

## СНИЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Вопросам повышения электромагнитной совместимости электровозов переменного тока с системами тягового и внешнего электроснабжения на сегодняшний день уделяется особое внимание. Одним из направлений решения данной задачи является снижение негативного влияния оборудования электровоза на качество электроэнергии в тяговой сети. Влияние электровозов проявляется в искажении синусоидальной формы напряжения, подаваемого в тяговую сеть электроснабжающей организацией. Природа этого явления заключается в том, что распределенная индуктивность и распределенная емкость контактной сети вызывают переходные колебательные процессы в системе «контактная сеть – электровоз». В результате таких переходных процессов возникают высокочастотные свободные колебания напряжения на токоприемнике электровоза с частотами 750 – 1950 Гц.

Свободные колебания напряжения на токоприемнике (см. рис.1) вызваны процессами перехода инвертора электровоза из режима проводимости в режим коммутации в момент подачи управляющих импульсов  $\beta$  на тиристоры (возникают коммутационные колебания) и обратным переходом в режим проводимости после окончания коммутации в момент  $\beta - \gamma$  (возникают послекоммутационные колебания).

Возникновение высокочастотных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза в процессе сетевой коммутации объясняется тем, что во время подачи управляющих импульсов с углом  $\beta$  на тиристоры инвертора происходит резкое снижение эквивалентного индуктивного сопротивления электровоза. Снижение эквивалентного сопротивления происходит из-за возникновения тока короткого замыкания, протекающего через коммутирующие тиристорные плечи инвертора и вторичные обмотки силового трансформатора электровоза.

Результатом этого является скачок принужденной составляющей напряжения контактной сети на токоприемнике на величину  $\Delta U_H$  (см.

рис. 1) и возникновение высокочастотных коммутационных колебаний этого напряжения. Причиной появления этих колебаний является возникновение колебательного контура, который образован результирующей индуктивностью электровоза и контактной сети, а также емкостью контактной подвески относительно земли.

После окончания сетевой коммутации в момент перехода инвертора в режим проводимости (угол  $\beta - \gamma$ ) возникают подобные им послекоммутационные колебания. Данные колебания появляются вследствие увеличения принужденной составляющей напряжение контактной сети на токоприемнике на величину  $\Delta U_K$  из-за увеличения эквивалентного индуктивного сопротивления электровоза.

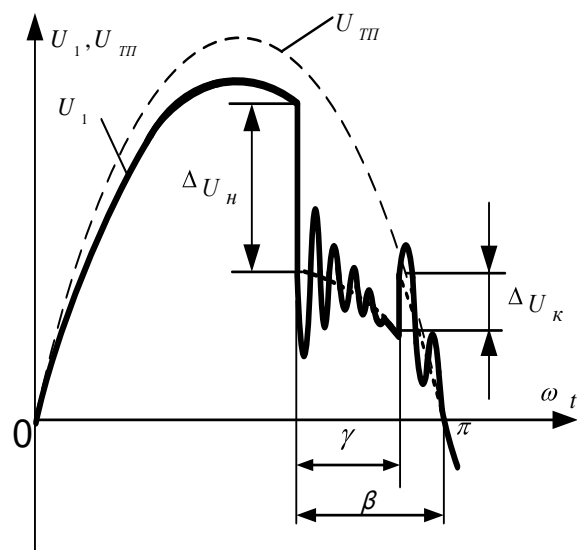


Рис. 1. Свободные колебания напряжения на токоприемнике электровоза ( $U_{III}$  – напряжение на шинах тяговой подстанции,  $U_1$  – напряжение на токоприемнике электровоза)

После окончания сетевой коммутации в момент перехода инвертора в режим проводимости (угол  $\beta - \gamma$ ) возникают подобные им послекоммутационные колебания. Данные колебания появляются вследствие увеличения принужденной составляющей напряжения

контактной сети на токоприемнике на величину  $\Delta U_K$  из-за увеличения эквивалентного индуктивного сопротивления электровоза.

