

УДК 621.313.333

Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть

Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: korn_mgn@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современные электроприводы прокатных станов выполнены на базе мощных синхронных двигателей и преобразователей частоты, построенных по симметричной схеме с активными выпрямителями и инверторами напряжения. Актуальной проблемой является оценка воздействия подобных устройств на питающую сеть.

Материалы и методы: Результаты исследований получены на основе математического моделирования с использованием численного интегрирования и преобразования Фурье.

Результаты: Установлено, что работа мощных активных выпрямителей сопровождается значительным превышением уровня высших гармоник напряжения, который практически не зависит от нагрузки электропривода.

Выводы: Полученные результаты моделирования с активными выпрямителями позволили выделить наиболее значимые гармоники напряжения в узле нагрузки и оценить их уровень в соответствии с действующими стандартами на качество электрической энергии.

Ключевые слова: прокатный стан, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция с удалением выделенных гармоник, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply

T.R. Khramshin, G.P. Kornilov, A.A. Nikolaev, R.R. Khramshin, D.S. Krubtsov
Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: korn_mgn@mail.ru

Abstract

Background: The modern electric drives of rolling mills are executed on the basis of powerful synchronous motors and the frequency converters constructed on the symmetric scheme with active rectifiers and voltage source inverters. The urgent problem is the estimation of influence of similar devices on the mains supply.

Materials and methods: The results of researches are received on the basis of mathematical modeling with the usage of numerical integration and Fourier's transformation.

Results: It is proved that operation of powerful active rectifiers is accompanied by considerable excess of the level of the highest voltage harmonics, which practically do not depend on electric drive loading.

Conclusions: The received results of modeling with active rectifiers allowed allocating the most significant harmonics of voltage in the point of common coupling and estimating their level at compliance with operating standards on electric energy quality.

Key words: rolling mill, active rectifier, PWM method with elimination of selective harmonics, distortion coefficient of voltage curve harmonicity.

Главные приводы современных прокатных станов выполняют, как правило, на базе синхронных двигателей с преобразователями частоты на полностью управляемых полупроводниковых элементах (IEGT-транзисторы, IGCT-тиристоры). При этом выпрямитель и инвертор одинаковы по конструкции, что позволяет работать приводу в генераторном режиме. Кроме того, данные преобразователи являются многоуровневыми, что способствует улучшению формы выходного напряжения при относительно невысокой частоте коммутации.

Примерами успешной реализации подобных приводов являются стан горячей прокатки 5000 и стан холодной прокатки 2000, запущенные в эксплуатацию в 2009 и 2011 годах соот-

ветственно на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»).

Преобразователи частоты на данных прокатных станах реализованы на различной элементной базе и по различным схемам. Стан 5000 выполнен на IEGT-транзисторах и восемнадцатипульсной схеме выпрямления, стан 2000 – на IGCT-тиристорах и двенадцатипульсной схеме выпрямления. Но в обоих случаях применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) по методу удаления выделенных гармоник для улучшения качества выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ) [1].

Ниже дан анализ эффективности ШИМ с удалением выделенных гармоник на примере преобразователей частоты, выполненных по вышеописанным схемам.

Выходное напряжение инвертора формируется в виде набора прямоугольных импульсов. Данное напряжение получают путем сложения трех графиков более простой формы (рис. 1).

