

## УЛУЧШЕНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

**В.Г. Токарев**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены особенности синхронизации трехфазных параллельных активных силовых фильтров с питающей сетью. Предложена усовершенствованная топология блока синхронизации, которая позволила улучшить стабильность синхронизации. Улучшение работы блока синхронизации достигнуто введением полосовых фильтров для фильтрации входных сигналов блока синхронизации с фазовой автоподстройкой частоты. Выполнен синтез цифрового полосового фильтра второго порядка с бесконечной импульсной характеристикой. Проведено имитационное моделирование трехфазного параллельного активного силового фильтра с предложенной топологией блока синхронизации. Проведенные эксперименты на лабораторной установке – прототипе трехфазного активного силового фильтра – подтвердили результаты, полученные в ходе имитационного моделирования.

*Ключевые слова:* активный силовой фильтр, синхронизация с питающей сетью, фазовая автоподстройка частоты, цифровой фильтр.

### Введение

Повсеместное распространение полупроводниковых силовых преобразовательных устройств, таких как импульсные источники питания, регуляторы частоты вращения электродвигателей и др., которые являются нелинейной нагрузкой, сделало весьма актуальной проблему компенсации высших гармоник тока, вносимых в распределительную сеть такой нагрузкой. Наиболее эффективным устройством для компенсации высших гармоник тока является параллельный активный силовой фильтр (АСФ). Конструкция и принцип работы параллельного АСФ широко представлены в научной литературе [1–3]. Обобщенная блок-схема параллельного АСФ представлена на рис. 1.

Процесс синхронизации критически важен для подобного рода систем, так как ошибки синхронизации могут значительно снизить эффектив-

ность работы системы или даже привести к аварии. Базовым принципам синхронизации трехфазных силовых преобразователей с питающей сетью посвящен ряд работ [4–6].

Так, в работе [5] предложен блок синхронизации с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), основанный на математическом аппарате перехода к синхронной вращающейся системе координат – последовательным преобразованием Э. Кларк и Парка – Горева [7, 8]. Блок-схема такой ФАПЧ на базе синхронной вращающейся  $d-q$  системы координат представлена на рис. 2. Блок  $ABC/dq0$  преобразует отсчеты фазных напряжений в синхронную вращающуюся систему координат,  $PI$  регулятор накапливает сигнал ошибки по оси  $q$ , интегратор с внутренним сбросом формирует угол  $\theta$  обобщенного вектора напряжения относительно неподвижной системы координат в пределах

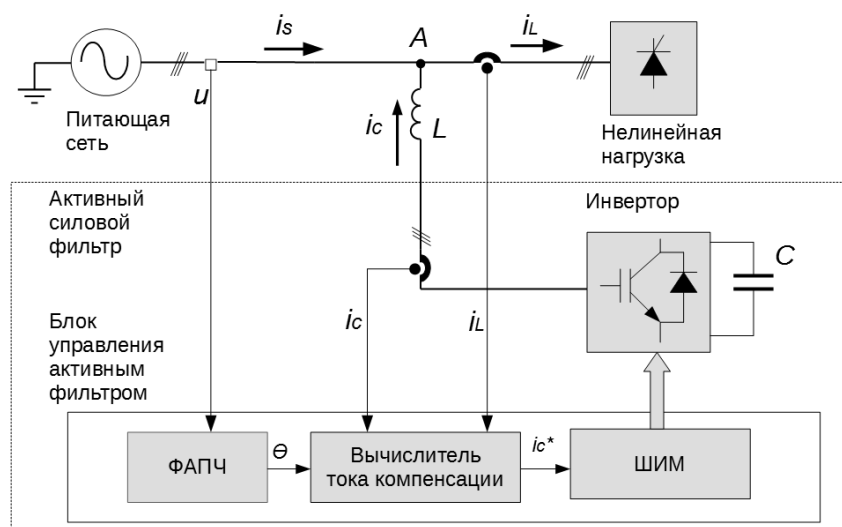


Рис. 1. Упрощенная блок-схема параллельного активного силового фильтра

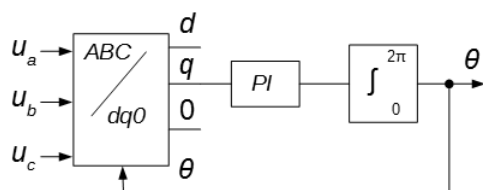


Рис. 2. Блок-схема ФАПЧ на базе синхронной вращающейся  $d$ - $q$  системы координат