Одним из путей снижения амплитуд коммутационных и послекоммутационных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза является воздействие на протекание токов в преобразователе в процессе сетевой коммутации инвертора электровоза с помощью другого алгоритма управления. Как уже было сказано выше причина возникновения свободных колебаний напряжения на токоприемнике электровоза – резкий скачок принужденной составляющей напряжения в контактной сети, являющийся результатом короткого замыкания тока через коммутирующие тиристорные плечи инвертора электровоза и части секций вторичной обмотки тягового трансформатора электровоза.

Особенностью предлагаемого алгоритма управления инвертором является постепенное снижение принужденной составляющей напряжения на токоприемнике электровоза за счет поэтапного снижения его эквивалентного индуктивного сопротивления. На рис. 2 показана форма кривой напряжения в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, на которой видно, что принужденная составляющая напряжения снижается не так резко как при типовом алгоритме (см. на рис. 1 величину  $\Delta U_H$ ), а постепенно в два этапа: сначала на величину  $\Delta U_{H1}$ , а затем на  $\Delta U_{H2}$ . Это позволяет снизить амплитуду свободных коммутационных колебаний, что приводит к снижению коэффициента искажения синусоидальности напряжения в первичной обмотке тягового

трансформатора электровоза, а значит и в контактной сети.

Проведенное математическое моделирование процессов работы инвертора электровоза в номинальном режиме на 4-ой зоне регулирования с типовым и предлагаемым алгоритмами управления показало, что коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети с предлагаемым алгоритмом управления уменьшился на 21,24 % по сравнению с типовым. Это дает достаточно хорошее повышение качества электроэнергии в тяговой сети при работе электровоза в рекуперативном торможении.

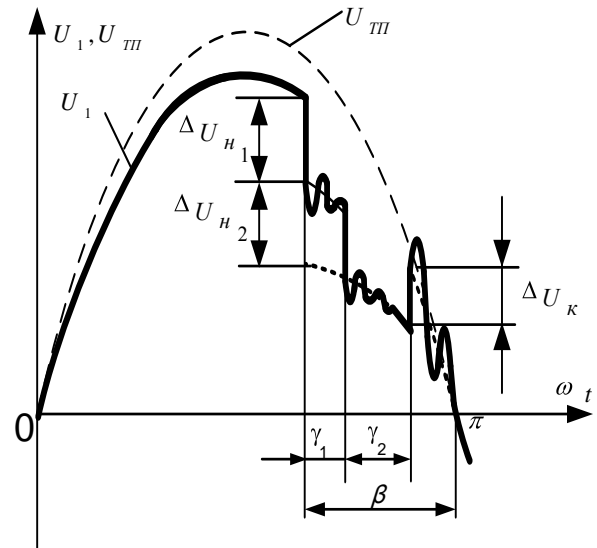


Рис. 2. Форма напряжения на токоприемнике электровоза при новом способе управления ( $U_{ТП}$  – напряжение на шинах тяговой подстанции,  $U_1$  – напряжение на токоприемнике электровоза)

