39,47%, коэффициент гармонических искажений по постоянному току  $THD_{DC}$  составляет 70,59%. Для режима двусторонней ШИМ постоянная составляющая  $I_{DC}$  равна 560,6 А, наибольшую амплитуду имеет 40-я гармоника – 195,84 А, а коэффициент пульсации  $K_n$  составляет 34,96%, коэффициент гармонических искажений по постоянному току  $THD_{DC}$  составляет 69,98%.

В целом стоит отметить, что формы входного тока АИН в режиме ШИМ имеют значительно худшие значения коэффициента гармонических искажений по постоянному току и коэффициенту пульсаций.

### 3. Компенсация высших гармоник в многоинверторных системах

Существуют различные алгоритмы управления многоинверторными системами, которые позволяют получить улучшенные показатели качества выходного либо входного тока [4].

В ходе исследований было установлено, что не только амплитуды, но и фазы высших гармоник зависят от сигналов задания. Схемотехническая реализация параллельного соединения автономных инверторов напряжения в тяговом асинхронном электроприводе позволяет получить эффект взаимной компенсации высших гармоник входных токов и выходных напряжений, чем до-

стигается улучшение показателей качества электроэнергии, потребляемой из контактной сети. При взаимном временном сдвиге сигналов управления ключами отдельных  $k$ -ых параллельно подключённых АИН на необходимые времена компенсации  $t_{COMP\_k}$

$$t_{COMP\_k} = k \cdot \frac{T_{mod}}{n}, \quad (3)$$

где  $T_{mod}$  – период, соответствующий частоте компенсируемой гармоники;  $n$  – число параллельно подключенных АИН;  $k$  – условный порядковый номер моста АИН в многоинверторной системе ( $k = 1, 2, 3, 4$ ).

#### 3.1. Компенсация высших гармоник входного тока в режиме однократной модуляции

При реализации в автономном инверторе напряжения 180-градусного алгоритма управления наиболее целесообразно компенсировать наибольшую гармонику входного тока. Как было установлено, в спектре входного тока АИН с 180-градусным алгоритмом управления наибольшую амплитуду имеет шестая гармоника, которая при формировании частоты выходного напряжения АИН 50 Гц будет иметь частоту 300 Гц. Тогда при наличии четырёх параллельно подключенных АИН, сигналы управления ключей первого, второго, третьего и четвертого инверторов для реализации взаимной компенсации высших гармоник общего входного тока должны быть сдвинуты соответственно на времена  $t_{COMP\_1}, t_{COMP\_2}, t_{COMP\_3}, t_{COMP\_4}$ .

$$t_{COMP\_1} = 1 \cdot \frac{T_{mod}}{n} = 1 \cdot \frac{0,00333}{4} = 0,8333 \text{ } \mu\text{s.}$$

$$t_{COMP\_2} = 2 \cdot \frac{T_{mod}}{n} = 2 \cdot \frac{0,00333}{4} = 1,6666 \text{ } \mu\text{s.}$$

$$t_{COMP\_3} = 3 \cdot \frac{T_{mod}}{n} = 3 \cdot \frac{0,00333}{4} = 2,5 \text{ } \mu\text{s.}$$

$$t_{COMP\_4} = 4 \cdot \frac{T_{mod}}{n} = 4 \cdot \frac{0,00333}{4} = 0,0033 \text{ с.}$$

При реализации взаимного сдвига сигналов управления ключами в четырёх мостах АИН формы входных токов также будут сдвинуты (рис. 10), при этом пульсность суммарного входного тока увеличится, а отношение амплитуды пульсаций к постоянной составляющей уменьшится.