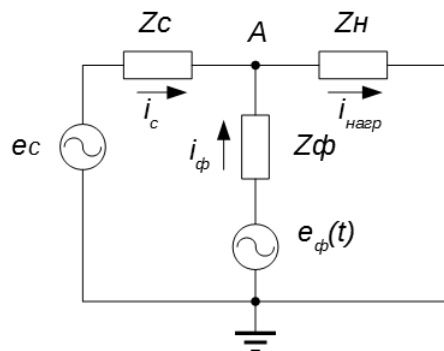


Рис. 3. Эквивалентная схема подключения АСФ к питающей сети

от 0 до  $2\pi$ . Этот же угол  $\theta$  используется для преобразования Парка – Горева. Если проекция обобщенного вектора напряжения на ось  $q$  отлична от нулевого значения, сигнал ошибки, накопленный в  $PI$  регуляторе, складывается с постоянной времени интегратора, влияя на скорость изменения угла  $\theta$  во времени, и значение по оси  $q$  стремится к нулевой величине. Таким образом осуществляется обратная связь и обеспечивается синхронизация.

Построенный по такому принципу блок синхронизации был применен в активном силовом фильтре [9]. В процессе моделирования и проведения экспериментов [10] блок синхронизации устойчиво функционировал при работе АСФ в режиме активного выпрямителя, но переход АСФ в режим компенсации высших гармоник тока приводил к периодическим сбоям синхронизации.

Причина этого явления кроется в особенностях работы параллельного АСФ. На рис. 3 представлена эквивалентная схема подключения АСФ к одной из фаз питающей сети.

Как видно из рис. 3, схема имеет два источника ЭДС – ЭДС сети  $e_c$  и ЭДС фильтра  $e_\phi$ .  $Z_c$ ,  $Z_\phi$  и  $Z_n$  – импедансы сети, уравнивающего реактора фильтра и нагрузки соответственно.

Мгновенное значение напряжения в точке  $A$  (в месте подключения АСФ к питающей сети) можно выразить формулой

$$u_A(t) = \frac{Z_n}{Z_c + Z_n} (e_c + i_\phi(t) Z_c),$$

где  $i_\phi(t)$  – ток компенсации, инжектируемый АСФ в питающую сеть. Другими словами, формируемый АСФ ток компенсации  $i_\phi(t)$  искажает напряжение в точке подключения АСФ к питающей сети при ненулевом импедансе сети. Что в итоге приводит к сбоям синхронизации АСФ с напряжением сети на величину больше допустимого по стандарту [11] и неправильной работе системы управления АСФ.

### Постановка задачи

Для того чтобы устранить сбой синхронизации АСФ с сетью, необходимо снизить влияние вносимых АСФ помех по напряжению. Один из вариантов решения заключается в выделении основной гармоники из сигнала, поступающего от датчиков фазных напряжений с помощью цифрового фильтра. При этом фильтр не должен вносить фазового сдвига на промышленной частоте переменного тока 50 Гц и должен быть реализован на базе целочисленной машинной арифметики.

