

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ШИМ

В работе предложена усовершенствованная система управления активным выпрямителем мощного трехуровневого преобразователя частоты, реализованная на базе широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Сущность усовершенствования заключается в использовании различных таблиц углов переключения, выбор которых осуществляется в зависимости от заданного коэффициента модуляции. Использование дополнительных таблиц углов переключения обеспечивает улучшение показателей качества электроэнергии на вводных шинах электропривода за счет устранения 35-й гармоники. При имитационном моделировании использовались параметры главных электроприводов стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». На основании разработанной имитационной модели преобразователя частоты с активным выпрямителем была произведена сравнительная оценка исходной и усовершенствованной системы управления активным выпрямителем с позиции их влияния на гармонический состав напряжения на шинах 10 кВ в системе внутризаводского электроснабжения, которая показала снижение среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения более чем на 5%.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, показатели качества электроэнергии, система управления активного выпрямителя.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ). Одной из областей промышленности, где применяются ПЧ с АВ, является металлургия [1-3]. Главные электроприводы валков клетей современных прокатных станов строятся, как правило, на основе синхронных или асинхронных двигателей, питаемых преобразователями частоты. Для обеспечения высокой производительности таких станов используются электродвигатели большой мощности. Учитывая, что технология работы прокатных станов предусматривает частые динамические режимы, в целях экономии необходимо обеспечить рекуперацию электроэнергии в питающую сеть. Благодаря использованию АВ можно не только выполнить данное требование, но и работать с регулируемым коэффициентом мощности, что повышает энергетическую эффективность электропривода.

Активный выпрямитель строится на базе полнотью управляемых силовых ключей (IGBT-транзисторов или IGBT-тириستоров) и по своей структуре аналогичен автономному инвертору напряжения [2]. Силовые ключи в АВ работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Частота коммутации силовых ключей в АВ относительно небольшая и составляет порядка 150-700 Гц. Обусловлено это параметрами IGBT-тиристоров и стремлением снизить потери при коммутации силовых ключей. Низкая частота коммутации силовых ключей приводит к значительным искажениям потребляемого АВ тока, что может сказаться на работе других потребителей. Для снижения влияния АВ на качество

напряжения в точке подключения ПЧ используют специальные алгоритмы ШИМ. Одним из таких алгоритмов является ШИМ с удалением выделенных гармоник [4, 5]. Производители ПЧ при реализации данного алгоритма производят расчет углов переключения с удалением, как правило, гармоник в области низких частот и не адаптируют алгоритм ШИМ под электрический комплекс, в который входит электропривод. Недостатками существующих алгоритмов ШИМ с удалением выделенных гармоник, используемых в ПЧ с АВ таких фирм производителей, как ABB, Danieli, Converterteam и др., являются: 1) ограниченное число гармоник, подлежащих исключению из-за низкой частоты коммутации силовых ключей; 2) отсутствие возможности изменения номеров исключаемых гармоник; 3) применение ШИМ с удалением небольшого числа гармоник для обеспечения хороших динамических показателей ПЧ с АВ (таблицы углов переключения рассчитаны для широкого диапазона изменения коэффициента модуляции).

Одним из путей совершенствования систем управления АВ может являться использование ШИМ с удалением выделенных гармоник с несколькими таблицами углов переключения, обеспечивающих наилучшие показатели качества электроэнергии в токе, потребляемом ПЧ с АВ, в зависимости от режима работы электропривода. В данной работе разработана и исследована усовершенствованная система управления АВ, реализующая данный принцип.

### АЛГОРИТМ ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Рассмотрим принцип работы алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник. На **рис. 1** представлена осциллограмма фазного напряжения на входе трехуровневого АВ относительно нейтральной точки.

