УДК 62-83: 621.313

Самчелеев Ю. П., канд. техн. наук,
Белоха Г. С., канд. техн. наук,

ОДНОФАЗНО-ТРЕХФАЗНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Аннотация. *В работе предложено упрощение преобразователей частоты за счет питания от однофазной сети при сохранении всех возможностей трехфазных преобразователей частоты. Представленные преобразователи частоты электромагнитно совместимы с сетью, релейный принцип управления обеспечивает инвариантность к действию возмущений и предельное быстродействие. Получены выражения для расчета частоты релейного режима и емкости конденсаторов для обоих вариантов преобразователей частоты.*

Ключевые слова: *преобразователь частоты, электромагнитная совместимость, инвариантность, релейное управление*

Samcheleev Yu., PhD.,
Bielokha G., PhD

SINGLE-THREE PHASE FREQUENCY CONVERTER WITH HYSTERESIS CONTROL

Abstract. *The paper suggested simplification of frequency converters due to supply from single-phase network while maintaining all three-phase frequency converters features. Presented frequency converters electromagnetically compatible with the network of hysteresis control principle provides invariance to perturbation action and limit performance. Expressions for calculating the frequency of the relay mode and capacitors for both versions of frequency converters.*

Keywords: *frequency converter, electromagnetic compatibility, invariance, hysteresis control*

Самчелєєв Ю. П., канд. техн. наук,
Бєлоха Г. С., канд. техн. наук,

ОДНОФАЗНО-ТРИФАЗНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ З РЕЛЕЙНИМ КЕРУВАННЯМ

Анотація. *В роботі запропоновано спрощення перетворювачів частоти за рахунок живлення від однофазної мережі при збереженні всіх можливостей трифазних перетворювачів частоти. Представлені перетворювачі частоти електромагнітно сумісні з мережею, релейний принцип керування забезпечує інваріантність до дії збурень і граничну швидкодію. Отримані вирази для розрахунку частоти релейного режиму і ємності конденсаторів для обох варіантів перетворювачів частоти.*

Ключові слова: *перетворювач частоти, електромагнітна сумісність, інваріантність, релейне керування*

Введение. В настоящее время одним из важнейших требований, предъявляемых к разрабатываемым устройствам преобразования параметров электрической энергии, является реализация их электромагнитной совместимости (ЭМС) с сетью. В [1] дан подробный анализ методов улучшения качества электроэнергии путем компенсации реактивной мощности и мощности искажений. В большинстве случаев это достигается применением силовых активных фильтров (САФ). Введение САФ, естественно, приводит к усложнению силовой части преобразователей и их систем управления.

Более перспективное, на наш взгляд, решение проблемы ЭМС достигается применением следящих систем. Улучшение качества электроэнергии в этом случае достигается путем максимального приближения формируемых токов к заданным. Таким системам посвящены работы [2-10]. В работах авторов статьи предложен принцип совмещения принудительного формирования синусоидальных входных токов при φ=0 и релейного управления, что позволило наряду с ЭМС решить проблему предельного быстродействия при существенно упрощенных силовой части (отсутствие САФ) и системы управления. С учетом тенденции замены

электроприводов постоянного тока приводами переменного тока на базе асинхронных двигателей, работы, посвященные разработке и исследованию преобразователей частоты (ПЧ) являются актуальными [4-6, 8-10]. Здесь рассматриваются ПЧ с преобразованием трехфазного напряжения неизменной частоты 50 Гц в трехфазную систему токов регулируемой частоты.

Цель работы. Упрощение ПЧ за счет питания от однофазной сети при сохранении всех возможностей трехфазных преобразователей частоты.

Материалы и результаты исследований. На рисунке 1 представлены схемы однофазно - трехфазных преобразователей частоты ПЧ1(а) и ПЧ2(б).