### Синтез цифрового фильтра

Для решения поставленной задачи был выбран полосовой фильтр, так как он удовлетворяет требованию отсутствия фазового сдвига [12]. Синтез цифрового фильтра осуществлялся в среде *FDATool* пакета *MATHLAB*. Исходные данные для синтеза фильтра приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для синтеза фильтра

Аббревиатура <i>MATHLAB</i>	Параметр	Значение
<i>Fs</i>	Частота дискретизации	10 200 Гц
<i>Fstop1</i>	Нижняя граница полосы заграждения	20 Гц
<i>Fpass1</i>	Нижняя граница полосы пропускания	49 Гц
<i>Fpass2</i>	Верхняя граница полосы пропускания	51 Гц
<i>Fstop2</i>	Верхняя граница полосы заграждения	80 Гц
<i>Astop1</i>	Подавление в нижней полосе заграждения	20 дБ
<i>Apass</i>	Неравномерность в полосе пропускания	1 дБ
<i>Astop2</i>	Подавление в верхней полосе заграждения	20 дБ

В процессе синтеза получен цифровой фильтр второго порядка с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ фильтр), удовлетворяющий заданным условиям. Топология синтезированного фильтра и его коэффициенты представлены на рис. 4 и в табл. 2 соответственно.

Для получения целочисленной реализации коэффициенты из табл. 2 домножались на целочисленную константу и округлялись к ближайшему целому.

Математическое моделирование синтезированного целочисленного БИХ фильтра второго порядка осуществлялось в среде моделирования *PSim*.

Характеристики фильтра в частотной области, полученные в результате математического моделирования, и результаты фильтрации входного сигнала прямоугольной формы приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Результаты моделирования соответствуют ожидаемым.

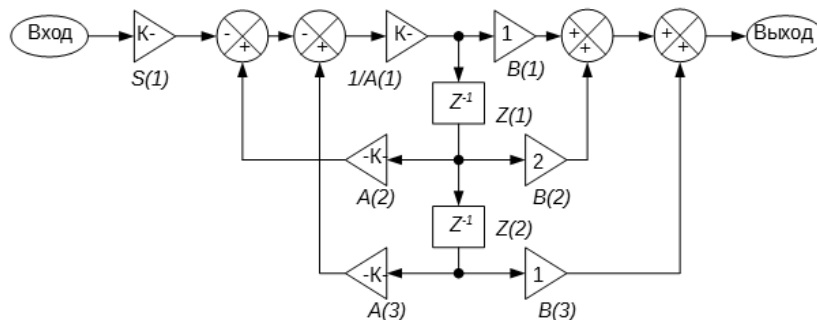


Рис. 4. Топология цифрового БИХ фильтра второго порядка

Таблица 2

Коэффициенты синтезированного фильтра

Коэффициент	Значение
$B(1; 2; 3)$	1; 0; -1
$A(1; 2; 3)$	1; -1,996634738635; 0,9975817734755
$S(1)$	0,001209113262239

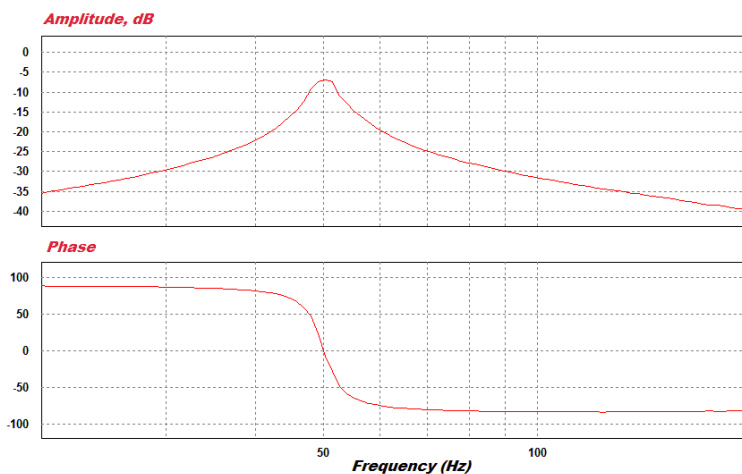


Рис. 5. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики синтезированного фильтра