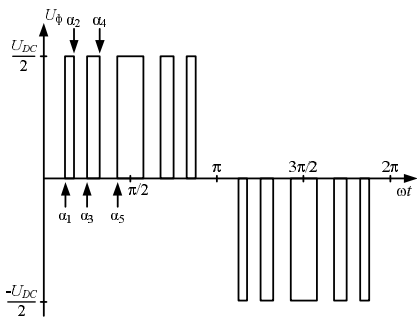


рис. 1. Оциллограмма фазного напряжения на входе АВ

Так как напряжения, представленное на рис. 1, симметрично относительно начала координат, то оно содержит нечетный спектр гармоник, амплитуды которых зависят от углов переключения  $\alpha$  и от количества импульсов за четверть периода. В алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник углы переключения рассчитываются таким образом, чтобы в кривой напряжения не было гармоник, подлежащих исключению. Номера таких гармоник определяются силовой схемой электропривода. Количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивается на уровне  $n-1$ , где  $n$  – число переключений силовых ключей за четверть периода [6]. Таблицы с углами переключения в зависимости от коэффициента модуляции, от которого зависит величина первой гармоники тока, рассчитываются заранее и сохраняются в памяти контроллера ШИМ.

Расчет углов переключения в общем случае производится согласно системе уравнений (1) [7-10]:

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \dots + \cos(\alpha_n) = \mu \\ \cos(m_1\alpha_1) - \cos(m_1\alpha_2) + \cos(m_1\alpha_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_1\alpha_n) = 0 \\ \dots \\ \dots \\ \cos(m_{n-1}\alpha_1) - \cos(m_{n-1}\alpha_2) + \cos(m_{n-1}\alpha_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_{n-1}\alpha_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  – величина угла переключения силового ключа;  $m_j$  – номер гармоники, подлежащей исключению;  $n$  – число углов переключения за четверть периода.

Количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивают на уровне  $n-1$  по причине невозможности нахождения математического решения уравнения (1) в широком диапазоне коэффициента модуляции  $\mu$ , что необходимо для отработки динамических режимов работы АВ. Поиск решений нелинейной системы уравнений (1), как правило, производят методом перебора начальных значений [11]. В некоторых случаях для расчета углов переключений применяют методы численной оптимизации [10].

Производители мощных ПЧ с АВ, такие как АВВ, Danieli, Convertam и др., используют в своих преобразователях алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник, однако следует отметить, что углы переключения рассчитываются таким образом, чтобы исключить наиболее значимые гармоники в области низких частот. При этом, как показывают результаты исследований

[2, 5], ПЧ с АВ с использованием данного алгоритма не всегда способны обеспечить выполнение существующего стандарта, нормирующего показатели качества электроэнергии [12]. Поэтому существует необходимость совершенствования алгоритмов ШИМ силовых ключей АВ или разработка принципиально новых решений.

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАБОРА ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

В данной работе предложен алгоритм с выбираемыми таблицами углов переключения. На рис. 2 показана упрощенная схема усовершенствованной системы управления АВ с использованием дополнительных наборов таблиц углов переключений. Система управления получает из силовой части ЭП сигналы величин напряжения в звене постоянного тока  $U_{DC\text{факт}}$ , напряжений на входе АВ  $U_{abc}$  и величины фазных токов  $i_{abc}$ .

Датчики напряжения ДН преобразуют величины напряжений  $U_{DC}$  и  $U_{abc}$  в требуемый вид  $U_c$  и  $U_{DC\text{факт}}$ . Фильтр низких частот (ФНЧ) обеспечивает устойчивую работу системы регулирования с учетом присутствия в гармоническом ряду потребляемого тока значительных величин низких гармоник. Для преобразования координат служат блоки  $abc/dq0$  и  $dq0/m0$ .

Система регулирования является типовой и состоит из двух контуров: внутренних контур регулирования токов во вращающейся системе координат  $dq$ , внешний контур регулирования напряжения. Из величины задания напряжения в звене постоянного тока  $U_{DCз}$  вычитается величина фактического напряжения  $U_{DC\text{факт}}$ , полученная разность  $\Delta U_{DC}$  поступает на вход регулятора напряжения (РН). Регулятор напряжения обеспечивает величину задания тока по оси  $d$   $i_{dз}$ , из которой вычитается величина фактического тока  $i_d$ , разность поступает на вход регулятора тока по оси  $d$  (РТ)  $i_d$ . Величину задания тока по оси  $q$   $i_{qз}$ , определяющую величину реактивного тока, в общем случае задают равной 0. Выходы регуляторов тока формируют напряжение на входе АВ во вращающейся системе координат  $dq$ .