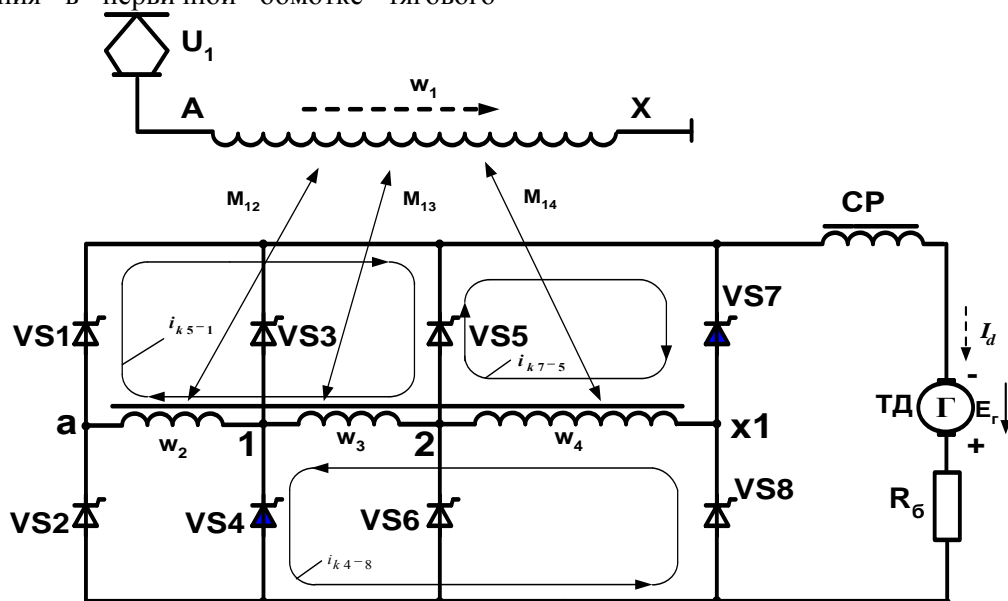


Рис. 3. Схема протекания токов в инверторе электровоза во время сетевой коммутации на IV зоне регулирования напряжения инвертора с предлагаемым алгоритмом управления

### Описание предлагаемого алгоритма на IV зоне регулирования напряжения

Пусть в полупериод питающего напряжения, обозначенный на рис. 3 пунктирной стрелкой, после фазовой коммутации ток инвертора протекал через плечи VS4 и VS7. В момент  $\beta$  подаются импульсы на тиристоры плеча VS5. Тем самым образуется короткозамкнутый контур через секцию трансформатора 2-х<sub>1</sub> и тиристоры плеч VS5 и VS7. В тоже время за счет секции 1-2 инвертор продолжает работать в режиме проводимости. После окончания коммутации в контуре VS5-VS7 (после закрытия тиристора VS7) подаются импульсы управления на тиристоры плеч VS1 и VS8. В результате этого образуется два короткозамкнутых контура, один из которых состоит из секций трансформатора а-1 и 1-2 и тиристорами плеч VS1 и VS5, второй – секциями 1-2 и 2-х<sub>1</sub> и тиристорами плеч VS4 и VS8.

Под действием ЭДС двух секций вторичной обмотки коммутация в контуре VS1-VS5 заканчивается раньше, переводя в режим проводимости секцию трансформатора а-1. После за-

крытия плеча VS4 сетевая коммутация заканчивается.

Особенность данного алгоритма заключается в том, что при создании контура VS5-VS7 инвертор продолжает проводить ток через плечи VS4 и VS5, т.е. в момент начала коммутации не происходит полного закорачивания секций вторичной обмотки трансформатора. В результате этого в кривой выпрямленного напряжения добавляется дополнительный положительный участок соответствующий этому времени. При подаче импульсов на плечи VS1 и VS8 закорачиваются все секции, что соответствует нулевому значению напряжения на инверторе. После закрытия VS5 в кривой выпрямленного напряжения появляется отрицательная область соответствующая напряжению на секции а-1. После окончания сетевой коммутации выпрямленное напряжение равно суммарному напряжению всех секций, участвовавших в коммутации (рис.4). Такой порядок организации коммутации сглаживает кривую выпрямленного напряжения и соответственно кривую первичного напряжения, что в свою очередь уменьшает амплитуду свободных колебаний.

