
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Поступила в редакцию 07.09.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_83

УДК 621.31

Д.И. Прокопишин

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОФАЗНЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Белгород, Россия

Представлено описание работы однофазного активного фильтра, в котором управление производится на основе контроля напряжения на конденсаторе в звене постоянного тока. Управление величиной напряжения осуществляется за счет изменения амплитуды идеализированного синусоидального тока, формируемым активным фильтром. Расчет необходимой амплитуды тока реализован на базе ПИ-регулятора, параметры которого сформированы опытным путем. Разработана имитационная модель однофазного нелинейного электроприемника и активного фильтра в программе *Matlab Simulink*. В результате моделирования установлено, что суммарный коэффициент гармонических составляющих по току снизился с 76 % до 0,73 %, а время переходного процесса изменения напряжения звена постоянного тока и перерегулирование составили 0,2 с и 0,01 % соответственно.

Ключевые слова: контроль напряжение звена постоянного тока, нелинейный электроприемник, однофазный активный фильтр.

1. Введение

Активные фильтры гармоник (АФГ) широко применяются для компенсации несинусоидальности тока и реактивной мощности [1, 2]. Управление данными устройствами осуществляется на основе следующих методов [3-7]:

- 1) быстрого преобразования Фурье (БПФ);
- 2) метод $p-q$ – компенсации;
- 3) метод $d-q$;
- 4) использования цифровых рекурсивных фильтров.

Для реализации данных методов необходимо измерение тока, потребляемого нагрузкой, сетевого напряжения, а также тока самого фильтра. Кроме того, при использовании алгоритмов управления, построенных на БПФ, будет существовать задержка в расчете токов компенсации, равная периоду сетевого напряжения, а использование p - q и d - q - методов затрудняется при значительных гармонических искажениях сетевого напряжения.

В данной работе предлагается принцип управления параллельным однофазным АФГ с емкостным накопителем, построенный на основе контроля напряжения на конденсаторе звена постоянного тока. В основе принципа лежит идея о том, что если активный фильтр генерирует только компенсирующий ток высших гармоник и реактивной мощности (далее «неактивные» оставляющие), то напряжение на емкостном накопителе в фазовых точках 0 и 2π останется одинаковым.

II. Постановка цели и задач

Целью работы является анализ возможности применения принципа контроля напряжения на конденсаторе звена постоянного тока АФГ, для определения тока основной гармоники, которая должна протекать в системе. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- произвести физическое обоснование предложенного метода;
- разработать структуру АФГ для реализации предложенного метода управления;
- разработать систему управления АФГ;
- произвести имитационное моделирование работы АФГ.

III. Физическое обоснование предлагаемого метода

Рассмотрим ток, потребляемый нелинейной нагрузкой в виде суммы мгновенных значений активного тока $i_A(t)$, реактивного тока $i_P(t)$, и тока гармонических искажений $i_H(t)$, выраженного рядом Фурье без первой гармоники:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= i_A(t) + i_P(t) + i_H(t) = \\
 &= I_{mA} \cdot \sin(\omega t) \pm I_{mP} \cdot \cos(\omega t) + \frac{a_0}{2} + \sum_{k=2}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t)).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Тогда энергия за один период сетевого напряжения определится согласно выражению:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_0^T s(t) dt = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \\
 &= \int_0^T U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot I_{m\Lambda} \cdot \sin(\omega t) dt \pm \int_0^T U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot I_{mP} \cdot \cos(\omega t) dt + \\
 &+ \int_0^T U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \left[\frac{a_0}{2} \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \right] dt = W_{\Lambda} + W_P + W_{\text{H}},
 \end{aligned} \quad (2)$$

Где:

$$\begin{aligned}
 W_{\Lambda} &= \int_0^T U_m \cdot I_{m\Lambda} \cdot \sin^2(\omega t) dt = \\
 &= U_m \cdot I_{m\Lambda} \cdot \left(\frac{\omega t}{2 \cdot \omega} - \frac{1}{4 \cdot \omega} \sin(2\omega t) \right) \Bigg|_0^T = U_m \cdot I_{m\Lambda} \cdot \frac{T}{2};
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 W_P &= \pm \int_0^T U_m \cdot I_{mP} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) dt = \pm U_m \cdot I_{mP} \cdot \frac{\sin^2(\omega t)}{2 \cdot \omega} \Bigg|_0^T = \\
 &\pm U_m \cdot I_{mP} \cdot \frac{\sin^2(\omega \cdot T)}{2 \cdot \omega} - \left(\pm U_m \cdot I_{mP} \cdot \frac{\sin^2(\omega \cdot 0)}{2 \cdot \omega} \right) = 0;
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{H}} &= \int_0^T U_m \cdot \frac{a_0}{2} \cdot \sin(\omega t) dt + U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \int_0^T a_n \cdot \cos(n\omega t) \cdot \sin(\omega t) dt + \\
 &+ U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \int_0^T b_n \cdot \sin(n\omega t) \cdot \sin(\omega t) dt = W_{\text{H1}} + W_{\text{H2}} + W_{\text{H3}};
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{H1}} &= \int_0^T U_m \cdot \frac{a_0}{2} \cdot \sin(\omega t) dt = -U_m \cdot \frac{a_0}{2 \cdot \omega} \cdot \cos(\omega t) \Bigg|_0^T \\
 &= -U_m \cdot \frac{a_0}{2 \cdot \omega} \cdot 1 - \left(-U_m \cdot \frac{a_0}{2 \cdot \omega} \cdot 1 \right) = 0;
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{H2}} &= U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \int_0^T a_n \cdot \cos(n\omega t) \cdot \sin(\omega t) dt = \\
 &= U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a_n}{2} \cdot \left(\frac{\cos((n+1)\omega \cdot t)}{(n+1)\omega} + \frac{\cos((1-n)\omega \cdot t)}{(1-n)\omega} \right) \Bigg|_0^T \\
 &= U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{(n+1)\omega} + \frac{1}{(1-n)\omega} \right) + U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{(n+1)\omega} + \frac{1}{(1-n)\omega} \right) = 0;
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ИЗ}} &= U_m \cdot \sum_{k=2}^{\infty} \int_0^T b_n \cdot \sin(k\omega t) \cdot \sin(\omega t) dt = \\
 &= U_m \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{b_n}{2} \cdot \left(\frac{\sin((n-1)\omega \cdot t)}{(n-1)\omega} - \frac{\sin((1+n)\omega \cdot t)}{(1+n)\omega} \right) \Bigg|_0^T = 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Исходя из приведенных расчетов, электрическая энергия за период сетевого зависит только от активной составляющей тока, т.е., от синусоидальной величины, совпадающей по фазе с сетевым напряжением. Поскольку принцип работы АФГ основан на генерации «неактивной» энергии в противофазе с нагрузкой, энергия на накопителе фильтра в начале и конце периода должна оставаться той же. Если в компенсационном токе АФГ будет содержаться основная гармоника, энергия на накопителе будет изменяться. Ее возрастание говорит о том, что активный фильтр, помимо тока компенсации, потребляет ток с частотой основной гармоникой и совпадающей с фазой сетевого напряжения, а уменьшение энергии говорит о том, что ток основной гармоники находится в противофазе с сетевым напряжением.