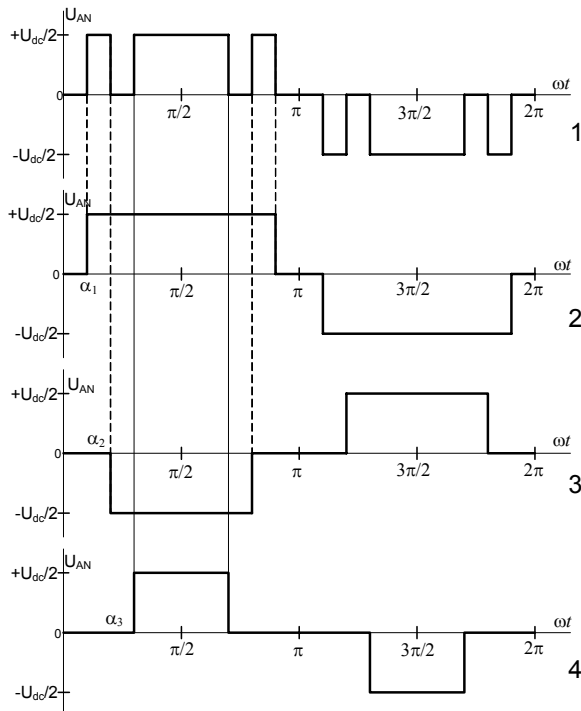


Рис. 1. Форма выходного напряжения трехуровневого инвертора

В силу симметрии кривая фазного напряжения инвертора содержит нечетный спектр гармоник, амплитуды которых зависят от количества импульсов N на полупериод и значения углов переключения α_j .

Выбирая соответствующие углы переключения α_j , можно исключить $N-1$ гармоник. Первая гармоника $A_1 = \mu \cdot 2U_{dc} / \pi$ при этом сохраняется на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции μ . Связь между углами определяется системой нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(\alpha_i) = \mu, \\ \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_1 \alpha_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_2 \alpha_i) = 0, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_N \alpha_i) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Главный привод стана 5000 включает два синхронных двигателя напряжением 3 кВ, мощностью по 12 МВт. Схема включения ПЧ на каждом из двигателей приведена на рис. 2. Особенностью данной схемы является включение трех фазосдвигающих трансформаторов со

сдвигом вторичного линейного напряжения на $\pm 20^\circ$ относительно первичного, этим обеспечивается восемнадцатипульсная схема выпрямления. За счет такого включения трансформаторов в сетевом токе присутствуют гармоники, порядок которых определяется выражением $18n \pm 1$, где $n = 2, 3, 4 \dots$ [2]. За трансформаторами установлены преобразователи частоты, в состав которых входят активный выпрямитель (АВ), звено постоянного тока с нулевой точкой и инвертор (И).

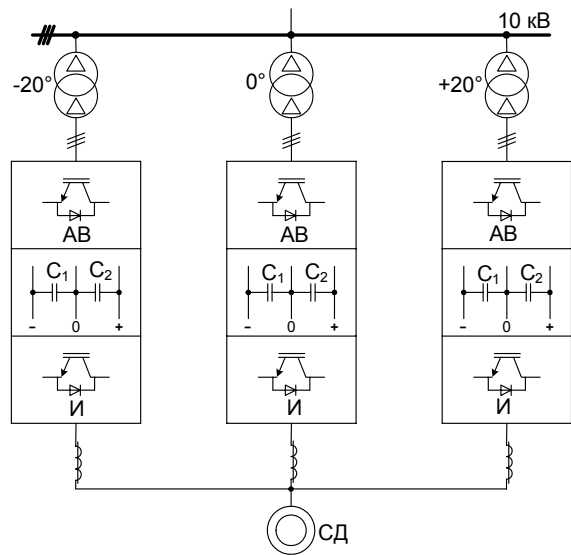


Рис. 2. Силовая схема главного привода горизонтальных валков стана 5000

На стане 2000 установлено 4 клетки с синхронными двигателями напряжением 3 кВ, мощностью 8 МВА и одна клетка с двигателем мощностью 5,5 МВА. Схема включения ПЧ для каждого двигателя приведена на рис. 3.

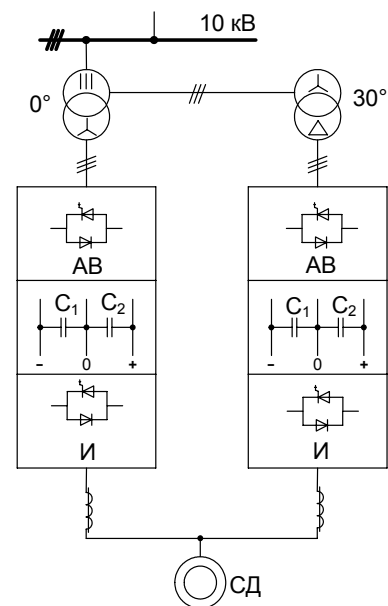


Рис. 3. Силовая схема главного привода клеток стана 2000

Для реализации двенадцатипульсной схемы выпрямления используют два трансформатора с различной схемой соединения вторичных обмоток: Y и Δ . При такой схеме соединения обеспечивается сдвиг между векторами вторичных линейных напряжений трансформаторов в 30° . Первичная обмотка одного из трансформаторов имеет 6 выводов и соединена последовательно с первичной обмоткой второго трансформатора, которая, в свою очередь, соединена в звезду. За счет такого включения трансформаторов в токе как сетевых, так и вентиляльных обмоток присутствуют гармоники, порядок которых определяется выражением $12n \pm 1$, где $n = 2, 3, 4 \dots$ [2].