После преобразования в блок ШИМ поступают сигналы коэффициента модуляции  $\mu$  и угла управления  $\theta$ , а также сигнал синхронизации с питающей сетью  $\omega t$  с блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В общем случае система управления работает по исходной таблице углов переключения, однако при появлении сигнала с блока выбора таблиц и синхронизации селектор производит переключение на другую таблицу, и значения углов переключения поступают в блок формирования импульсов управления силовыми ключами АВ. При этом следует отметить, что производить переключения таблиц можно лишь в начальный момент времени периода напряжения для обеспечения симметричности напряжения на входе АВ и его устойчивой работы.

Для проведения исследований была разработана имитационная модель ПЧ с АВ в программном пакете Matlab/Simulink на основе параметров главного электропривода рабочих валков клетки стана холодной прокатки 2000 ЛППЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (рис. 3). Питание данного электропривода осуществляется с секции внутривзаводской системы электроснабжения 10 кВ через вакуумный выключатель Q1 (рис. 2). Первичные обмотки трансформаторов T1 и T2 соединены последовательно.

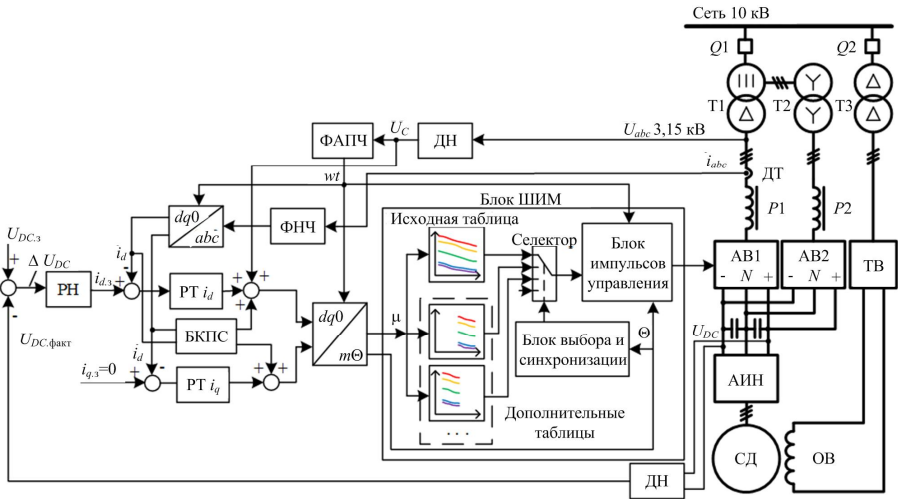


Рис. 2. Упрощенная структурная схема усовершенствованной системы управления АВ и силовой части ЭП

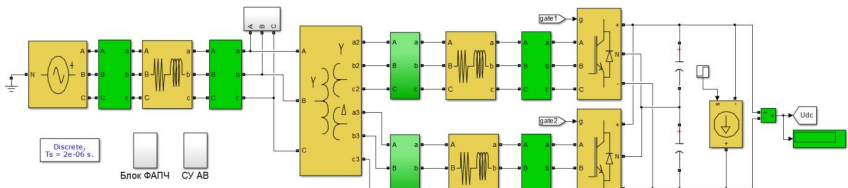


Рис. 3. Имитационная модель ПЧ с АВ, реализованная в среде Matlab/Simulink

Использование двух понизительных трансформаторов с разными группами соединения вторичных обмоток, углы напряжения в которых сдвинуты на  $30^\circ$ , позволяет реализовать 12-пульсную схему выпрямления.

Вторичные обмотки трансформаторов питают два активных выпрямителя напряжением 3,15 кВ через реакторы P1 и P2. Данное схемотехническое решение позволяет получить в гармоническом спектре напряжения только гармоники, кратные  $12n \pm 1$ , где  $n=1, 2, 3, \dots$ . Активные выпрямители подключены к общему звену постоянного тока, от которого получает питание автономный инвертер напряжения (АИН). В качестве силовых ключей в АВ и АИН используются IGBT-тиристоры. Для обеспечения трехуровневой топологии АВ и АИН в звене постоянного тока реализована нейтральная точка. АИН питает синхронный двигатель СД мощностью 8 МВт и напряжением 3 кВ. На АВ данного ПЧ применен ШИМ с удалением выделенных гармоник. Ток обмотки возбуждения регулируется тиристорным возбудителем ТВ, получающим питание через трансформатор Т3 и вакуумный выключатель Q3 с секции 10 кВ.