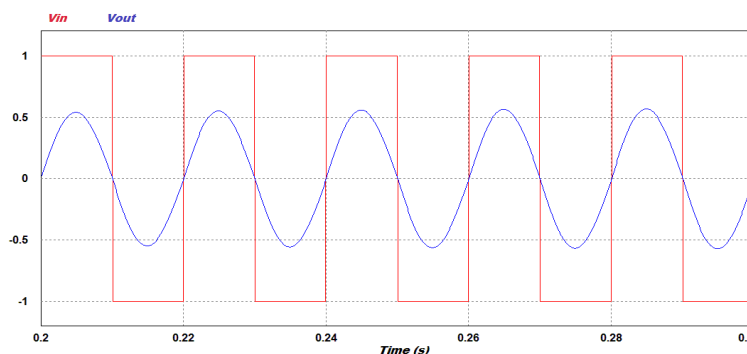


Рис. 6. Фильтрация входного сигнала прямоугольной формы

## Преобразовательная техника

Однако в процессе математического моделирования целочисленного БИХ фильтра выявлена зависимость фазового сдвига, вносимого фильтром, от амплитуды входного сигнала. Это происходит вследствие потери точности при переходе к целочисленной арифметике.

### Усовершенствованный блок синхронизации с ФАПЧ

Основываясь на полученных выше результатах, была предложена усовершенствованная топология блока синхронизации с ФАПЧ для синхронизации АСФ с питающей сетью. Блок-схема решения приведена на рис. 7.

Сигналы, снимаемые с датчиков фазных на-

пряжений  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ , усиливаются и ограничиваются. Тем самым осуществляется приближение входных сигналов к сигналам прямоугольной формы с нормированной амплитудой. Затем с помощью цифровых целочисленных полосовых БИХ фильтров из полученных сигналов выделяется первая гармоника. Дальнейшие преобразования осуществляются так же, как было описано выше.

### Имитационное моделирование АСФ с предложенным блоком синхронизации

Государственный стандарт [11] не допускает отклонение от номинальной частоты напряжения электропитания больше чем на 0,4 Гц (0,8%). Это требование относится к системе ФАПЧ АСФ.

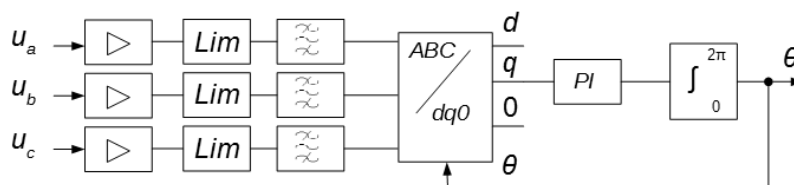


Рис. 7. Предложенный блок синхронизации с ФАПЧ

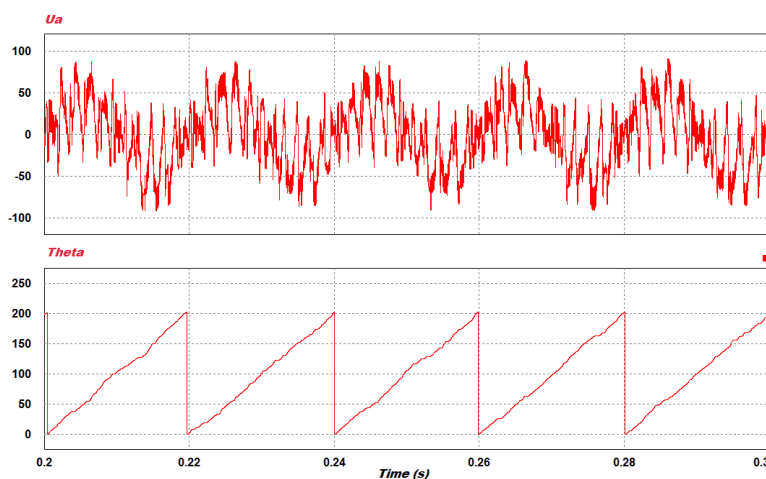


Рис. 8. Фазное напряжение  $U_a$  и сигнал синхронизации  $\theta$  традиционного блока синхронизации