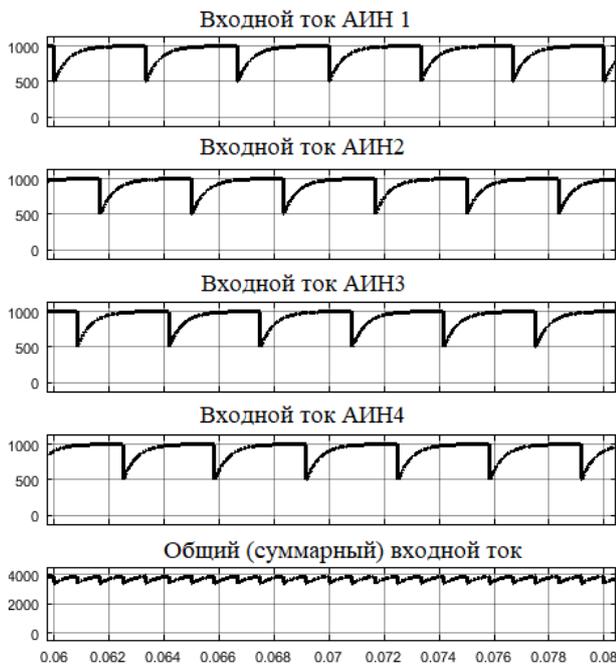


Рис. 10. Формы токов четырёх АИН и общего суммарного потребляемого тока

Результаты Фурье-анализа формы общего потребляемого тока четырёх АИН в режиме компенсации приведены на рис. 11.

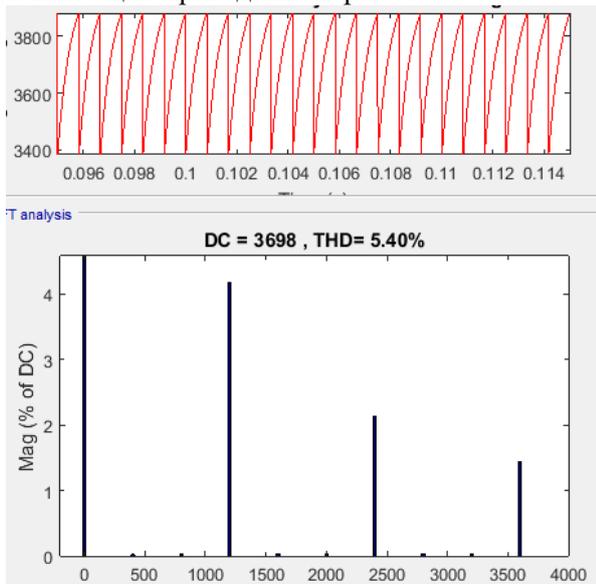


Рис. 11. Фурье-анализ суммарного входного тока четырёх АИН с 180-градусной модуляцией, работающих в компенсационном режиме

Как видно с результатов моделирования, компенсируемая шестая гармоника в форме входного тока полностью удалена. При этом полученный  $K_n$  составляет 4,21 %, а  $THD_{DC}$  снижен до 5,40 %.

### 3.2. Компенсация высших гармоник входного тока в режиме ШИМ

В режиме широтно импульсной модуляции эффект компенсации необходимой гармоники в

многоинверторной системе можно получить как путём временного сдвига сигналов управления ключей отдельных АИН на время компенсации  $t_{COMP}$ , так и путём взаимного равного сдвига опорных сигналов ШИМ, как это показано на рис. 12.

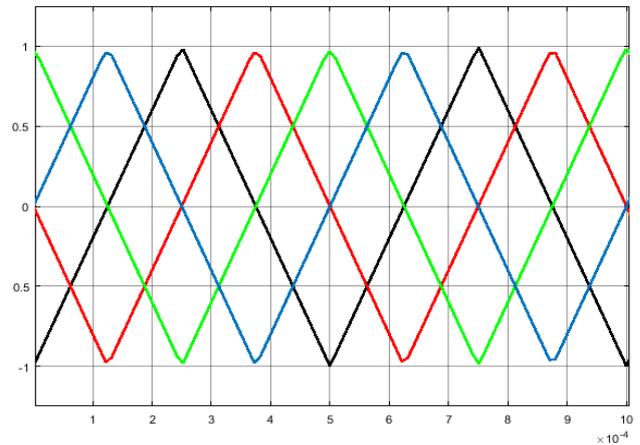


Рис. 12. Синхронизация четырех опорных сигналов в ШИМ для четырёх мостов АИН

Для подтверждения реализации эффекта компенсации высших гармоник проведено имитационное моделирование. Фурье-анализ суммарного входного тока в режиме компенсации приведен на рис. 13.