В имитационной модели питающая сеть 10 кВ представлена идеальным источником напряжения и последовательно подключенным активно-индуктивным сопротивлением. 12-пульсная схема реализована с помощью трансформатора с двумя вторичными обмотками,

обеспечивающими сдвиг напряжения на  $30^\circ$  относительно друг друга.

Реакторы на входах АВ реализованы с помощью активно-индуктивных сопротивлений. Для обеспечения реализации трехуровневой структуры АВ в звене постоянного тока используются два конденсатора с напряжениями 4840/2 В в номинальном режиме работы. Моделирование АВ и инвертера производилось с помощью блоков «Three-level Bridge». АИН и синхронный двигатель представлены упрощенно с помощью эквивалентного источника тока [3]. Система управления АВ реализована двухконтурной: внутренний контур регулирования токов во вращающейся системе координат dq, внешний контур регулирования напряжения. Синхронизация с питающим напряжением обеспечивается с помощью блока фазовой автоподстройки частоты.

Исходная таблица углов переключения алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник рассчитана на исключение из гармонического состава напряжения низкочастотных гармоник, присутствующих в гармоническом спектре потребляемого тока, с номерами 11, 13, 23, 25.

Как было уже сказано ранее, количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивают на уровне  $n-1$  по причине невозможности нахождения математического решения уравнения (1) в широком диапазоне коэффици-

ента модуляции  $\mu$ , что необходимо для отработки динамических режимов работы АВ. Однако, как показали исследования, коэффициент модуляции в статическом режиме работы изменяется в относительно небольших пределах (рис. 4). Поэтому при проведении исследований была рассчитана дополнительная таблица углов переключения с удалением также и 35-й гармоники. В общем случае усовершенствованная система управления позволяет производить переключения на дополнительные таблицы исходя из различных критериев.

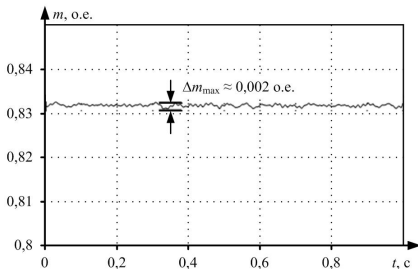


Рис. 4. График изменения коэффициента модуляции  $m$  при статическом режиме работы

Отработку динамических режимов работы система управления производит по исходной таблице углов переключения силовых ключей, рассчитанной на удаление 4 гармоник. При работе АВ в статическом режиме работы блок выбора таблицы и синхронизации формирует в начальный момент периода питающего АВ напряжения сигнал выбора таблицы углов переключения, рассчитанной на удаление 5 гармоник. В случае изменения коэффициента модуляции в значительных пределах происходит возврат на работу по исходной таблице.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА АВ И НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БАЗОВОГО И УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМОВ ШИМ

На имитационной модели ПЧ с АВ были получены диаграммы гармонического состава потребляемого АВ тока и сетевого напряжения в точке подключения электропривода. При моделировании учитывалось эквивалентное влияние на сеть электроприводов 5 клетей стана. Сравнение величин коэффициентов гармонических составляющих  $n$ -х гармоник  $K_{I(n)}$  и  $K_{U(n)}$ , а также величины суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_I$  и  $K_U$  производилось для исходной и улучшенной системы управления АВ.

В Российской Федерации нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения регламентируются стандартом [12]. В соответствии с ним величину суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения определяется по формуле

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2 + U_0^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $U_1$  – величина первой гармоники напряжения;  $U_n$  – величина  $n$ -й гармоники напряжения;  $m$  – максималь-

ный номер гармоники, для которой производится расчет ( $m = 40$ ).

Величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определяется по формуле

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m I_n^2 + I_0^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $I_1$  – величина первой гармоники напряжения;  $I_n$  – величина  $n$ -й гармоники напряжения;  $m$  – максимальный номер гармоники.