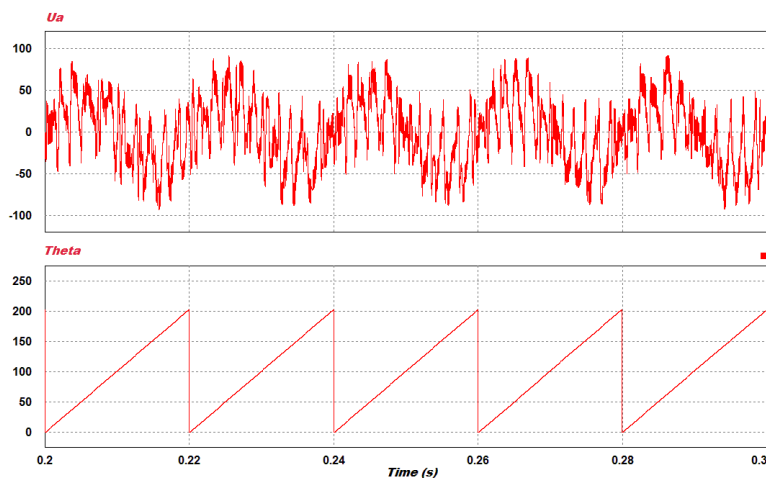


Рис. 9. Фазное напряжение  $U_a$  и сигнал синхронизации  $\theta$  усовершенствованного блока синхронизации

При рассогласовании синхронизации с сетью на большую величину блок защиты АСФ отключает режим компенсации.

Для верификации эффективности усовершенствованной ФАПЧ было проведено имитационное моделирование АСФ в среде моделирования *PSim*. Подробное описание имитационной модели изложено в [10].

Сначала моделировалась работа блоков синхронизации в условиях экстремально искаженного сетевого напряжения. Результаты моделирования приведены на диаграммах рис. 8 и 9.

Как видно из диаграмм, традиционный блок синхронизации показывает худшую линейность

сигнала синхронизации  $\Theta$ , чем предложенный блок синхронизации.

Затем моделировалась работа АСФ в режиме компенсации высших гармоник тока и реактивной мощности. Результаты моделирования работы АСФ с традиционным и предложенным блоками синхронизации приведены на рис. 10 и 11 соответственно. Обозначения на диаграммах:

$I_s$  – ток сети фазы  $A$ ;

$I_c$  – ток компенсации фазы  $A$ ;

$U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения;

$\Theta$  – сигнал синхронизации;

$PLL\_OK$  – сигнал, показывающий стабильность синхронизации.

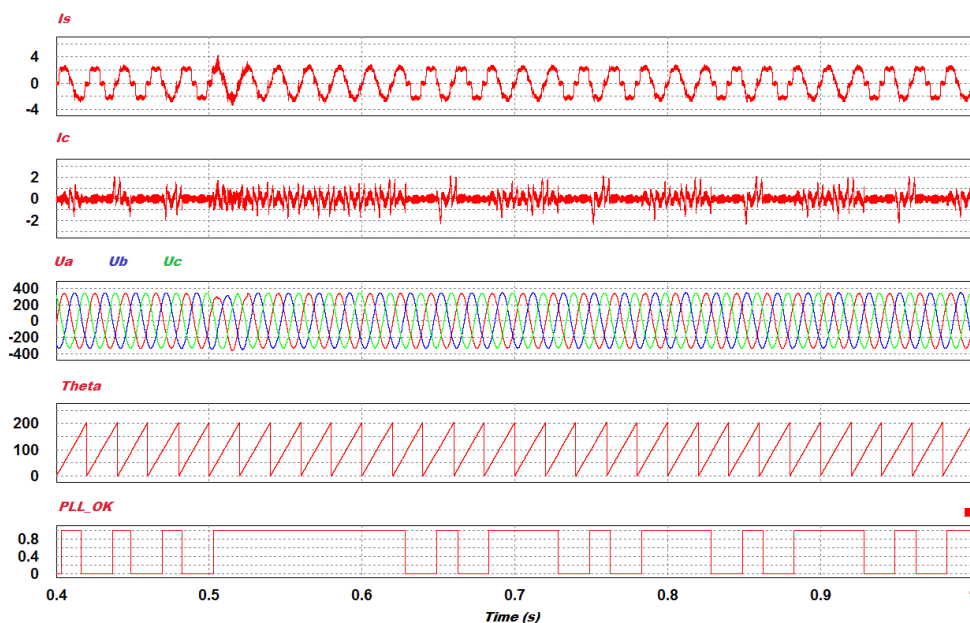


Рис. 10. Имитационное моделирование работы АСФ в режиме компенсации высших гармоник тока и реактивной мощности с традиционным блоком синхронизации