Для оценки искажения синусоидальности кривой напряжения в среде Matlab Simulink созданы имитационные модели главных приводов станков 5000 и 2000.

Как указывалось выше, на главном приводе стана 5000 используется ПЧ, выполненный по восемнадцатипульсной схеме, поэтому удалению подлежат 17-я и 19-я гармоники. Кроме того, для улучшения напряжения вентиляльных обмоток удаляют 5-ю и 7-ю гармоники. Таким образом, здесь используется ШИМ с пятью переключениями за полупериод.

При помощи системы нелинейных уравнений (1) осуществлен расчет углов управления инвертора $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ для различных значений коэффициента модуляции μ (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость углов управления инвертора от коэффициента модуляции (стан 5000)

μ	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
0,7	28,11	35,24	42,85	47,19	54,47
0,8	22,62	31,63	34,76	41,24	48,79
0,9	16,56	25,77	29,04	37,63	40,56

С помощью модели главного привода стана 5000 получен гармонический состав напряжений ПЧ, который в дальнейшем моделируется в виде источников напряжения. Для расчета искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 10 кВ реализована схема замещения питающей сети. В разработанной схеме замещения сеть представлена в виде источника напряжения, связанного с секцией шин 10 кВ через трансформатор. ПЧ главного привода моделируется в виде источников напряжения, соединенных с сетью 10 кВ через согласующий трансформатор. Кроме того, к шинам 10 кВ через трансформатор с индивидуальным фильтром подключены низковольтные ПЧ, представленные в виде источников напряжения. Также на схеме замещения учтены высоковольтные асинхронные двигатели.

На ПЧ главного привода клетки стана 2000 используется ШИМ с пятью переключениями за полупериод. Но благодаря последовательному соединению первичных обмоток трансформаторов напряжение вентиляльных и сетевых обмо-

ток имеет одинаковый гармонический состав, поэтому удалению подлежат гармоники порядка $12n \pm 1$: 11, 13, 23, 25.

При помощи системы нелинейных уравнений (1) осуществлен расчет углов управления инвертора $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$, для различных значений коэффициента модуляции, результаты которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость углов управления инвертора от коэффициента модуляции (стан 2000)

μ	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
0,7	38,12	41,06	45,73	51,42	53,64
0,8	28,25	30,25	35,98	40,49	43,29
0,9	17,52	19,81	24,94	30,22	32,38

Для стана 2000 холодной прокатки расчет искажения синусоидальности кривой напряжения выполнен для секции, к которой подключены 2 клетки по 8 МВт и одна клетка 5,5 МВт. Разработана модель, в которой сеть представлена в виде источника напряжения, связанного с секцией шин 10 кВ через трансформатор. К этой секции подключены три преобразователя главных приводов клеток, модели которых созданы ранее.

В ходе моделирования оценивались сле-

дующие показатели: $THD_U, \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100\%$ –

коэффициент, который определяет вес высших гармоник переменного напряжения по отношению к основной гармонике; $U_{(n)}, \%$ – процентное содержание n -й гармоники напряжения.

Рассчитывались действующие значения токов n -й гармоники $I_{(n)}$ и их эквивалентное значение $\sqrt{\sum I_n^2}$.

Результаты расчетов для станков 5000 и 2000 приведены в табл. 3.

Согласно ГОСТ 13109-97¹, нормально и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для сети 6–20 кВ составляют 5 и 8 %.

Нормально и предельно допустимые значения коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения приведены в табл. 4.

Заключение

Спектр гармоник, генерируемых преобразователями главных приводов станков 5000 и 2000, содержит гармоники, начиная с 35-й.

