

УДК 621.341.572

Анализ электромагнитных процессов в трехфазном многозонном инверторе тока*

А.Г. ВОЛКОВ, Г.С. ЗИНОВЬЕВ

Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

В данной работе проведен детальный анализ электромагнитных процессов в новом многозонном инверторе тока, в результате которого были получены аналитические соотношения для качественной оценки токов нагрузки, в зависимости от относительного сопротивления нагрузки а также внешней характеристики преобразователя, полученной при помощи использования метода алгебраизации дифференциальных уравнений [1]. Результаты проведенного анализа обобщены для любого количества зон преобразователя, работающего на емкостной делитель. Также результаты анализа подтверждены компьютерным моделированием трехфазных многозонных инверторов тока в программном обеспечении PowerSIM. Показано, что максимальная погрешность измерений не превышает нескольких процентов, а значения, полученные с помощью компьютерных моделей, всегда отличаются в меньшую сторону. Многозонный инвертор тока – принципиально новый вид преобразователя электрической энергии. Переключением отводов мы изменяем полное входное сопротивление нагрузки инвертора, изменение которого ведет к увеличению или уменьшению напряжение на нем, а значит и на нагрузке потребителя. Изменив параметры конденсаторов в каждой фазе, мы можем добиться нужной величины напряжения в каждой из зон преобразователя.

Ключевые слова: инвертор тока, многозонный инвертор тока, внешняя характеристика, аналитический расчет, метод алгебраизации дифференциальных уравнений, трехфазный преобразователь, емкостной делитель, пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является качественный анализ токов нагрузки трехфазных многозонных инверторов тока, а также внешних характеристик преобразователей.

Отличие приведенной схемы от других схем подобного рода заключается том, что многозонность инвертора заключается не в прямом получении нескольких уровней выходного тока, а в получении многозонного напряжения, величину которого мы можем изменять, подключая источник тока с помощью отводов к разным точкам нагрузки инвертора. Переключая отводы, мы изменяем полное входное сопротивление нагрузки инвертора, тем самым увеличивая или уменьшая напряжение на ней, а значит и на нагрузке потребителя. Изменяя отношение емкостей конденсаторов в фазе нагрузки, мы можем изменять величину напряжений в каждой из зон преобразователя.

Возможно использование в качестве второго звена преобразования энергии в системе двойного преобразования энергии АС-АС, на входе которого установлены управляемый выпрямитель или активный выпрямитель в качестве преобразователя переменного напряжения в постоянное и многозонный инвертор тока в качестве преобразователя постоянного напряжения в переменное.

На рис. 1 представлены схемы исследуемых трехфазного двузонного инвертора тока, а также трехфазного трехзонного инвертора тока.

* Статья получена 21.11.2013. Повторно после исправлений 10 января 2014 г.

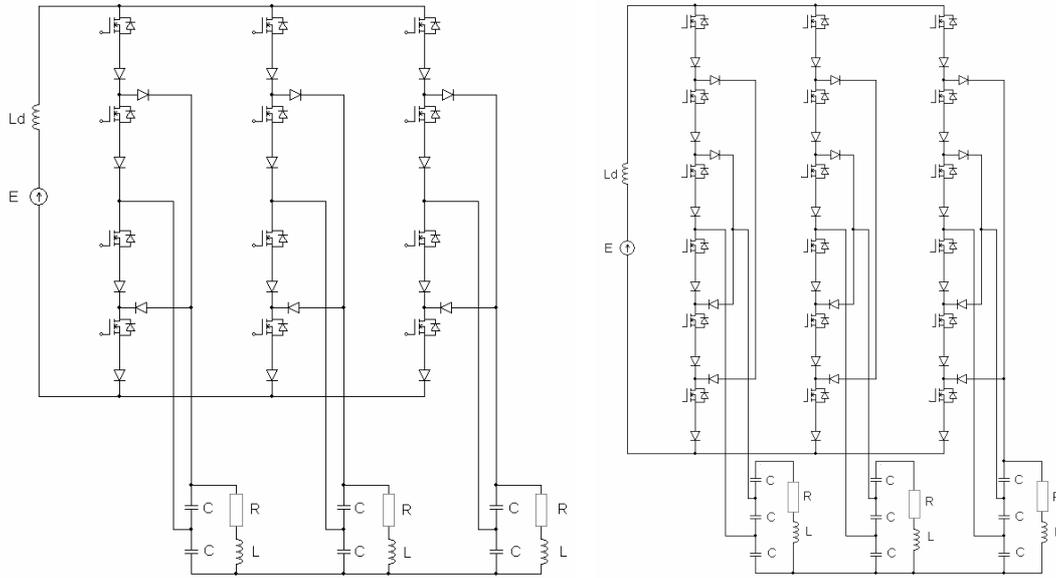


Рис. 1. Схема трехфазного двузонного и трехзонного инвертора тока

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрим в общем случае трехфазный *n*-зонный преобразователь, включенный на активно-индуктивную нагрузку.