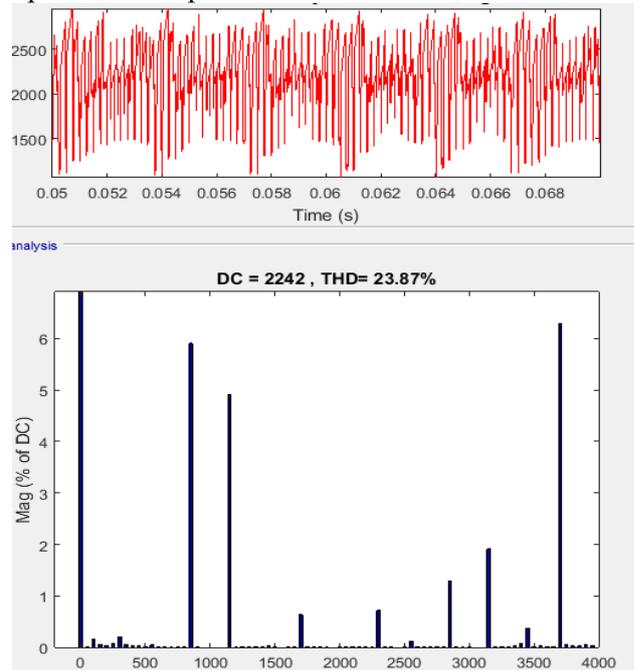


Рис. 13. Фурье-анализ суммарного входного тока четырёх АИН, работающих в режиме двусторонней ШИМ с компенсацией

В спектре суммарного входного тока, потребляемого четырьмя АИН с двусторонней ШИМ, работающих в компенсационном режиме, наибольшую амплитуду имеет 80-я гармоника – 223 А, коэффициент пульсации  $K_n$  составляет 13,96 %, а коэффициент гармонических искаже-

ний по постійному току  $THD_{DC}$  вследствие эффекта компенсации снизился до 23,87 %.

Следует отметить, что при увеличении числа параллельно работающих мостов, работающих в

компенсационном режиме, эффект компенсации высших гармоник усиливается.

Данные полученные в ряде имитационных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры эмиссии высших гармоник тяговыми инверторами

Показатели	Однократная модуляция			ШИМ	
	120°	180°	150°	1-стор.	2-стор.
Частота опорного сигнала, Гц	50	50	50	1000	1000
Постоянная составляющая входного тока одного АИН, А	785,9	942,6	901,6	741,4	742,5
Входная мощность одного АИН, кВА	1892,68	2701,43	2467,58	1668,15	1672,85
	Без компенсации				
Порядок наибольшей гармоники в спектре входного тока	6	6	6	20	40
Коэффициент гармонических искажений по постоянному току $THD_{DC}$ , %	31,08	17,57	20,59	70,23	68,79
Коэффициент пульсации входного тока $K_n$ , %	18,05	11,81	15,53	39,47	34,96
	В режиме компенсации				
Порядок наибольшей гармоники в спектре входного тока	24	24	24	80	80
Коэффициент гармонических искажений по постоянному току $THD_{DC}$ , %	11,37	5,40	6,08	18,86	23,87
Коэффициент пульсации входного тока $K_n$ , %	8,93	4,21	4,6	4,81	13,96

Как видно из таблицы 1, предложенный алгоритм компенсации высших гармоник входных токов в многоинверторной системе позволяет в значительной степени улучшить гармонический состав общего входного тока и результирующие показатели коэффициента пульсации и коэффициента гармонических искажений по постоянному току как в режиме однократной модуляции, так и ШИМ.