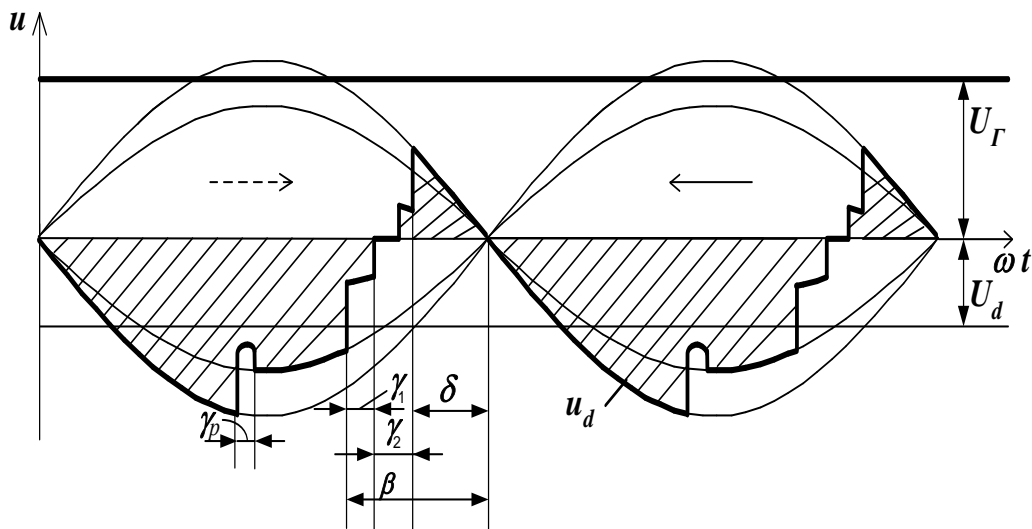


Рис. 4. Осциллограмма выпрямленного напряжения инвертора на IV зоне регулирования инвертора с предлагаемым алгоритмом управления

Кроме этого, разнесение во времени одновременного участия в двух контурах коммутации секции 2-х<sub>1</sub> позволяет избежать появления отрицательного напряжения на этой секции, возникающего за счет ЭДС самоиндукции от коммутационных токов. Это позволяет увеличить скорость протекания коммутации и при постоянном угле запаса уменьшить угол  $\beta$ . Процессы протекания коммутации на II и III зонах регулирования аналогичны процессам на IV зоне. Для примера на рис. 5 изображена

схема протекания токов в инверторе электровоза во время сетевой коммутации на III зоне.

В табл. 1 представлен предлагаемый алгоритм управления инвертором электровоза.

На рис. 6 и 7 представлены осциллограммы процессов моделирования работы инвертора на IV зоне регулирования с типовым (рис. 6) и предлагаемым (рис. 7) алгоритмами управления.

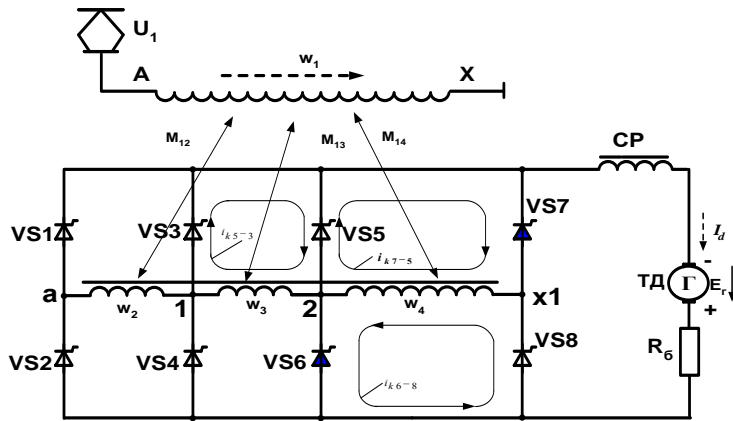


Рис. 5. Схема протекания токов в инверторе электровоза во время сетевой коммутации на III зоне с предлагаемым алгоритмом управления

Таблица 1

Предлагаемый алгоритм управления инвертором электровоза

Зона регулирования	Полупериод	Плечи инвертора							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	→	-	-	$\beta_p$	-	-	$\beta_p$	-	-
	←	-	-	-	$\beta_p$	$\beta_p$	-	-	-
II	→	$\beta_3$	-	$\beta$	$\beta_p$	-	$\beta_3$	-	-
	←	-	$\beta_3$	$\beta_p$	$\beta$	$\beta_3$	-	-	-
III	→	-	-	$\beta_3$	-	$\beta$	$\beta_p$	-	$\beta_3$
	←	-	-	-	$\beta_3$	$\beta_p$	$\beta$	$\beta_3$	-
IV	→	$\beta_3$	-	-	$\beta_p$	$\beta$	-	-	$\beta_3$
	←	-	$\beta_3$	$\beta_p$	-	-	$\beta$	$\beta_3$	-