¹ ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – С. 33.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах 10 кВ стана 5000 не превышает допустимое значение, а на шинах 10 кВ стана 2000 превышает нормально и предельно допустимые значения.

Таблица 3. Результаты расчета высших гармоник тока и напряжения

Параметр	№ гармоники	Коэффициент модуляции μ		
		0,7	0,8	0,9
Стан 5000				
$U_{(n)}, \%$	35	3,1	3,43	2,8
	37	1,17	-	1,37
	53	-	-	-
	55	1,27	2,33	2,08
	71	2,13	1,32	-
	73	-	1,94	-
$THD_U, \%$		4,14	4,76	3,75
$I_{(n)}, A$	35	17,14	18,98	15,5
	37	6,12	-	7,18
	53	-	-	-
	55	4,48	8,2	7,34
	71	5,82	3,59	-
	73	-	4,5	-
$\sqrt{\sum I_n^2}, A$		19,6	21,47	18,6
Стан 2000				
$U_{(n)}, \%$	35	6,96	5,34	4,35
	37	0,9	3,39	4,86
	47	6,63	3,03	0,3
	49	0,12	3,51	3,63
	59	0,42	0,75	0,24
	61	1,14	0,93	-
	71	2,67	3,03	2,37
	73	2,01	1,11	2,28
$THD_U, \%$		11,85	10,26	9,42
$I_{(n)}, A$	35	58,2	59,91	46,59
	37	7,05	30,48	49,38
	47	41,43	21,6	2,31
	49	0,69	23,79	27,75
	59	2,04	4,32	1,5
	61	5,52	5,16	-
	71	10,98	14,25	12,48
	73	8,07	5,13	11,67
$\sqrt{\sum I_n^2}, A$		74,43	73,65	76,53

Храмшин Тимур Рифхатович,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем,
телефон (3519) 29-84-79,
e-mail: timur.hramshin@mail.ru

Корнилов Геннадий Петрович,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
доктор технических наук, зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий,
телефон (3519) 29-84-79,
e-mail: korn_mgn@mail.ru

Николаев Александр Аркадьевич,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
телефон (3519) 29-84-79,
e-mail: alexniko@inbox.ru

Таблица 4. Содержание высших гармоник по ГОСТ 13109-97

n	$U_{ном} = 6-20кВ$
	$K_{U(n)}, \%$
35	0,77/1,16
37	0,74/1,11
47	0,63/0,95
49	0,61/0,91
53	0,58/0,87
55	0,56/0,84
59	0,54/0,81
61	0,53/0,79
71	0,48/0,72
73	0,47/0,71

Уровни высших гармоник напряжения выше 35-й в основном превышают предельно допустимые значения на обоих станах.

В отличие от тиристорных преобразователей постоянного тока, искажение напряжения не зависит от режима работы преобразователя (холостой ход или под нагрузкой) и всегда одинаково.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 02.740.11.0755).

Список литературы

1. Применение широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник для улучшения качества выходного напряжения / А.Д. Левин, Г.В. Радковский, Ю.Н. Радченко и др. // Электротехника. – 2006. – № 1. – С. 57–61.
2. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 303 с.

References

1. Levin, A.D., Radkovskiy, G.V., Radchenko, Yu.N., Lipanov, V.M., Shut'ko, V.F. Primenenie shirotno-impul'snoy modulyatsii s udaleniem vydelennykh garmonik dlya uluchsheniya kachestva vykhodnogo napryazheniya [Application of Pulse-Length Modulation with Elimination of Selective Harmonics for Quality Improvement of Output Voltage]. *Elektrotehnika*, 2006, no. 1, pp. 57–61.
2. Posse, A.V. *Skhemy i rezhimy elektroperedach postoyannogo toka* [Schemes and Modes of Direct Current Electricity Transmission]. Leningrad, Energiya, 1973. 303 p.

Храмшин Рифхат Рамазанович,
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем,
телефон (3519) 29-84-16,
e-mail: hramshinrr@mail.ru

Крубцов Дмитрий Сергеевич,
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
аспиранткафедры электроснабжения промышленных предприятий,
телефон (3519) 29-84-79,
e-mail: vozburk@mail.ru