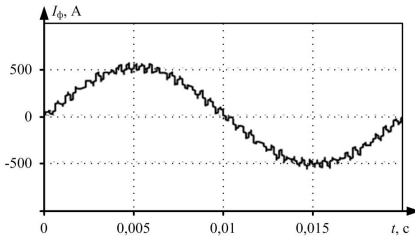
Существующий стандарт определяет показатели качества электрической энергии, рассматривая гармоники по 40. Однако, как показывают исследования [2, 5, 12], этого недостаточно, т.к. потребляемый ПЧ ток содержит значимые высокочастотные гармоники с  $n > 40$ , которые при наличии резонансных явлений могут привести к сильным искажениям питающего напряжения [14-16]. Поэтому в данной работе анализировались гармоники до  $n = 100$ .

На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы (а) и гистограммы гармонического состава (б) сетевого тока и напряжения на шине 10 кВ, полученные при использовании исходной системы управления АВ, а на рис. 7, 8 – осциллограммы (а) и гистограммы гармонического состава (б) сетевого тока и напряжения, полученные при использовании улучшенной системы управления.

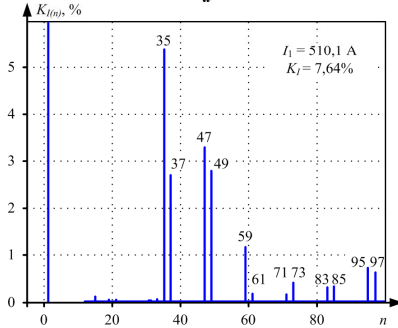
В табл. 1 представлены значения коэффициентов гармонических составляющих сетевого тока, потребляемого ПЧ, для значимых гармоник и величина  $K_I$ , а также величина первой гармоники тока  $I_1$  для имитационной модели АВ при работе по исходной и усовершенствованной системы управления АВ и относительное изменение показателей  $\delta$  в процентах. В табл. 2 представлены значения коэффициентов гармонических составляющих сетевого напряжения на шине 10 кВ для значимых гармоник, величина  $K_U$  и первой гармоники напряжения  $U_1$  для исходной и усовершенствованной системы управления, а также относительное изменение показателей  $\delta$  в процентах.

Таблица 1 Показатели качества сетевого тока

Номер гармоники	$K_I(n)$ , %		$\delta K_{I(n)}$ , %
	Исходная система	Улучшенная система	
35	5,38	0,01	99,8
37	2,69	5,37	-99,6
47	3,3	2,98	9,70
49	2,79	2,65	5,02
59	1,15	0,06	94,9
61	0,17	0,74	-335
71	0,15	0,29	-93,3
73	0,41	0,17	58,5
83	0,3	1,02	-240
85	0,34	0,34	0
95	0,74	0,32	56,8
97	0,64	0,68	-6,25
$K_I$ , %	7,64	6,88	9,95
$I_1$ , А	510,1	511,7	-0,31

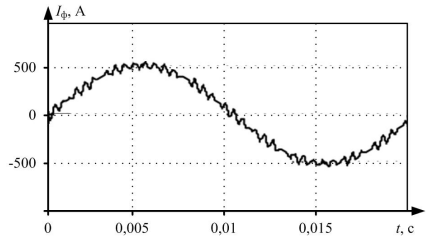


а

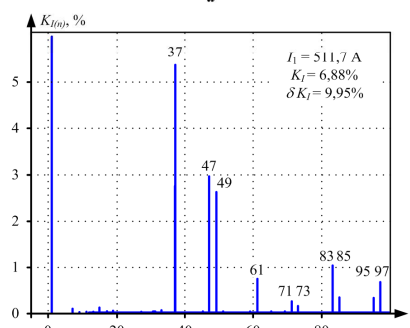


б

Рис. 5. Осциллограмма и гармонический состав сетевого тока ПЧ при использовании исходной системы управления АВ