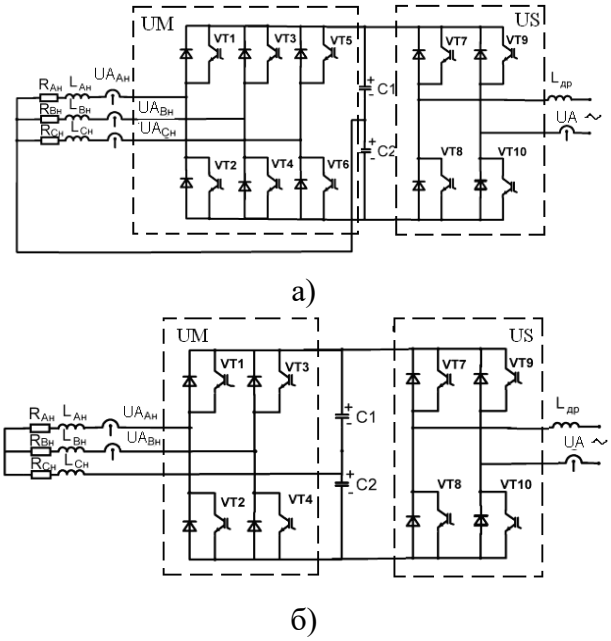


Рис. 1. Схемы: преобразователя частоты 1(а) и преобразователя частоты 1 (б)

В состав преобразователя частоты входит однофазный активный выпрямитель US, два конденсатора C1 и C2, точка соединения которых подключена к нейтрали нагрузки. При этом вход ПЧ через формирующий дроссель $L_{др}$ и датчик потребляемого из сети тока UA подключен к сети. Трехфазная нагрузка подключена к преобразователям UM (рис. 1 а,б). Токи нагрузки контролируются датчиками токов $UA_{Ан}$, $UA_{Вн}$, $UA_{Сн}$ или $UA_{Ан}$, $UA_{Вн}$, (рис1б).

Одним из важнейших параметров, определяющих качество формируемого тока, потребляемого из сети, и качество формирования токов нагрузки является частота релейного режима. Выражение для определения частоты релейного режима при формировании синусоидального тока, потребляемого из сети для обоих схемотехнических решений, имеет вид (входные каскады одинаковы)

$$f = \frac{U_C^2 - (U_m - I_m R_{äð})^2 \sin^2 \omega t}{4aU_C L_{äð}}, \qquad (1)$$

где U_{C1}, U_{C2} – напряжения на конденсаторах; $R_{äð}$ $L_{äð}$ – индуктивность и активное сопротивление входного дросселя; 2a – ширина петли гистерезиса релейного регулятора входного тока, U_m – амплитудное значение напряжения сети.

Максимальное значение частоты

$$f_{\max} = \frac{U_{C1}}{2aL_{äð}} \qquad (2)$$

Частота релейного режима при формировании тока нагрузки в ПЧ1 определяется как

$$f_{Aí} = \frac{U_{Ñ1}^2 - (I_{mí} R_{Àí})^2 \sin^2 \omega_í t}{2bL_{Aí} U_C}, \qquad (3)$$

где 2b – ширина петли гистерезиса релейных регуляторов тока в нагрузки.

Для фаз B и C выражения для частоты релейного режима определяются аналогичным образом.

Выражения для определения максимальной и минимальной частот имеют вид ($L_{Aí} = L_{Âí} = L_{Ñí} = L_í$, $R_{Aí} = R_{Âí} = R_{Ñí} = R_í$)

$$f_{í\max} = \frac{U_{Ñ1}^2}{2bL_í U_C}, \; f_{í\min} = \frac{U_{Ñ1}^2 - (I_{mí} R_í)^2}{2bL_í U_C} \qquad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при $U_{Ñ1} = I_{mí} R_í$ релейный режим прекращается и работа ПЧ1 нарушается. Следовательно, обязательным условием существования релейного режима является неравенство $U_{Ñ1} > I_{mí} R_í$.

При отсутствии доступа к нейтральной точке нагрузки применяется ПЧ2.

Выражение для определения частоты релейного режима для ПЧ2 (фаза A), для фазы B аналогично

$$f_{Aí} = \frac{U_{Ñ1}^2 - (I_{mí} R_{Bí} \sin(\omega_í t + \frac{2\pi}{3}) - I_{mí} R_{Àí} \sin \omega_í t)^2}{4bL_í U_C} \quad (5)$$

Выражения для определения максимальной и минимальной частот будут

$$f_{í\,\max} = \frac{U_{Ñ1}^2}{4bL_í U_C} \quad f_{í\,\min} = \frac{U_{Ñ1}^2 - 3(I_{mí} R_í)^2}{4bL_í U_C} \quad (6)$$

Условием существования релейного режима будет неравенство $U_{Ñ1} > \sqrt{3} I_{mí} R_í$.