#### Выводы:

1) Сравнительный анализ алгоритмов однократной и широтно-импульсной модуляции в автономных инверторах напряжения показал, что меньшую эмиссию высших гармоник, обуславливают алгоритмы однократной модуляции, а именно режим 180-градусного управления.

2) Синхронизация систем управления нескольких параллельно подключенных автономных

инверторов напряжения, запитанных от одной сети, и реализация взаимного сдвига сигналов управления ключами на времена компенсации позволяет реализовать эффект взаимной компенсации высших гармоник входных токов, чем достигается значительное улучшение коэффициента пульсации входного тока и коэффициента гармонических искажений по постоянному току.

3) Проведённое имитационное моделирование подтвердило, что предложенный алгоритм компенсации высших гармоник в многоинверторной системе позволяет значительно снизить эмиссию высших гармоник в питающую сеть при реализации режимов однократной и широтно-импульсной модуляции.

4) Предложенный метод компенсации применим не только для электроподвижного состава, но и для других многоинверторных систем, запитанных от общей электрической сети.

## Список использованной литературы

## References

1. Михальський, В. М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частот із широтно-імпульсною модуляцією - [Текст]. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.
2. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники - [Текст], уч. пособие, изд. 3-е. Новосибирск: изд. НГТУ, 2004, 672 с.
3. Rashid, M. H., Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook 3rd. ed. - [Text]. Elsevier Inc. 2011, 1389 p.
4. Lazzarin, T., Bauer, G., Barbi, I. A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source inverters: analysis, design and experimental results - [Text]. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 6, pp. 2194–2204, Jun. 2013.
5. Zhuang, X., Rui, L., Hui, Z., Dianguo X., and Zhang, C. H., Control of parallel multiple converters for direct-drive permanent-magnet wind power generation systems - [Text]. IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, Mar. 2012. no. 3, pp. 1259–1270.
6. Borrega, M., Marroyo, L., Gonzalez, R., Balda, J., Agorreta, J. L., Modeling and control of a master-slave PV inverter with n-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors - [Text]. IEEE Trans. Power Electron, Jun. 2013, vol. 28, no. 6, pp. 2842–2855
7. McGrath, B. P., Holmes, D. G., Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters - [Text]. IEEE Trans. Ind. Electron, Aug. 2002, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
8. Naderi, R., Rahmati, A., Phase-shifted carrier PWM technique for general cascaded inverters- [Text]. IEEE Trans. Power Electron, May. 2008 vol. 23, no. 3, pp. 1257–1269.
9. Kostic, D. J., Avramovic, Z. Z., Ciric, N. T., A new approach to theoretical analysis of harmonic content of PWM waveforms of single- and multiple-frequency modulators - [Text]. IEEE Trans. Power Electron, Oct. 2013, vol. 28, no. 10, pp. 4557–4567.

1. Michalsky, V. M. (2013), Means for improving the quality of electricity at the input and output of frequency converters with pulse-width modulation [Zasoby pidvyshchennya yakosti elektroenerhiyi na vkhodi i vykhodi peretvoryuvachiv chastot iz shyrotno-impulsnoyu modulyatsiyeyu]. - K.: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 340 p.
2. Zinoviev, G. S. (2004), Fundamentals of Power Electronics [Osnovy silovoy elektroniki], Uk. allowance, ed. 3rd Novosibirsk: ed. NGTU, 672 p.
3. Rashid, M. H. (2011), Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook 3rd. ed. Elsevier Inc. 1389 p.
4. Lazzarin, T., Bauer, G., Barbi, I. (2013), A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source inverters: analysis, design and experimental results. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 6, pp. 2194–2204.
5. Zhuang, X., Rui, L., Hui, Z., Dianguo X., and Zhang, C. H., (2012), Control of parallel multiple converters for direct-drive permanent-magnet wind power generation systems. IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 3, pp. 1259–1270.
6. Borrega, M., Marroyo, L., Gonzalez, R., Balda, J., Agorreta J. L., (2013), Modeling and control of a master-slave PV inverter with n-paralleled inverters and three-phase three-limb inductors. IEEE Trans. Power Electron, vol. 28, no. 6, pp. 2842–2855
7. McGrath, B. P., Holmes, D. G., (2002), Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters. IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
8. Naderi, R., Rahmati, A., (2008), Phase-shifted carrier PWM technique for general cascaded inverters - [Text]. IEEE Trans. Power Electron, vol. 23, no. 3, pp. 1257–1269.
9. Kostic, D. J., Avramovic, Z. Z., Ciric, N. T., (2013), A new approach to theoretical analysis of harmonic content of PWM waveforms of single- and multiple-frequency modulators. IEEE Trans. Power Electron, vol. 28, no. 10, pp. 4557–4567.