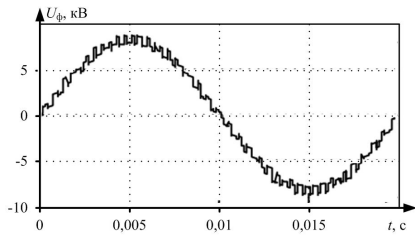


а

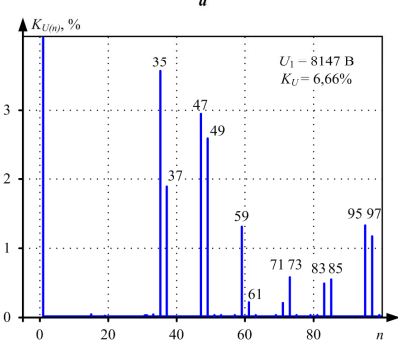


б

Рис. 7. Осциллограмма и гармонический состав сетевого тока ПЧ при использовании усовершенствованной системы управления АВ

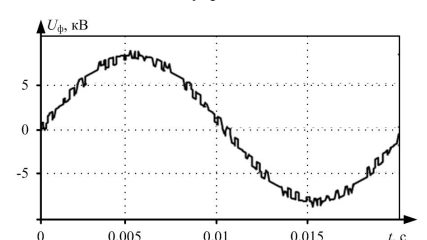


а

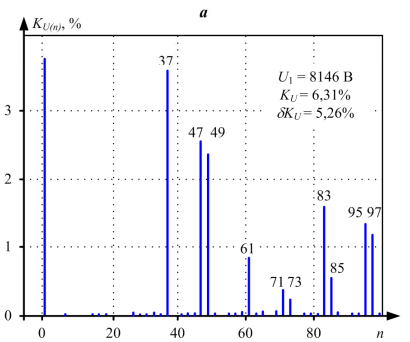


б

Рис. 6. Осциллограмма и гармонический состав сетевого напряжения ПЧ при использовании исходной системы управления АВ



а



б

Рис. 8. Осциллограмма и гармонический состав сетевого напряжения ПЧ при использовании усовершенствованной системы управления АВ

Таблица 2  
Показатели качества сетевого напряжения

Номер гармоники	$K_T(n)$ , %		$\delta K_{U(n)}$ , %
	Исходная система	Улучшенная система	
35	3,57	0,01	99,7
37	1,89	3,78	-100
47	2,94	2,66	9,52
49	2,59	2,47	4,63
59	1,29	0,07	94,6
61	0,20	0,86	-330
71	0,20	0,39	-95
73	0,57	0,23	59,7
83	0,48	1,61	-235,4
85	0,54	0,54	0
95	1,33	0,58	56,4
97	1,18	1,26	-6,78
$K_U$ , %	6,66	6,31	5,26
$U_1$ , А	8147	8146	0,01

Из представленных гистограмм гармонического состава токов и напряжений видно, что в обоих случаях на значимом уровне присутствуют гармоники, имеющие одинаковые порядковые номера, кроме гармоники 35, которая полностью исключается при использовании дополнительной таблицы углов переключения усовершенствованной системы управления. Величина гармоники 37 увеличилась в два раза, также увеличились величины гармоник 61, 71, 83. Величины гармоник 47, 49, 73, 95 уменьшились. Гармоники 59 практически полностью была исключена из спектра. Величина суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения снизилась на 5,26 %.

Данные, предоставленные в табл. 1 и 2, позволяют более детально оценить полученные результаты. Видно, что величины первых гармоник тока и напряжения в обоих случаях сохранились на том же уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана усовершенствованная система управления АВ, включающая в себя блок ШИМ с несколькими таблицами углов переключения, выбор которых осуществляется в зависимости от заданного коэффициента модуляции. Введение дополнительных таблиц углов переключения обеспечивает устранение новых значимых высших гармоник тока, например в рассматриваемом случае 35-й гармоники.

2. На основании разработанной имитационной модели ПЧ с АВ, реализованной в среде Matlab/Simulink, проведен сравнительный анализ гармонического состава потребляемого АВ тока и питающего напряжения при работе исходной и усовершенствованной систем управления АВ. Результаты анализа показали, что при статических режимах работы электропривода с постоянной нагрузкой, когда коэффициент модуляции находится в диапазоне  $0,8 < \mu < 0,86$ , за счет перехода на дополнительную таблицу углов переключения обеспечивается уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих на  $\delta K_U = 5,26$  % по напряжению и на  $\delta K_I = 9,95$  % по току, что является значительным результатом.