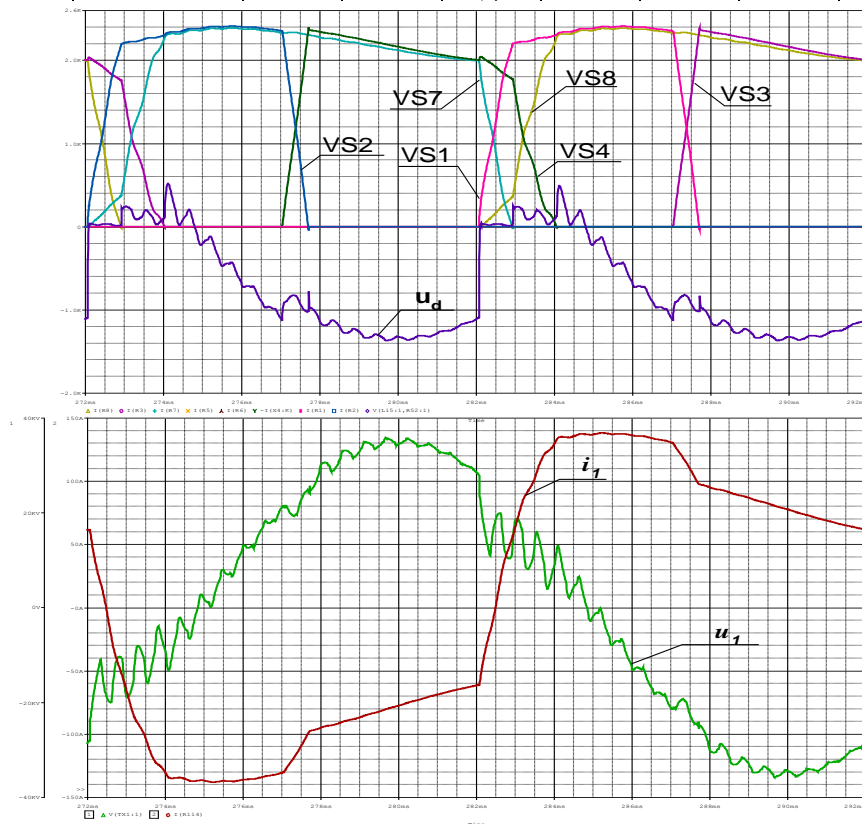


Рис. 6. Осциллограммы кривых выпрямленного напряжения  $U_d$  и токов плеч 1, 2, 3, 4, 7, 8 инвертора, переменного напряжения  $U_1$  и тока  $I_1$  в первичной обмотке тягового трансформатора при моделировании процессов работы инвертора на IV зоне регулирования с типовым алгоритмом управления при  $\beta = 53 \text{ эл.град}$ .