Будем полагать, что процессы во всех фазных стойках преобразователей протекают одинаково. На рис. 3 представлена эквивалентная схема замещения, где емкость *C*₀ представляет собой эквивалентную емкость последовательно включенных конденсаторов. Определим методом алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ) выходной ток преобразователя как функцию параметров схемы. Для этого составим схему замещения одной фазы преобразователя.

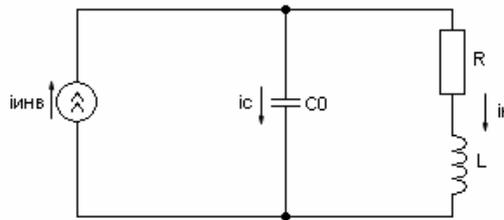


Рис. 3. Эквивалентная схема для расчета тока нагрузки

Запишем дифференциальные уравнения для данной схемы замещения:

$$\begin{cases} i_{инв} = i_n + \frac{C}{N} \cdot \frac{du_c}{dt}; \\ u_c = i_n R + L \frac{di_n}{dt}, \end{cases}$$

где *N* – число зон, а соответственно и количество конденсаторов, включенных последовательно.

Приведем уравнение для тока нагрузки к виду

$$\frac{d^2 i_H}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di_H}{dt} + \frac{N}{L \cdot C} \cdot i_H = \frac{N}{L \cdot C} \cdot i_{\text{инв}}.$$

Действующее значение первой гармоники тока нагрузки найдем алгебраизацией дифференциального уравнения в соответствии с методом АДУ [1]

$$I_H = \frac{\pi \cdot E \cdot \sqrt{L^2 C^2 \omega^4 + R^2 C^2 \omega^2 + N^2} - 2NLC\omega^2}{N \cdot R \cdot \sqrt{6}}.$$

Введем относительные единицы:

$$U\delta = E;$$

$$R\delta = \frac{1}{\omega \cdot C};$$

$$I\delta = E \cdot \omega \cdot C;$$

$$R^* = R \cdot \omega \cdot C;$$

$$I_H^* = \frac{I_H}{I\delta} = \frac{I_H}{E \cdot \omega \cdot C};$$

$$L = \frac{R^* \cdot \text{tg}(\varphi)}{\omega^2 \cdot C}.$$

Действующее значение первой гармоники тока нагрузки в относительных единицах имеет вид

$$I_H^* = \frac{\pi \cdot \text{tg}(\varphi) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{tg}^2(\varphi)} + \frac{N^2}{R^*{}^2 \text{tg}^2(\varphi)} - \frac{2 \cdot N}{R^* \cdot \text{tg}(\varphi)}}}{N \cdot \sqrt{6}}.$$

В случае перехода из одной зоны в другую каждый следующий конденсатор будет подключаться последовательно нагрузке, а число конденсаторов в цепочке, параллельной источнику тока, будет уменьшаться на единицу.

Для анализа последующих зон многозонного инвертора тока рассмотрим схему замещения одной фазы преобразователя зоны.

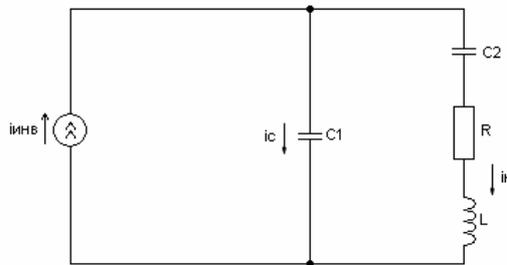


Рис. 4. Эквивалентная схема последующих зон для расчета тока нагрузки

Запишем дифференциальные уравнения для схемы замещения на рис. 4:

$$\begin{cases} i_{\text{инв}} = i_{\text{н}} + C_1 \cdot \frac{du_c}{dt}; \\ u_c = i_{\text{н}} R + L \frac{di_{\text{н}}}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_{\text{н}} dt. \end{cases}$$

