

УДК 621.314.58

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКТОРНОГО ПРИНЦИПА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗОННОГО РЕГУЛЯТОРА ЛЕСТНИЧНОГО ТИПА *

В.В. ИВАНОВ¹, С.В. МЯТЕЖ², А.В. КАПУСТИН³, И.К. АЛЕКСЕЕВА⁴

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры электротехнических комплексов. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов. E-mail: serg_y_7578@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры электротехнических комплексов. E-mail: kapusta_nsk@mail.ru

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры электротехнических комплексов. E-mail: alekseeva1201@mail.ru

Рассматривается использование секторного метода регулирования с целью повысить значение коэффициента мощности зонных преобразователей. Произведен гармонический анализ кривых тока для подтверждения теоретических данных. Выполнен расчет долей реактивной мощности и уровней высших гармоник, определяемых коэффициентами сдвига и искажения, для секторного способа регулирования. Оценена эффективность применения секторного регулирования как способа повышения коэффициента мощности четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов на переменном токе.

Ключевые слова: коэффициент мощности, секторное регулирование, коэффициент искажения

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-122-130

ВВЕДЕНИЕ

Повышение коэффициента мощности зонных преобразователей может быть выполнено путем совершенствования алгоритмов управления силовых

* Статья получена 29 сентября 2016 г.

полупроводниковых приборов. Разработка и внедрение на подвижном составе управляемых силовых транзисторов, таких как IGBT, открывает широкие возможности для реализации новых схемных решений и алгоритмов управления преобразователями, что, в свою очередь, улучшает энергетические показатели электровозов. В режиме тяги такой электровоз способен потреблять практически синусоидальный ток, совпадающий по фазе с питающим напряжением, при этом значение коэффициента мощности приближается к единице. Одним из способов совершенствования алгоритмов управления преобразователей является секторное регулирование.

1. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА СЕКТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

При секторном регулировании величина выпрямленного напряжения зависит от смещения по фазе на угол α переднего фронта и смещения заднего фронта на угол β в направлении опережения (рис. 1). В идеализированном случае мгновенной коммутации тока при равенстве углов α и β сдвига по фазе первой гармоники тока не происходит и характеристика коэффициента мощности существенно повышается за счет устранения сдвига φ первой гармоники тока относительно кривой питающего напряжения [1].

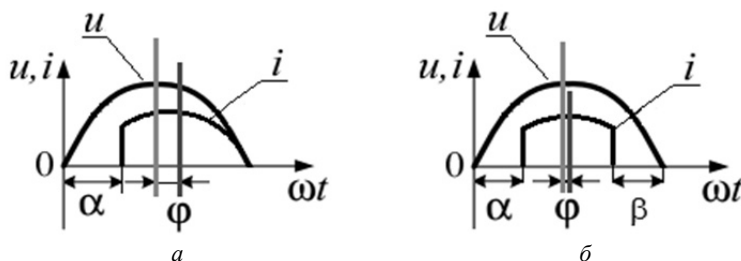


Рис. 1. Форма питающего напряжения и первичного тока при фазовом регулировании (а) и при секторном регулировании (б)

В результате коэффициент мощности будет зависеть только от коэффициента искажения тока, равного отношению действующего значения первой гармоники тока первичной обмотки трансформатора к действующему значению первичного тока.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ СЕКТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Реализовать секторный метод регулирования напряжения в четырехзонном регуляторе лестничного типа целесообразно на первой зоне регулирования, так как работа электровозов на ней проходит с наименьшими значениями коэффициента мощности.

Для реализации секторного регулирования на первой зоне достаточно заменить тиристоры V7 и V8 полностью управляемыми СПП, например, транзисторами типа IGBT (рис. 2) [2].