## COMPENSATION OF INPUT CURRENT HARMONICS IN PARALLEL MULTIPLE VOLTAGE SOURCE INVERTERS

O. A. Plakhtii<sup>1</sup>, V. P. Nerubatskyi<sup>1</sup>, A. M. Kavun<sup>1</sup>, A. V. Mashura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ukrainian State University of Railway Transport

<sup>2</sup> National Technical University "KhPI"

**Abstract.** An increasing proportion of the rolling stock of railways and subways passes from collector motors with rheostat-contactor control systems to asynchronous electric drive, which is controlled by autonomous voltage inverters. This leads to a significant improvement in the energy efficiency of the electric roll-

ing stock, namely, to an increase in the efficiency of the electric rolling stock and a reduction in operating costs. However, the asynchronous electric drive also has its drawbacks, namely, it causes a significant emission of higher harmonics of traction currents in the contact network (catenary) and electrical rail circuits of railway automation, exacerbates the issue of the quality of electrical energy in the contact network and electromagnetic compatibility of traction currents and rail automation.

The classical method of combating higher harmonics of traction currents on an electric rolling stock is the use of passive low-pass filters of various configurations. However, this method has significant drawbacks, namely, it causes significant mass dimensions, has a significant cost, and also has a sufficiently low efficiency of suppressing low-frequency harmonics of traction currents. This calls for a further search for ways to reduce the emission of higher harmonics from traction inverters by concentrating not additional filter devices, but the introduction of more efficient control algorithms for traction inverters that lead to improved electromagnetic compatibility.

Proposed the synchronization of the control systems of several parallel connected independent voltage inverters powered from the same network and realization of the mutual shift of the key control signals for the compensation time makes it possible to realize the compensation effect of the higher harmonics of the input currents, thus achieving a significant improvement in the ripple ratio of the input current and the DC harmonic distortion factor. The simulations carried out have confirmed that the proposed algorithm for compensation of higher harmonics in the multi-inverter system allows to significantly reduce the emission of higher harmonics into the power supply network when realizing single-pulse and pulse-width modulation modes. The proposed compensation method is applicable not only for the electric rolling stock, but also for any multi-inverter system powered from the common electrical network

**Keywords:** compensation current harmonics, EMC, voltage source inverter, single-modulation, PWM.

## КОМПЕНСАЦІЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМІВ, СПОЖИТИХ ТЯГОВИМ АСИНХРОНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

О. А. Плахтій<sup>1</sup>, В. П. Нерубацький<sup>1</sup>, В.С. Кавун<sup>1</sup>, А.М. Машура<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український державний університет залізничного транспорту

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

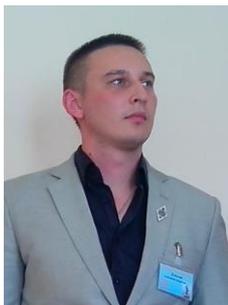
**Анотація.** Все більша частина електрорухомого складу залізних доріг та метрополітенів переходить від колекторних двигунів з реостатно-контактними системи керувань до асинхронного електроприводу, який керується автономними інверторами напруги. Це призводить до значного покращення енергетичної ефективності електрорухомого складу, а саме до підвищення коефіцієнта корисної дії електрорухомого складу та зменшення експлуатаційних витрат. Проте асинхронний електропривод має і свої недоліки, а саме зумовлює значну емісію вищих гармонік тягових струмів до контактної мережі та електричних рейкових кіл залізничної автоматики, що загострює питання якості електричної енергії в контактній мережі та електромагнітної сумісності тягових струмів та залізничної автоматики.