Приведем уравнение для тока нагрузки к виду

$$\frac{d^2 i_{\text{н}}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di_{\text{н}}}{dt} + \frac{i_{\text{н}}}{L \cdot C_1} \cdot \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) = \frac{1}{L \cdot C_1} \cdot i_{\text{инв}}.$$

Действующее значение первой гармоники тока нагрузки в соответствии с методом АДУ:

$$I_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot E \cdot L \cdot C_1 \cdot \omega^2 \sqrt{1 + \frac{R^2}{L^2 \omega^2} + \frac{\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^2}{L^2 C_1^2 \omega^4} - \frac{2}{L C_1 \omega^2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)}}{R \cdot \sqrt{6}}.$$

Сделаем замену:

$$\frac{C}{C_1} = N; \quad \frac{C_1}{C_2} = \frac{n-1}{N-n+1},$$

где N – число зон преобразователя, n – текущая зона.

Получим действующее значение первой гармоники тока нагрузки в относительных единицах

$$I_{\text{н}}^* = \frac{\pi \cdot \text{tg}(\varphi) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{tg}^2(\varphi)} + \frac{N^2 \left(\frac{N}{N-n+1}\right)^2}{R^{*2} \text{tg}^2(\varphi)} - \frac{2 \cdot N}{R^* \cdot \text{tg}(\varphi)} \left(\frac{N}{N-n+1}\right)}}{N \cdot \sqrt{6}}.$$

Зависимость тока нагрузки от сопротивления нагрузки в относительных единицах при $N = 2$ представлена на рис. 5.

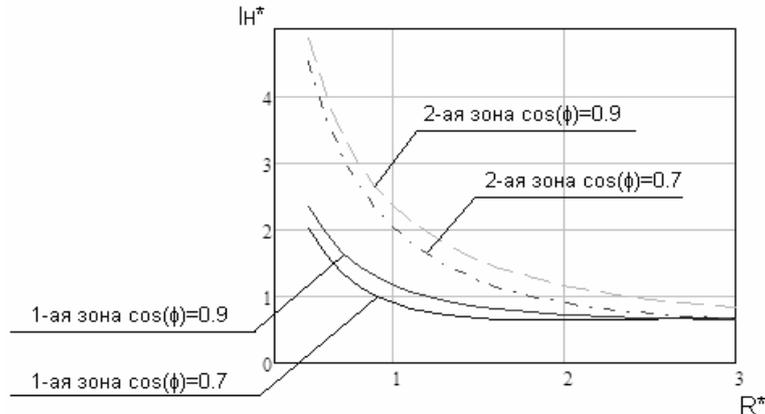


Рис. 5. Зависимость тока нагрузки от сопротивления нагрузки при $N = 2$, при различных $\cos(\varphi)$ нагрузки

Зная ток и сопротивление нагрузки (16), построим внешнюю характеристику трехфазного двужонного (n -зонного) инвертора тока:

$$Z_H^* = \sqrt{R^{*2} + (R^{*2} \cdot \operatorname{tg}(\varphi))^2};$$

$$U_H^* = I_H^* \cdot Z_H^*.$$

Внешняя характеристика многозонного инвертора тока при $N = 2$ представлена на рис. 6.

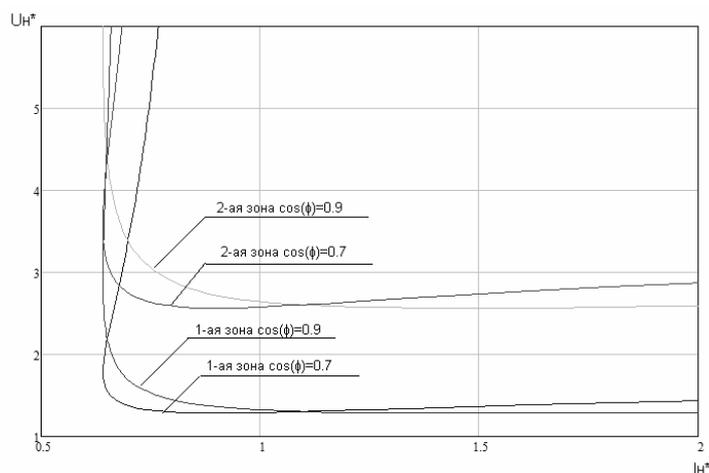


Рис. 6. Внешняя характеристика многозонного инвертора тока при $N = 2$, при различных $\cos(\varphi)$ нагрузки

Зависимость выходного тока от сопротивления нагрузки в относительных единицах при $N = 3$ представлена на рис. 7.