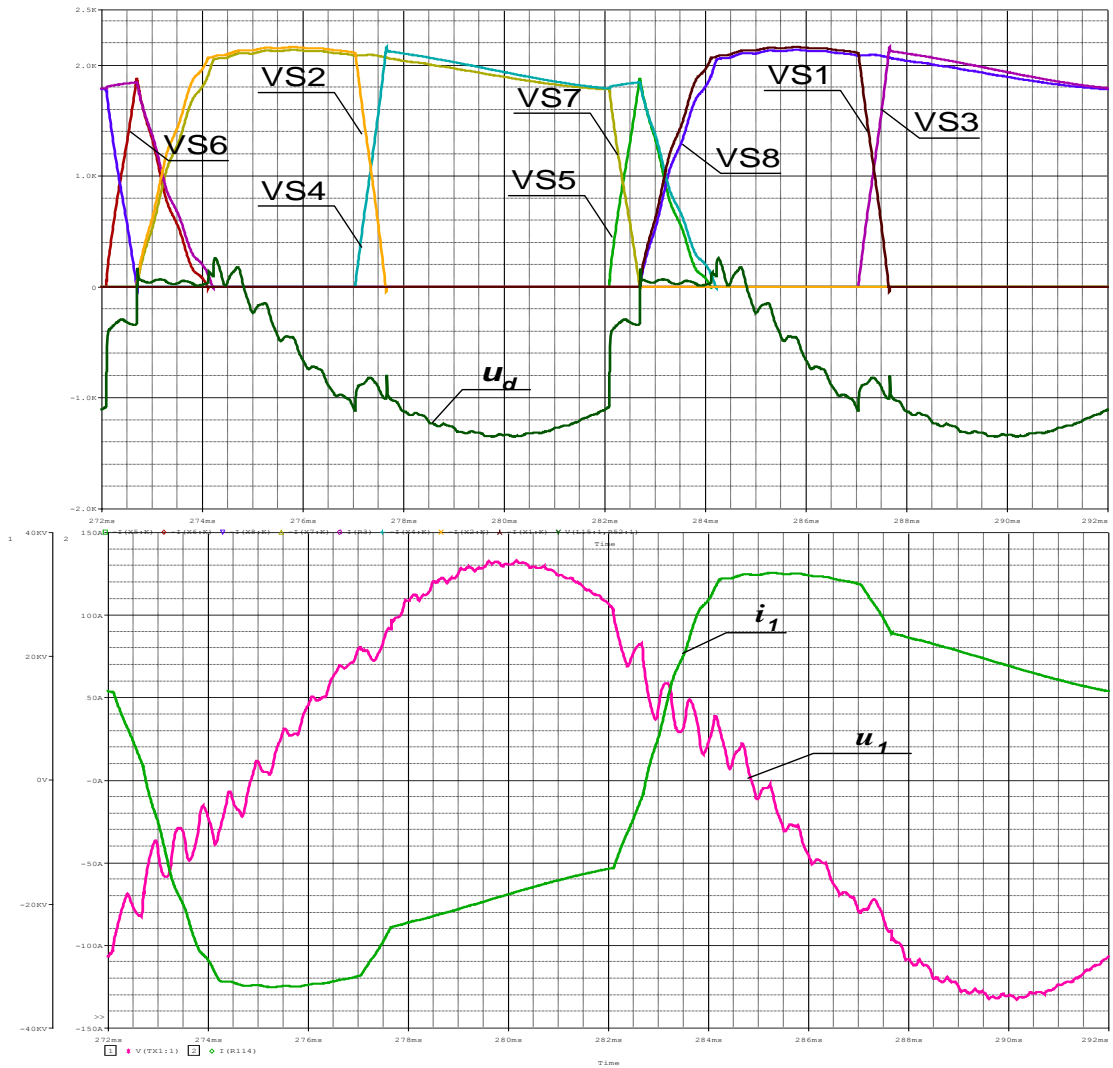


Рис. 7. Осциллограммы кривых выпрямленного напряжения  $U_d$  и токов плеч 1, 2, 3, 4, 7, 8 инвертора, переменных напряжения  $U_1$  и тока  $I_1$  в первичной обмотке тягового трансформатора при моделировании процессов работы инвертора на IV зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления при  $\beta = 53$  эл.град.