3. Выбор дополнительной гармоники для исключения должен зависеть от текущих параметров питающей сети, в частности от частотной характеристики, в которой могут присутствовать резонансы тока в определенной области частот. В данном случае необходимо устранять гармоники в области резонанса токов. Если резонанс токов не наблюдается, целесообразным является исключение гармоники с максимальной амплитудой.

4. Дополнительной задачей является обеспечение устойчивой работы системы управления АВ в динамических режимах, т.е. обработка алгоритма переключения таблиц в динамических режимах работы ЭП, что является темой отдельных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзводового электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, В.Е. Котышев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
2. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного технического университета. 2013. №1. С.80-83.
3. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
4. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.3-9.
5. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48-52.
6. Крубцов Д.С., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. № 71. С. 3-6.
7. Маклаков А.С., Маклакова Е.А. Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 4. №1. С. 66-73.
8. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol. 4, pp. 2210-2215, (2004).
9. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chungpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
10. Радионов А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 38-44.
11. Гасиоров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические систе-

мы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4-9.

12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
13. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г.В., Муталлапова Ф.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №4. С. 96-105.

14. F. Endrejat and P. Pillay, "Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System," 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736-741.
15. K.M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, "Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks" in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121-134, Jan. 2014.
16. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich, "Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier", IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3823-3831, Dec. 2011

Поступила в редакцию 24 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF POWER QUALITY IN SUPPLY NETWORK WITH ACTIVE RECTIFIERS BY SELECTING OPTIMAL SWITCHING ANGLE TABLES OF PWM

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Ildar G. Gilemov

Postgraduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gilemov.ig@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>.

In this paper, an improved control system of the active rectifier of powerful three-level frequency converters implemented on the basis of selective harmonics elimination method with pulse-width modulation (PWM) was proposed. The new control system selects one of the switching angle tables depending on the modulation coefficient. Making use of additional tables of switching angles can improve power quality on the input bus-bars of the electric drive by eliminating the 35<sup>th</sup> harmonic. The parameters of the main electric drive of the cold rolling mill 2000 "Sheet Rolling Shop no. 11" of the "Magnitogorsk Iron & Steel Works" were used for the simulation model. On the basis of the developed simulation model of a frequency converter with an active rectifier, a comparative analysis of the conventional and the advanced control system is carried out taking into account their influence on the harmonic distortion (THD) of the voltage on 10 kV bus-bars in the internal power supply system, which showed a decrease in the average value of the voltage THD by more than 5 %.

**Keywords:** active rectifier, frequency converter, pulse-width modulation, power quality, active rectifiers control system.

REFERENCES

1. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekhev V.S., Lozhkin I.A., Kotyshchev V.E. Using of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie: setevoy ehlektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no.1, pp. 1-11. (In Russian)
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin R.R., Krutsov D.S. Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGIEU* [Journal ISPU], 2013, no.1, pp. 80-83. (In Russian)
3. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy ehlektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol.2, no.3, pp. 16-25. (In Russian)
4. Khramshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Mathemati-

cal model of the active rectifier under unbalanced voltage operation conditions. *Elektrotehnika: setevoy ehlektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3-9. (In Russian)

5. Khramshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of methods of PWM voltage active rectifiers at rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy ehlektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-52. (In Russian)
6. Krutsov D.S., Khramshin T.R., Kornilov G.P. Active rectifiers control methods of main drive of rolling mills. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education], 2013, no. 71, pp. 3-6. (In Russian)
7. Maklakov A.S., Maklakov E.A. EMC Analysis of 18-pulse connection circuit based on 3L-AFE with SHEPWM. *Elektrotehnika: setevoy ehlektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2016, vol.4, no.1, pp. 66-73. (In Russian)
8. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol. 4, pp. 2210-2215, (2004).
9. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chungpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
10. Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao. Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 38-44. (In Russian).
11. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4-9. (In Russian)

12. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 20 p. (In Russian)
  13. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G.V., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105.
  14. F. Endrejat and P. Pillay, “Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System”, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736–741.
  15. K.M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, “Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks”, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121–134, Jan. 2014.
  16. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo and D. Boroyevich, “Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831, Dec. 2011.
- 

Николаев А.А., Гилемов И.Г. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 35-42. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)

---