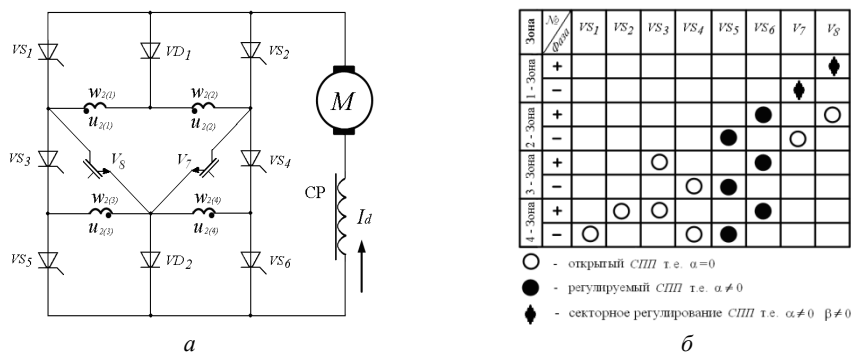


Рис. 2. Усовершенствованный четырехзонный выпрямитель лестничного типа (а) и алгоритм управления СПП с реализацией секторного регулирования (б)

Поскольку управление тяговым электродвигателем электровоза на первой зоне регулирования должно осуществляться с учетом компенсации угла φ , то в этом случае $\beta \approx \pi - \alpha$ и, учитывая, что $\cos(\beta) = -\cos(\alpha)$, $\sin(\beta) = \sin(\alpha)$, а сам тяговый электродвигатель выступает как нагрузка индуктивного характера, были окончательно получены выражения для определения энергетических показателей (см. таблицу). Для сравнения в таблице также приведены расчетные формулы показателей для фазового метода управления.

Для определения влияния высших гармоник при использовании алгоритма секторного регулирования необходимо провести гармонический анализ кривых тока и определить коэффициент искажения $K_{и}$.

Для упрощения проведения гармонического анализа и определения коэффициента искажения все расчеты проводятся в среде аналитического моделирования Mathcad.

**Энергетические показатели четырехзонного выпрямителя лестничного типа
для разных принципов управления на первой зоне**

Показатель	Фазовое управление	Секторное управление
K_C	$\frac{\sqrt{1 + \cos(\alpha)}}{\sqrt{2}}$	1,0
K_{Π}	$\frac{2\sqrt{1 + \cos(\alpha)}}{\sqrt{\pi} \sqrt{\pi - \alpha}}$	$\frac{2\sqrt{2} \cos(\alpha)}{\sqrt{\pi} \sqrt{\pi - 2\alpha}}$
χ	$\frac{\sqrt{2} \times (1 + \cos(\alpha))}{\sqrt{\pi} \sqrt{\pi - \alpha}}$	$\frac{2\sqrt{2} \cos(\alpha)}{\sqrt{\pi} \sqrt{\pi - 2\alpha}}$

Рассмотрим программу для спектрального моделирования секторного метода ругулирования.

Задание дискреты времени:

$$N = 5000, \quad Q = 0; \quad (1)$$

$$d = 2 \frac{p}{N}, \quad n = Q \dots N; \quad (2)$$

$$O_n = nd. \quad (3)$$

Сигнал развертки:

$$S_n = \frac{-1}{p} \operatorname{atan} \left(\sin \left(AO_n - \frac{p}{2} \right) \right) + \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Задание управляющего сигнала:

$$i1_n = 0.8 \sin(O_n); \quad (5)$$

$$i_n = \operatorname{if}(i1_n > 0, i1_n, -(i1_n)). \quad (6)$$

Определение выходного сигнала модулятора и тока преобразователя:

$$m_n = \operatorname{if}(i_n < S_n, 100, 0); \quad (7)$$

$$i_n = \operatorname{if}(n > 2500, -(m_n), m_n). \quad (8)$$

На рис. 3 показаны сигнал развертки r , управляющий сигнал m , сетевой ток $i(t)$ и ток первой гармоники $i_1(t)$.