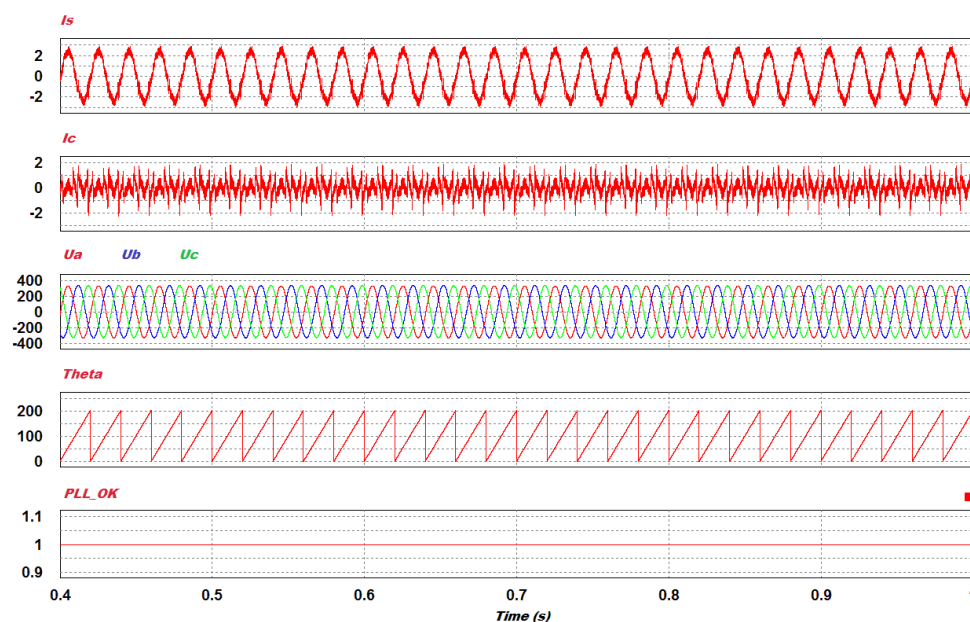


Рис. 11. Имитационное моделирование работы АСФ в режиме компенсации высших гармоник тока и реактивной мощности с усовершенствованным блоком синхронизации

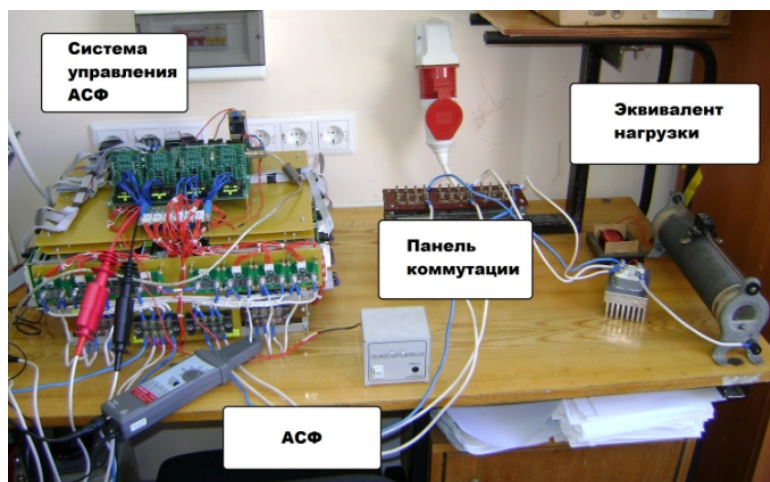


Рис. 12. Общий вид экспериментальной установки АСФ



Рис. 13. Диаграмма токов и напряжений АСФ с традиционным блоком синхронизации

Моделирование показало, что традиционный блок синхронизации допускает рассогласование по фазе с напряжением сети выше допустимого значения, что приводит к нестабильной работе АСФ и принудительному отключению режима компенсации. Применение усовершенствованного блока синхронизации позволило удержать рассогласование по фазе с напряжением питающей сети в требуемых пределах и улучшить стабильность работы АСФ.