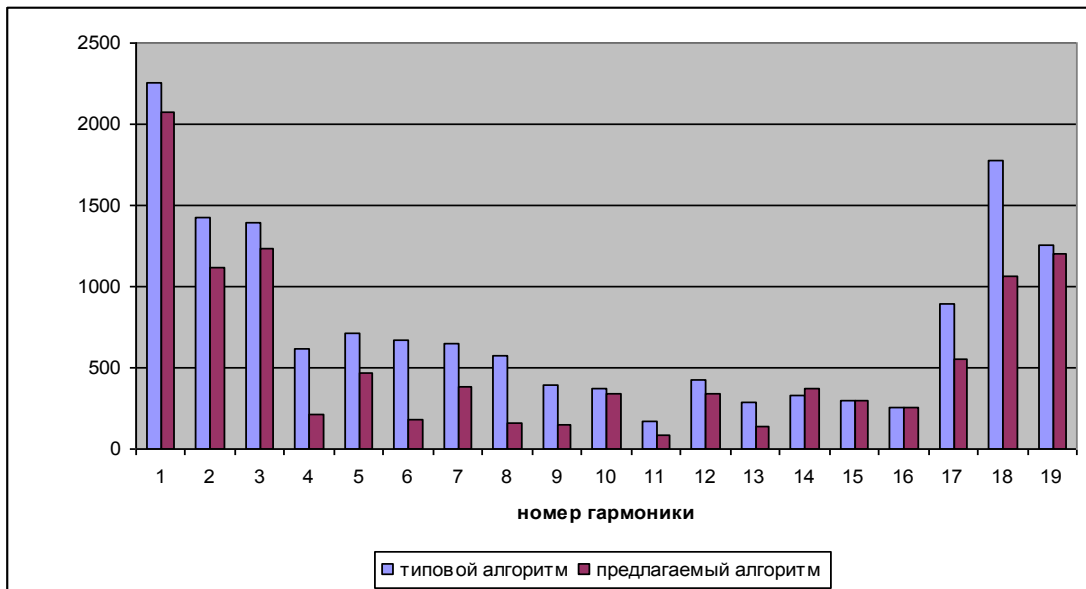


Рис. 8. Гармонический состав переменного напряжения на токоприемнике электровоза при работе инвертора в номинальном режиме с типовым и предлагаемым алгоритмами управления

Для оценки коэффициентов искажения синусоидальности напряжения в контактной сети при работе инвертора на IV зоне регулирования с типовым и предлагаемым алгоритмами был сделан анализ гармонического состава переменного напряжения на токоприемнике электровоза, работающего в номинальном режиме рекуперативного торможения. На рис. 8 представлен гармонический состав переменного напряжения на токоприемнике электровоза в

режиме рекуперативного торможения с типовым и предлагаемым алгоритмами управления инвертора.

Используя данные гармонического состава переменного напряжения были рассчитаны коэффициенты искажения синусоидальности напряжения для II – IV зон регулирования. Сравнение этих коэффициентов в процентном отношении по зонам регулирования представлено в табл. 2.

Таблица 2

**Снижение коэффициента искажения синусоидальности напряжения для II – IV зон регулирования при работе инвертора с предлагаемым алгоритмом управления**

Зона регулирования	Снижение коэффициента искажения $K_u$ , %
II	21,67329366
III	12,42470876
IV	21,24316249

Таким образом, применение предлагаемого алгоритма управления инвертором электровоза на 2, 3 и 4-й зонах регулирования позволяет значительно уменьшить коэффициент искажения синусоидальности напряжения. Например для IV зоны регулирования коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети с предлагаемым алгоритмом управления уменьшается на 21,24 % по сравнению с типовым.

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, выпрямительно-инверторный преобразователь, инвертор, свободные коммутационные и послекоммутационные колебания напряжения, качество электроэнергии в тяговой се-

ти, коэффициент искажения синусоидальности напряжения.

**Ключові слова:** електровоз змінного струму, рекуперативне гальмування, випрямно-інверторний перетворювач, інвертор, вільні комутаційні та післякомутаційні коливання напруги, якість електроенергії в тяговій мережі, коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги.

**Keywords:** AC electric locomotive, regenerative braking, rectifier-inverter device, inverter, free of commutation and after commutation voltage fluctuations, power quality in the traction network, voltage total harmonic distortion.