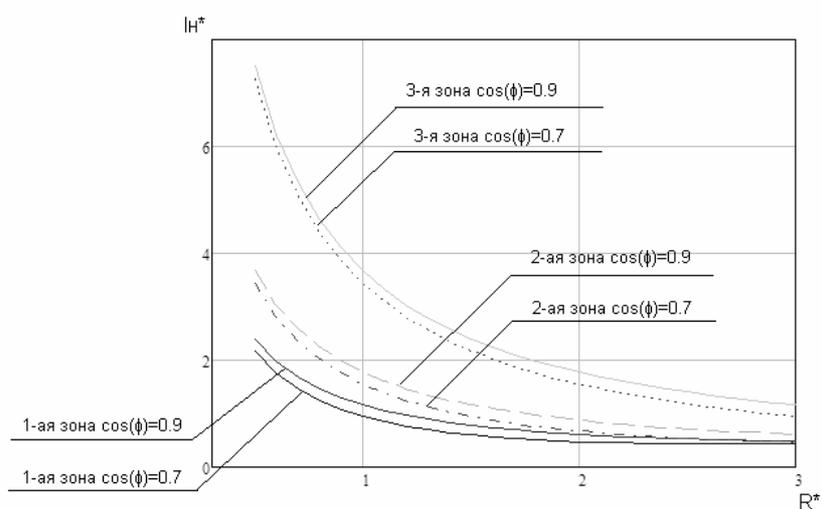


Рис. 7. Зависимость выходного тока от сопротивления нагрузки при $N = 3$, при различных $\cos(\varphi)$ нагрузки

Внешняя характеристика многозонного инвертора тока при $N = 3$ представлена на рис. 8.

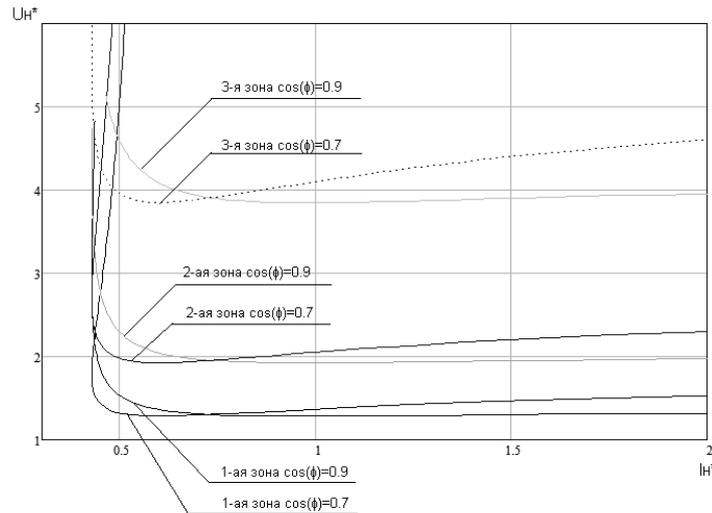


Рис. 8. Внешняя характеристика многозонного инвертора тока при $N = 3$, при различных $\cos(\varphi)$ нагрузки

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами данной работы в программной среде *PowerSIM* было выполнено моделирование трехфазных многозонных инверторов тока с целью верификации результатов анализа внешних характеристик, полученных для их расчета.

Для исследования схем, представленных на рис. 1 и рис. 2, зададимся постоянным напряжением на входе $E_d = 100$ В, частотой широтно-импульсной модуляции в 40 раз больше частоты выходного напряжения, постоянной частотой выходного напряжения $f = 50$ Гц.

На рис. 9 представлены временные диаграммы выходного напряжения и выходного тока преобразователя при следующих параметрах преобразователя: $n = 2$, $N = 2$, $E = 100$ В, $Ld = 0.001$ мкГн и $C = 1$ мкФ. От величины нагрузки и кратности широтно-импульсной модуляции зависит качество выходного напряжения. Чем больше величина нагрузки и чем меньше частота пилы широтно-импульсной модуляции, тем хуже качество выходного напряжения. При допущении постоянной величины тока (в звене постоянного тока) можно утверждать, что все три выходных фазы работают независимо и не влияют друг на друга. На каждую фазу поступают импульсы тока с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией. При этом, замыкаясь через конденсатор, они создают синусоидальное напряжение на нагрузке.