Поведение напряжений на конденсаторах С1 и С2 для ПЧ1 описывается следующими выражениями

$$\Delta u_{C1} = -\frac{I_m U_m}{4\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t, \quad (7)$$

$$\Delta u_{C2} = -\frac{I_m U_m}{4\omega C_2 U_C} \sin 2\omega t, \quad (8)$$

$$\Delta u_C = -\frac{I_m U_m}{2\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t, \quad (9)$$

для ПЧ2:

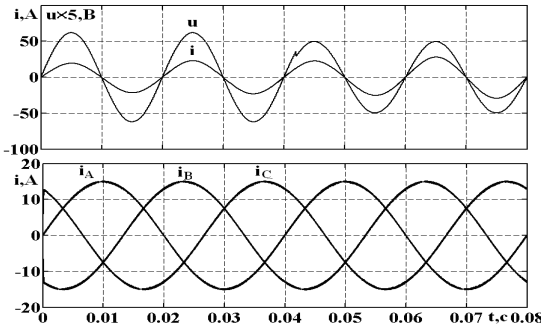
$$\Delta u_{C1} = \frac{-I_m U_m}{4\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t - \frac{I_{mí} U_{C2}}{\omega_í C_1 U_C} (\cos \omega_í t + \cos(\omega_í t - \frac{2\pi}{3}))$$

$$\Delta u_{C2} = \frac{-I_m U_m}{4\omega C_2 U_C} \sin 2\omega t + \frac{I_{mí} U_{C1}}{\omega_í C_2 U_C} (\cos \omega_í t + \cos(\omega_í t - \frac{2\pi}{3}))$$

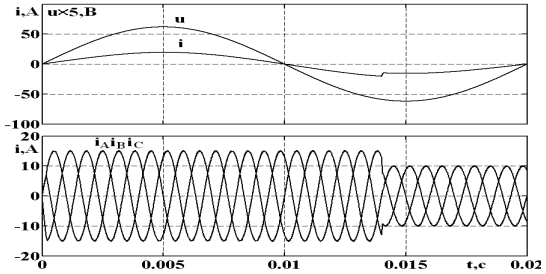
$$\Delta u_C = -\frac{I_m U_m}{2\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t \quad (10)$$

Из (9, 10) с учетом $I_m = 2P_í / U_m$ получены выражения для определения емкости конденсаторов С1 и С2 для ПЧ1 и ПЧ2 (табл.1).

На рисунке 2 показаны осциллограммы процесса формирования трехфазной системы токов на частоте 25 Гц и 500 Гц при питании от однофазной сети 50 Гц, а также реакция преобразователя на уменьшение напряжения питающей сети (рис. 2 а) и на изменение величины токов задания (рис.2 б). При уменьшении напряжения сети (t=0,042 с) форма, величина и частота тока в нагрузке не изменились. Релейный принцип управления обеспечил нечувствительность ПЧ к действию возмущения. При уменьшении токов задания синусоидальность токов в нагрузке и частота не изменились, а потребляемый ток уменьшился для сохранения баланса мощностей.



а)



б)

Рис.2. Формирование трехфазной системы токов: а) 25Гц; б) 500Гц

В таблице 1 приведены основные параметры рассмотренных ПЧ (k-коэффициент превышения напряжения конденсатора над U_m). Из таблицы следует, что максимально возможная частота релейного режима при формировании токов нагрузки в ПЧ2 в два раза меньше, чем в ПЧ1. Максимальные частоты при формировании потребляемого тока, а также необходимые величины емкостей конденсаторов в обоих ПЧ одинаковы.