### Экспериментальная проверка работы АСФ с усовершенствованным блоком синхронизации

Для экспериментальной проверки эффективности работы предложенного блока синхронизации была использована экспериментальная установка [10]. Общий вид экспериментальной установки АСФ приведен на рис. 12. АСФ реализован на трехфазном трехуровневом инверторе напряжения. Система управления АСФ выполнена на отечественном микроконтроллере с АРМ архитектурой и целочисленной арифметикой 1986ВЕ1Т производства АО «ПКК Миландр».

В ходе эксперимента исследовалась работа АСФ с традиционным и предложенным блоками



Рис. 14. Диаграмма токов и напряжений АСФ с предложенным блоком синхронизации

синхронизации в режиме компенсации высших гармоник тока и реактивной мощности.

В процессе исследования при работе АСФ с традиционным блоком синхронизации наблюдались периодические срывы синхронизации и сбои (рис. 13). В том же режиме работы и при тех же условиях АСФ с предложенным блоком синхронизации функционировал стабильно (рис. 14).

### Заключение

В данной работе была рассмотрена проблема неустойчивой синхронизации параллельного трехфазного АСФ с питающей сетью. Сбои синхронизации вызваны вносимым АСФ искажением напряжения сети в точке подключения при ненулевом импедансе электрических цепей распределительной сети. Для решения проблемы предложен усовершенствованный блок синхронизации с ФАПЧ, в котором осуществлялась предварительная фильтрация сигналов, снимаемых с датчиков фазных напряжений, цифровыми полосовыми фильтрами.

Для верификации эффективности работы предложенного блока синхронизации было выполнено имитационное моделирование АСФ. В ходе моделирования проведено сравнение работы АСФ

с традиционным и предложенным блоками синхронизации в режиме компенсации высших гармонических составляющих тока и реактивной мощности. АСФ с предложенным блоком синхронизации показал лучшую стабильность по сравнению с АСФ с традиционным блоком синхронизации.

Результаты моделирования подтверждены экспериментально на лабораторном прототипе АСФ.

#### Литература

1. Akagi, H. *New Trends'in Active Filters for Power Conditioning* / H. Akagi // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1996. – Vol. 32, iss. 6. – P. 1312–1322. DOI: 10.1109/28.556633
2. Поднебенная, С.К. Силовой параллельный активный фильтр с повышенной эффективностью / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // *Электротехника*. – 2013. – № 6. – С. 15–20.
3. Лютаревич, А.Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения / А.Г. Лютаревич, С.Ю. Долингер // *Омский научный вестник*. – 2010. – № 1. – С. 133–136.
4. Борисов, П.А. Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью / П.А. Борисов, Н.А. Поляков // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2012. – № 4 (80). – С. 55–60. DOI: 10.1109/28.924769
5. Kaura, V. *Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions* / V. Kaura, V. Blasko // *IEEE Transactions on Industry Application*. – 1997. – Vol. 33, iss. 1. – P. 58–63. DOI: 10.1109/28.567077
6. Chung, S.-K. *Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems* / S.-K. Chung. // *IEE Proceeding Electric Power Application*. – 2000. – Vol. 147, iss. 3. – P. 213–219. DOI: 10.1049/ip-epa:20000328
7. Duesterhoeft, W.C. *Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components* / W.C. Duesterhoeft, M.W. Schulz, E. Clarke // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. – 1951. – Vol. 70, no. 2. – P. 1248–1255. DOI: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554
8. Park, R.H. *Two-reaction theory of synchronous machines* / R.H. Park // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. – 1929. – Vol. 48, no. 3. – P. 716–727. DOI: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275
9. *Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method* / Vadim G. Tokarev, Sergey V. Brovanov, Alexander A. Yakimenko, Aleksey V. Sidorenko, Denis V. Solovov // *The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016 : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016*. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 577–582. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538802
10. Имитационная и экспериментальная верификация прогнозирующего алгоритма управления активным силовым фильтром / В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко, А.В. Удовиченко // *Электроприводы переменного тока. ЭППТ–2018: материалы 17 междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 26–30 марта 2018 г.* – Екатеринбург: УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 28–33. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341676
11. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013*. – Введ. 2014.07.01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 10 с.
12. Смит, С. *Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников* / С. Смит; пер. с англ. А.Ю. Линовича, С.В. Витязева, И. С. Гусинского. – М.: Додэка XXI, 2011. – 720 с. +CD: ил.