Представленные эпюры в целом подтверждают результаты, полученные в ходе проведения анализа. В таблице представлены результаты расчета и моделирования I_n^* для различных конфигураций преобразователей.

N	n	φ , рад	C , мкФ	R^*	I_n^*		δ , %
					формулы (10, 15)	модель	
2	1	0,452	1	5	0,644	0,620	3.87
2	2	0,796	2	7	0,703	0,725	3.30
3	2	0,452	2	6	0,442	0,318	3.89
3	3	0,796	1	5	0,542	0,523	3.63

Ошибка между расчетным и измеренным значением рассчитана по формуле

$$\delta = \left| \frac{I_H^*(\text{расчет}) - \Delta I_H^*(\text{модель})}{\Delta I_H^*(\text{модель})} \right| \times 100 \% .$$

Из таблицы видно, что максимальная погрешность не превышает 4 %, а значения, полученные с помощью компьютерных моделей, всегда отличаются в меньшую сторону. Это объясняется учетом активной составляющей фильтров и полупроводниковых приборов.

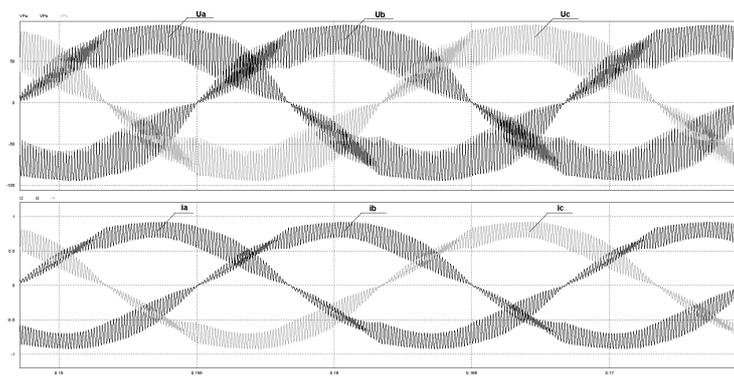


Рис. 9. Выходное напряжение и ток в трехфазном двухзонном инверторе тока (2 зона)

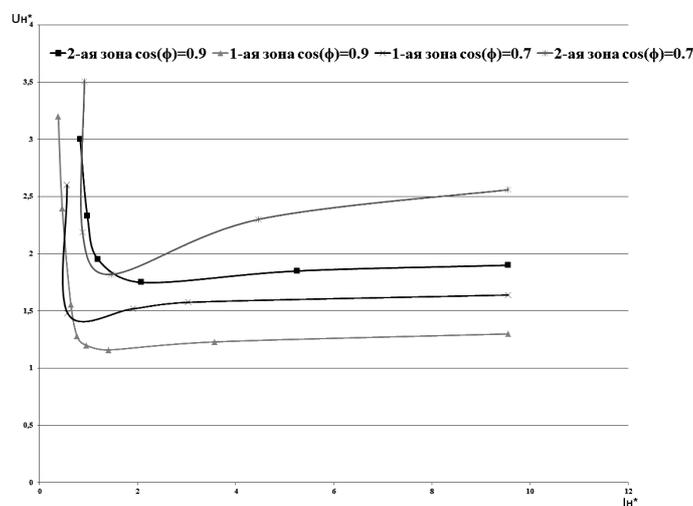


Рис. 10. Внешняя характеристика трехфазного двухзонного инвертора тока, при различных $\cos(\varphi)$ нагрузки

Благодаря конденсаторам на выходе инвертора тока амплитуда выходного напряжения имеет сильную зависимость от частоты выходного напряжения. Так как емкостное сопротивление обратно-пропорционально частоте, а индуктивное сопротивление в нагрузке пропорционально частоте, то и выходное напряжение будет зависеть от соотношения данных реактивных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование выходных токов и внешних характеристик трехфазных многозонных инверторов тока. В результате получены аналитические соотношения, позволяющие оценить характер внешней характеристики.

Проведенное моделирование в целом подтвердило результаты, полученные в ходе анализа и корректность полученных аналитических соотношений.