Таблица 1 Параметры преобразователей частоты

	Напряжения на конденсаторах	Максимальная частота релейного режима		Емкость конденсатора С,Ф
		при формировании тока нагрузки, Гц	при формировании потребляемого тока, Гц	
ПЧ1	$U_{C1} > \frac{U_m}{2}$	$f_{í\,\max} = \frac{kU_m}{8bL_í}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{äð}}$	$Ñ_1 = Ñ_2 = \frac{P_í}{\omega \Delta U_C U_C}$

ПЧ2	$U_{C1} > \frac{U_m}{2}$	$f_{í\,\max} = \frac{kU_m}{16bL_í}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{äð}}$	$C_1 = \tilde{N}_2 = \frac{Ð_í}{\omega \Delta U_C U_C}$

Выводы. Показана возможность упрощения схемотехники ПЧ без ухудшения качественных показателей присущих трехфазно-трехфазным ПЧ.

Предложенные варианты ПЧ обладают малой чувствительностью к действию возмущений, предельным быстродействием и являются электромагнитно совместимыми с сетью.

Получены выражения для определения частот релейного режима при формировании потребляемого тока и токов нагрузки, расчета величин емкостей накопительных конденсаторов и выражения, описывающие поведение напряжения на конденсаторах в процессе формирования синусоидальных токов.

Список использованной литературы

1. Розанов Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий // Электротехника. М.: – 1998. - №3. – С. 10 – 17.

2. Волков А.В. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением [Текст] / А.В. Волков, В.А. Волков.// Электротехника. М.: – 2008.– № 3. – С.2-10.

3. Kolar J. W., Friedli T., Rodriguez J., Wheeler P. W. Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies. (2011) *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 58, No. 11, pp. 4988-5006.

4. Шевченко И.С. Электромагнитно совместимый частотно-токовый асинхронный электропривод [Текст] / И. С. Шевченко, Ю. П. Самчелеев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» – Кременчук : КрНУ - 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 75-77.

5. Пат. 66076, МПК Н02М 7/12. Перетворювач частоти струму / Бєлоха Г.С. Дрючин В.Г., Самчелєєв Ю.П., Шевченко И.С.,. – №U201106068; заявл.16.05.2011;опубл. 26.12.2011,Бюл.№24.

6. Самчелеев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. [Текст] / Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – №36(1009). – С.317-321.

7. Самчелеев Ю.П. Высокоэффективные источники электропитания: Монография [Текст] / Ю.П. Самчелеев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха, Н.И. Андреева. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 219 с.

8. Пат.66191 Україна, МПК(2006) НО2М 7/12. Перетворювач частоти струму / Скурятін Ю.В., Самчелєєв Ю.П., Шевченко І.С., Морозов Д.І.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет.-№ 2003087622; заявл. 12.08.2003, опубл.25.05.2007. Бюл. №7.

9. Морозов Д.І. Частотно-струмовий асинхроний електропривод електромагнітно сумісний з мережею живлення [Текст] / Д.І. Морозов, І.С. Шевченко, Ю.П. Самчелєєв та ін. // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2008. – Вип.30. – С. 233-235.

10. Дрючин В.Г.Универсальный преобразователь для электроприводов постоянного и переменного тока [Текст] /В.Г. Дрючин, Ю.П. Самчелеев, И.С. Шевченко, Г.С. Белоха // Електротехнічні та комп’ютерні системи.–Одесса, № 03 (79).– С.312–314.

Получено 30.04.2016

References

1. Rozanov Ju.K., Rjabchickij M.V., Sovremennye metody uluchshenija kachestva jelektrojenergii (analiticheskij obzor) [Modern Methods of Improving the Quality of Elektroyenergii (Analytical Review)], (1998) *Elektrotehnika, Publ.* Moscow, Russia, Vol.03, pp 10 – 17, (In Russian).

2. Volkov A.V., Volkov V.A. Kompensacija moshhnosti iskazhenij i reaktivnoj moshhnosti posredstvom aktivnogo fil'tra s prognoziruemym relejnym upravleniem [Compensation Distortion Power and Reactive Power by an Active Filter with a Projected Relay Control], (2008) *Elektrotehnika, Publ.* Moscow, Russia, Vol.03, pp 2 – 10, (In Russian).

3. Kolar J. W., Friedli T., Rodriguez J., Wheeler P. W. Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies. (2011) *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 58, No. 11, pp. 4988-5006.