**Токарев Вадим Геннадьевич**, старший преподаватель, кафедра «Вычислительная техника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; v.tokarev@corp.nstu.ru.

Поступила в редакцию 30 ноября 2018 г.

## IMPROVEMENT OF SHUNT ACTIVE POWER FILTER SYNCHRONIZATION WITH DISTRIBUTION NETWORK

V.G. Tokarev, v.tokarev@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The paper reviews the features of the synchronization system for three-phase shunt active power filters. It suggests an improved more stable design of a synchronization system with. The synchronization system has been improved by introducing bandpass filters in order to filter the input signals of a conventional phase-locked loop synchronization system. The design of the second-order infinite impulse response bandpass filter has been elaborated. The simulation of the three-phase shunt active power filter with the proposed synchronization system was carried out. The simulation results were verified by the laboratory prototype of a three-phase active power filter.

*Keywords:* active power filter, synchronization with distribution network, phase-locked loop, digital filter.

### References

1. Akagi H. New Trends'in Active Filters for Power Conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, iss. 6, pp. 1312–1322. DOI: 10.1109/28.556633
2. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. [Shunt Active Power Filter with Increased Efficiency]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 15–20. (in Russ.)
3. Lyutarevich A.G., Dolinger S.Y. [Assessment of the Efficiency of Using an Active Filter of Harmonics in Electrical Supply Systems for Improving the Quality of Electric Energy]. *Omsk Scientific Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 133–136. (in Russ.)
4. Borisov P.A., Polyakov N.A. [Synchronization of Three-phase Active Voltage Rectifiers with the Power Supply Network]. *Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.*, 2012, no. 4 (80), pp. 55–60. (in Russ.) DOI: 10.1109/28.924769
5. Kaura V., Blasko V. Operation of a Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1997, vol. 33, iss. 1, pp. 58–63. DOI: 10.1109/28.567077
6. Chung S.-K. Phase-Locked Loop for Grid-Connected Three-Phase Power Conversion Systems. *IEE Proceeding Electric Power Application*, 2000, vol. 147, iss. 3, pp. 213–219. DOI: 10.1049/ip-epa:20000328
7. Duesterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255. DOI: 10.1109/T-AIEE.1951.5060554
8. Park R.H. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. *Trans-Actions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, no. 3, pp. 716–727. DOI: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275
9. Vadim G. Tokarev, Sergey V. Brovanov, Alexander A. Yakimenko, Aleksey V. Sidorenko, Denis V. Solovev. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-Based Control Method. *The 17 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016: proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016*, Novosibirsk, NSTU Publ., 2016, pp. 577–582. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538802
10. Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A., Udovichenko A.V. [Modeling and Experimental Verification of a Prediction Algorithm for Controlling an Active Power Filter]. *Elektroprivody peremennogo toka*. [Proc. 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)]. Ekaterinburg, 2018, pp. 28–33. (in Russ.) DOI: 10.1109/ACED.2018.8341676
11. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniyaelectric energy:GOST 32144–2013*. [Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems (EN 50160:2010, NEQ)]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 10 p. (in Russ.)
12. Steven W. Smith *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes Publ., 2003. 650 p.

Received 30 November 2018

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Токарев, В.Г. Улучшение синхронизации параллельного активного силового фильтра с питающей сетью / В.Г. Токарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 101–108. DOI: 10.14529/power180411

### FOR CITATION

Tokarev V.G. Improvement of Shunt Active Power Filter Synchronization with Distribution Network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 101–108. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180411