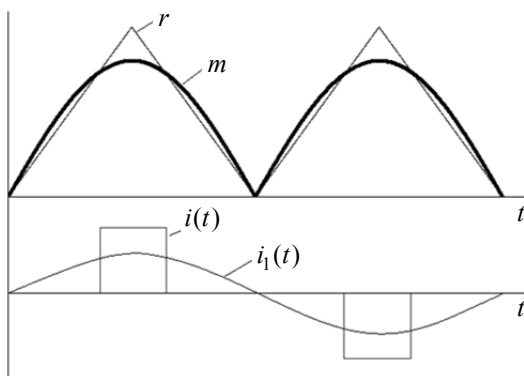


Рис. 3. Модель выпрямителя с секторным управлением на первой зоне регулирования

Для определения спектра выходного тока необходимо произвести расчет коэффициентов ряда Фурье [3]:

$$k = 1 \dots 100; \quad (9)$$

$$A_k = d \left(\sum_n \frac{i_n \cos(knd)}{\pi} \right); \quad (10)$$

$$B_k = d \left(\sum_n \frac{i_n \sin(knd)}{\pi} \right); \quad (11)$$

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}. \quad (12)$$

С помощью данной модели определен спектр выходного тока преобразователя.

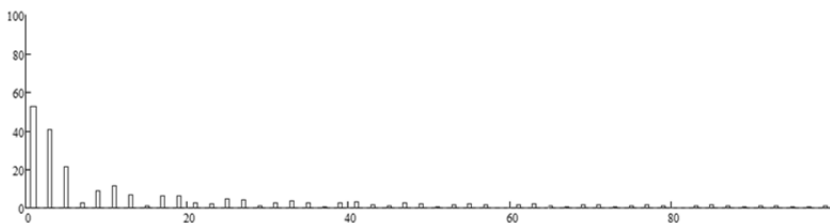


Рис. 4. Спектр выходного тока преобразователя с секторным регулированием напряжения

Результатом гармонического анализа является зависимость коэффициента искажения от коэффициента заполнения

$$K_{\text{и}} = \frac{C_1}{\sqrt{\sum_k C_k^2}}. \quad (13)$$

Сравнение фазового и секторного методов регулирования напряжения представлено на рис. 5. На графике видно, что принцип секторного управления значительно эффективнее фазового управления. Значения кривой 2 оказываются выше кривой 1 в среднем на 22 % при $K_C = 1$.

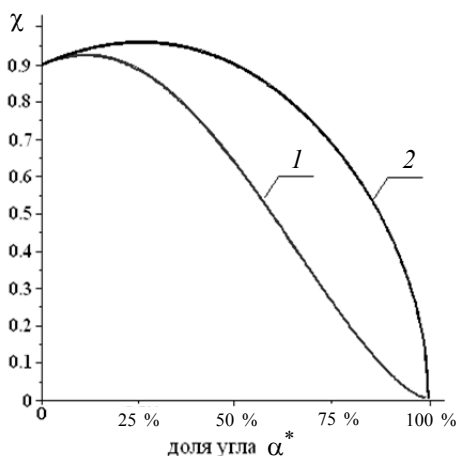


Рис. 5. Различия коэффициента мощности выпрямителя лестничного типа при фазовом 1 и секторном 2 управлении на первой зоне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения секторного принципа на первой зоне регулирования энергетические показатели повышаются в среднем на 22 %. С помощью аналитического моделирования были подтверждены теоретические данные. Определено, что дальнейшее совершенствование алгоритмов управления преобразователем с целью повышения значения коэффициента мощности будет нацелено на повышение значения коэффициента искажения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 4-е изд. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Джабаров М.М., Мятёж С.В., Щуров Н.И. Совершенствование четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов переменного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 73–77.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Ч. 1: учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
4. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
6. Капустин А.В., Алексеева И.К., Иванов В.В. Перспективы развития однофазных зонных выпрямителей тока // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 83–84. – ISBN 978-5-7782-2860-3.
7. Pulse-width control in ladder structure four-phase rectifier for AC-electromotive / V.V. Ivanov, S.V. Myatez, E.G. Langeman, N.I. Schurov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127, N 1. – Art. 012004. – doi: 10.1088/1757-899X/127/1/012004.
8. Иванов В.В., Мятёж С.В. Пути повышения энергетических показателей зонных выпрямителей // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 72–74.