4. Shevchenko,I. S., Samcheleev, Ju. P., DrjuchinV. G, Beloha G. S Jelektromagnitno sovmestimyj chastotno-tokovyj asinhronnyj elektroprivod [Electromagnetically Compatible Frequency Asynchronous Electric Current] (2012). *«Problemi Avtomatizovanogo Elektroprivoda. Teorija j Praktika» Publ* .Kremenchuk, Ukraine, Vol. 3/2012 (19). pp 75-77(In Russian)..

5. Pat. 66076 Ukraine, MPK H02M 7/12. Peretvorjuvach chastoty strumu / Bjeloha G.S. Drjuchyn V.G., Samcheljejev Ju.P., Shevchenko Y.S.,; zajavnyk ta patentovlasnyk Donbas'kyj derzhavnyj tehnichnyj universytet. – №U201106068; zajavl. 16.05.2011; opubl. 26.12.2011, Bjul. № 24 [Bjeloha G.S. Drjuchyn V.G., Samcheljejev Ju.P., Shevchenko Y.S. Pat. 66076 Ukraine Int. Cl. H02M 7/12.Converter of Current Frequency] 16.05.2011Published from Bull. 25.05.2007, No 7 (In Ukrainian).

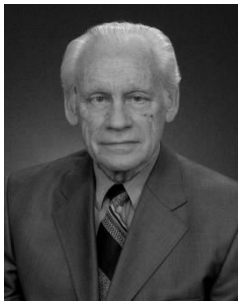
6. Samcheleev Ju.P., DrjuchinV. G, . Beloha G. S., Universal'nyj vysokojeffektivnyj istochnik pitanija dlja jelektroprivodov postojannogo i peremennogo toka. [Universal Highly Efficient Power Supply for Electric AC and DC.] (2013). *Problemy Avtomatyzovanogo Elektropryvodu. Teorija i Praktyka Publ.:* NTU «HPI» Ukraine. Vol. №36(1009). pp317-321. (In Russian).

7. Samcheleev Ju.P., Drjuchin V.G., Beloha G.S., Andreeva N. I.. Vysokojeffektivnye istochniki jelektropitanija: [High Efficiency Power Supply] (2013) *Publ* Alchevsk: DonGTU,. 219 p . (In Russian).

8. Pat. 66191 Ukraine, МПК(2006) HO2M 7/12. Peretvorjuvach chastoty strumu / Skurjatin Ju.V., Samcheljejev Ju.P., Shevchenko I.S., Morozov D.I.: zajavnyk ta patentovlasnyk Donbas'kyj derzhavnyj tehnichnyj universytet. – №2003087622; zajavl. 12.08.2003; opubl. 26.12.2011, Bjul. № 24 [Skurjatin Ju.V., Samcheljejev Ju.P., Shevchenko I.S., Morozov D.I Pat. 66191 Ukraine Int. Cl. H02M 7/12.Converter of Current Frequency] Patent Applicant and Owner is Donbas State Technical University. Appl. No. 2003087622, 12.08.2003, Published from Bull. 25.05.2007, No 7, (In Ukrainian).

9. Morozov D.I. Drjuchin V.G., Samcheleev Ju.P, Shevchenko I.S., Chastotno-strumovyj asynhronnyj elektropryvod elektromagnitno sumisnyj z merezheju zhyvlennja [Frequency a Current Electromagnetically Compatible Asynchronous Electric Power Network] (2008) *Problemy Avtomatyzovanogo Elektropryvodu. Teorija i Praktyka Publ.:* NTU «HPI», Ukraine, Vol. 30, pp. 233-235, (In Ukrainian).

10. Drjuchin V.G., Samcheleev Ju.P, Shevchenko I.S., Bielokha G. S., Universal'nyj preobrazovatel' dlja jelektroprivodov postojannogo i peremennogo toka [Universalny Converter for Electric AC and DC], (2011) *Elektrotehnichni ta Komp'juterni Sistemi Publ.* Odessa, Ukraine, Vol.03 (79), pp 312 – 314, (In Russian).



Самчелеев Юрий Павлович, кан.техн.наук., доцент кафедры Автоматизированных электромеханических систем, ДонГТУ,
toedon@rambler.ru

Белоха Галина Сергеевна, кан.техн.наук., доцент кафедры Автоматизированных электромеханических систем, ДонГТУ,
galin.1303@mail.ru