В качестве системы управления для исследования многозонного инвертора тока был выбран алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (SVPWM), исходя из которого и разрабатывался более общий алгоритм управления для нескольких зон. Многозонный инвертор тока – принципиально новый вид преобразователя. Переключением отводов мы изменяем полное входное сопротивление нагрузки инвертора, изменение которого ведет к увеличению или уменьшению напряжения на нем, а значит и на нагрузке потребителя. Изменив параметры конденсаторов в каждой фазе, мы можем добиться нужной величины напряжения в каждой из зон преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники: учебник / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: НГТУ, 2009. – 672 с.
- [2] **Волков А.Г.** Разработка и исследование многозонных выпрямителей / А.Г. Волков, Г.С. Зиновьев, А.П. Косарев // Сб. тр. EDM. – 2009. – С. 372–378.
- [3] **Волков А.Г., Зиновьев Г.С.** «Преобразователь постоянного напряжения в переменное». Патент РФ, № 2460202 БИ № 24, 2011.
- [4] **Volkov A.G.** Analysis of new multizone rectifier for electric locomotives of VL185 / A.G. Volkov, A.P. Kosarev, G.S. Zinoviev // «11th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices», 2010. – P. 477–481.
- [5] **Зиновьев Г.С.** Новое семейство конвертеров сетевого напряжения с зонным регулированием выходного напряжения / Г.С. Зиновьев // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 4. – С. 113–122.

REFERENCES

- [1] Zinov'ev G.S. Osnovy silovoi elektroniki. Novosibirsk: NSTU, 2009, 672 p.
- [2] Volkov A.G., Zinov'ev G.S., Kosarev A.P. Razrabotka i issledovanie mnogozonnykh vypryamitelei. [Development and research of multizone rectifiers] Sbornik trudov «Desiatia Mezhd. Konf. - seminar po mikro/nanotekhnologii i elektronnyy priboram-EDM2009» [10th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices-EDM2009]. Altai, Erlagol, 2009, pp. 372–378.
- [3] Volkov A.G., Zinov'ev G.S., Preobrazovatel' postoiannogo napriazheniia v peremennoe [Converter of direct current to alternating current]. Patent RF, № 2460202 BI № 24, 2011.
- [4] Volkov A.G., Kosarev A.P., Zinoviev G.S. Analysis of new multizone rectifier for electric locomotives of VL185, 11th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 2010, pp. 477–481.
- [5] Zinov'ev G.S., Novoe semeistvo konvertorov setevogo napriazheniia s zonnym regulirovaniem vykhodnogo napriazheniia. Nauch. vestnik NGTU, 2008, no 4, pp. 113–122.

Волков Александр Геннадьевич, аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Направление научных исследований – многозонные инверторы тока, компенсаторы реактивной мощности в системах генерирования электрической энергии, многозонные преобразователи и алгоритмы управления ими. Имеет 17 публикаций. E-mail: _bismark_@mail.ru.

Зиновьев Геннадий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – общие проблемы анализа и синтеза энергоэффективных полупроводниковых преобразователей для электротехнических систем. Имеет более 300 публикаций. E-mail: genstep@mail.ru.

A.G. Volkov, G.S. Zinoviev

The analysis of electromagnetic processes in three phase multizone current source inverter

In this paper detailed analysis of the electromagnetic processes in the new multizone current source inverter was carried out, resulting in the analytical ratios for the qualitative evaluation of the load currents, depending on the relative

resistance of the load, as well as an external characteristics of converter was obtained by using the method of differential equations algebraization [1]. The results of this analysis are summarized for any number of converter zones working on a capacitive divider. Also, the results of analysis are confirmed by computer simulation of three-phase multizone current source inverter by PowerSIM software. It is shown that the maximum measuring error does not exceed the several percent, and the values obtained by the computer simulations, is always different in the lower side. Multizone current source inverter – the new fundamentally type of electric power converter. By switching taps we are changing the input impedance of the inverter load, this changing leads to increasing or decreasing the voltage across it, and hence the load of the consumer. Varying the parameter of capacitors in each phase, we can achieve the desired voltage value in each zone of the converter.

Key words: Current Source Inverter, multi-zone current source inverters, external characteristic, analytical calculation, direct method of calculation for models of converters, three-phase converter, capacitive divider, space vector pulse width modulation.