Иванов Владлен Владимирович, аспирант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 13 публикаций. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

Мятёж Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 30 публикаций. E-mail: serg_y_7578@mail.ru

Капустин Андрей Владимирович, магистрант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического универси-

тета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 5 публикаций. E-mail: kapusta_nsk@mail.ru

Алексеева Ирина Константиновна, магистрант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – повышение энергетических показателей в электротранспортном комплексе. Имеет 5 публикаций. E-mail: alecseeva_nsk@mail.ru

Analytical modeling of sector management principles for zone regulator ladder*

V.V. Ivanov¹, S.V. Myatez², A.V. Kapustin³, I.K. Alekseeva⁴

¹ 630073, Russia, Novosibirsk, pr. Karla Marksa, 20, Novosibirsk state technical University, postgraduate student of the Department of electrical engineering complexes. E-mail: ivanov.etk@yandex.ru

² 630073, Russian Federation, Novosibirsk, pr. Karla Marksa, 20, Novosibirsk State Technical University, Ph.D., assistant professor of electrical systems. E-mail: serg_y_7578@mail.ru

³ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, pr. Karla Marksa, 20, Novosibirsk State Technical University, master student of the department of electrical systems. E-mail: kapusta_nsk@mail.ru

⁴ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, pr. Karla Marksa, 20, Novosibirsk State Technical University, master student of the department of electrical systems. E-mail: alekseeva1201@mail.ru

We consider the use of the sectoral method of regulation to improve the power factor of the band converters. Produced by Fourier analysis of the current curve to confirm the theoretical data. The calculation of the proportion of reactive power levels and higher harmonics defined shift and distortion coefficients for sector regulation method. Evaluated the effectiveness of sectoral regulation as a way to improve the power factor of the four-rectifier with a ladder structure for electric alternating current.

Keywords: power factor, sectorial regulatory, distortion factor

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-122-130

REFERENCES

1. Tikhmenev B.N., Trakhtman L.M. *Podvizhnoi sostav elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Rolling electrified railways]. 4th ed. Moscow, Transport Publ., 1980. 471 p.

* Received 29 September 2016.

2. Dzhaborov M.M., Myatezh S.V., Shchurov N.I. Sovershenstvovanie chety-rekhzonnogo vypryamitelya c lestnichnoi strukturoi dlya elektrovozov peremennogo toka [Improving the four-rectifier c ladder structure for electricne alternating current]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 73–77.
3. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki*. Ch. 1 [Fundamentals of power electronics. Pt. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 199 p.
4. Kotov V.E. *Seti Petri* [Petri nets]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 160 p.
5. Peterson J. *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1981 (Russ. ed.: Piterson Dzh. *Teoriya setei Petri i modelirovanie sistem*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.).
6. Kapustin A.V., Alekseeva I.K., Ivanov V.V. [Prospects for the development of single-phase rectifiers band]. *Nauchnyi potentsial studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoi oblasti* [The scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016, pp. 83–84. ISBN 978-5-7782-2860-3. (In Russian)
7. Ivanov V.V., Myatezh S.V., Langeman E.G., Schurov N.I. Pulse-width control in ladder structure four-phase rectifier for AC-electromotive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127, no. 1, art. 012004. doi: 10.1088/1757-899X/127/1/012004
8. Ivanov V.V., Myatezh S.V. [Ways to improve the energy performance of the band rectifiers]. *Nauchnyi potentsial studentov i molodykh uchenykh Novosibirskoi oblasti* [The scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014, pp. 72–74.