Класичним методом боротьби з вищими гармоніками тягових струмів на електрорухомому складі є застосування пасивних фільтрів низьких частот різної конфігурації. Проте даний метод має значні недоліки, а саме зумовлює значні масо габарити, має суттєву вартість, а також має досить низьку ефективність подавлення низькочастотних гармонік тягових струмів. Це зумовлює необхідність подальшого пошуку можливостей зменшення емісії вищих гармонік від тягових інверторів шляхом впровадження не додаткових пристроїв-фільтрів, а впровадження більш ефективних алгоритмів управління тяговими інверторами, які обумовлюють покращення показників електромагнітної сумісності.

На базі виконаного аналізу спектрів вищих гармонік вхідних струмів від автономних інверторів напруги при реалізації різноманітних алгоритмів, як одноразової модуляції так і ШІМ, запропоновано компенсаційний алгоритм управління тяговими інверторами напруги, який за рахунок синхронізації систем керування та взаємного зсуву сигналів керування силовими ключами в окремих мостах на час компенсації дозволяє реалізувати взаємну компенсацію вищих гармонік вхідних струмів, чим досягається поліпшення коефіцієнту пульсації вхідного струму.

**Ключові слова:** компенсація вищих гармонік, EMC, автономний інвертор напруги, однократна модуляція, ШІМ.

Получено 24.03.2018



**Плахтий Александр Андреевич**, к.т.н, инженер-электроник конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН», ст. преп. кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Ул. Гвардейцев-Широнивцев 3А, Харьков, Украина, E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com, тел. +38-093-917-60-20

**Plakhtii Oleksandr**, PhD, senior lecturer of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Sq. Feuerbach, 7, Kharkov, Ukraine, E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com, tel. + 38-093-917-60-20

**ORCID ID:** 0000-0002-1535-8991



**Нерубацкий Владимир Павлович**, к.т.н, ст. преп. кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина. E-mail: NVP9@i.ua, тел. +38-096-821-73-96

**Nerubatskyi Volodymyr**, PhD, senior lecturer of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Sq. Feuerbach, 7, Kharkov, Ukraine, E-mail: NVP9@i.ua, tel. +38-096-821-73-96

**ORCID ID:** 0000-0002-4309-601X



**Кавун Виталий Евгеньевич**, аспирант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Инженер-электроник конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН». Пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, E-mail: vitaliykavun2014@gmail.com, тел. +38-050-98-19-005

**Kavun Vitaliy**, post-graduate student of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. The electronic engineer of the design office of the company "VO OVEN". Sq. Feuerbach, 7, Kharkov, Ukraine, E-mail: vitaliykavun2014@gmail.com, tel. + 38-050-98-19-00

**ORCID ID:** 0000-0002-9411-5567



**Машура Артем Вячеславович**, аспирант кафедры промышленной и биомедицинской электроники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», инженер-конструктор конструкторского бюро компании «ВО ОВЕН». Ул. Гвардейцев-Широнивцев 3А, Харьков, Украина, E-mail: artemmashura94@gmail.com, тел. +38-099-343-30-72

**Mashura Artem**, postgraduate student of the pulpit of Industrial and Biomedical Electronics of the National Technical University "KhPI", the design engineer of the design office of the company "VO OWEN". Gvardeitsev-Shironintcev st., 3A, Kharkov, Ukraine, E-mail: artemmashura94@gmail.com, tel. + 38-099-343-30-72

**ORCID ID:** 0000-0002-6016-7801