IV. Структура АФГ

Структура силового активного фильтра представлена на рис. 1. Для реализации предложенного алгоритма для однофазного фильтра необходим один датчик тока (ДТ), устанавливаемый в питающую сеть до места подключения фильтра, и датчик напряжения (ДН), устанавливаемый в звене постоянного тока. При такой конфигурации фильтра в системе управления рассчитывается идеальный синусоидальный ток, который, должен сформировать АФГ по средствам компенсации «неактивного» тока, потребляемого нагрузкой [8, 9].

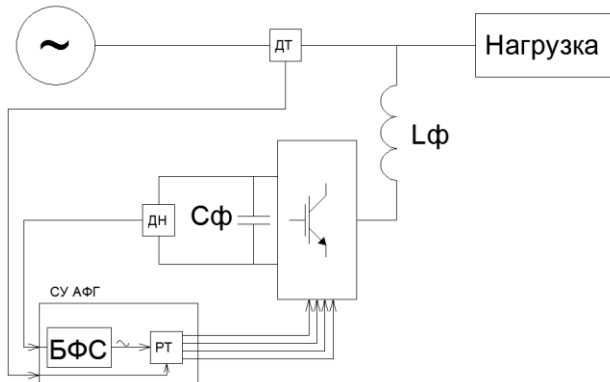


Рис. 1. Структура однофазного фильтра гармоник

V. Разработка системы управления

Расчет синусоидального тока производится в блоке БФС, структура которого представлена на рис. 2. Входным сигналом для блока является напряжение звена постоянного тока (U_c) дискретизированное по времени с частотой 50 Гц. Квадрат напряжения U_c сравнивается с квадратом задающего напряжением U_t , которое должно обеспечивать возможность генерации необходимого тока компенсации активного фильтра. Сигнал ошибки (err) поступает на блок ПИ-регулятора, на выходе которого рассчитывается значение амплитуды основной гармоники. Выходной сигнал ПИ-регулятора умножается на синусоидальный сигнал с единичной амплитудой, нулевой фазой и частотой 50 Гц.

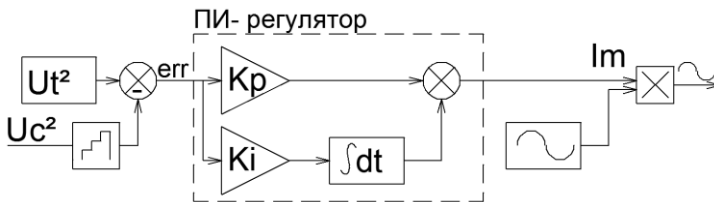


Рис. 2. Структура блок БФС

Сравнение квадратов напряжений U_c и U_t обусловлено тем, что взаимосвязь между током, потребляемым фильтром, и напряжением конденсатора имеет квадратичную зависимость:

$$u_c^2(t) = \frac{2}{C_f} \cdot \int u_s(t) \cdot i_f(t) dt, \quad (9)$$

где C_f – емкость конденсатора; $u_c(t)$, $u_s(t)$ и $i_f(t)$ – мгновенные значения напряжения конденсатора, напряжения сети и тока фильтра соответственно.

VI. Имитационное моделирование

Для оценки работы предлагаемой системы была разработана имитационная модель (рис. 3) в программе *Matlab* с использованием пакета *Simulink*. Емкость фильтра рассчитывалась в соответствии с [10], а параметры ПИ-регуляторы подобраны опытным путем. В табл. 1 приведены основные параметры модели. На рис. 4, а и 4, б приведены укрупненные осциллограммы тока, сети и тока нагрузки при работе активного фильтра, а на рис. 4, в и 4, г – кривые переходных процессов тока

сети и напряжения звена постоянного тока. Было установлено, что коэффициент общих гармонических искажений снизился с 76 % до 0,73 %, а время переходного процесса изменения напряжения звена постоянного тока и перерегулирование составили 0,06 с и 0,01 % соответственно. При оценке параметров переходного процесса рассматривались значения напряжений только в моменты времени, кратные периоду сетевого напряжения.

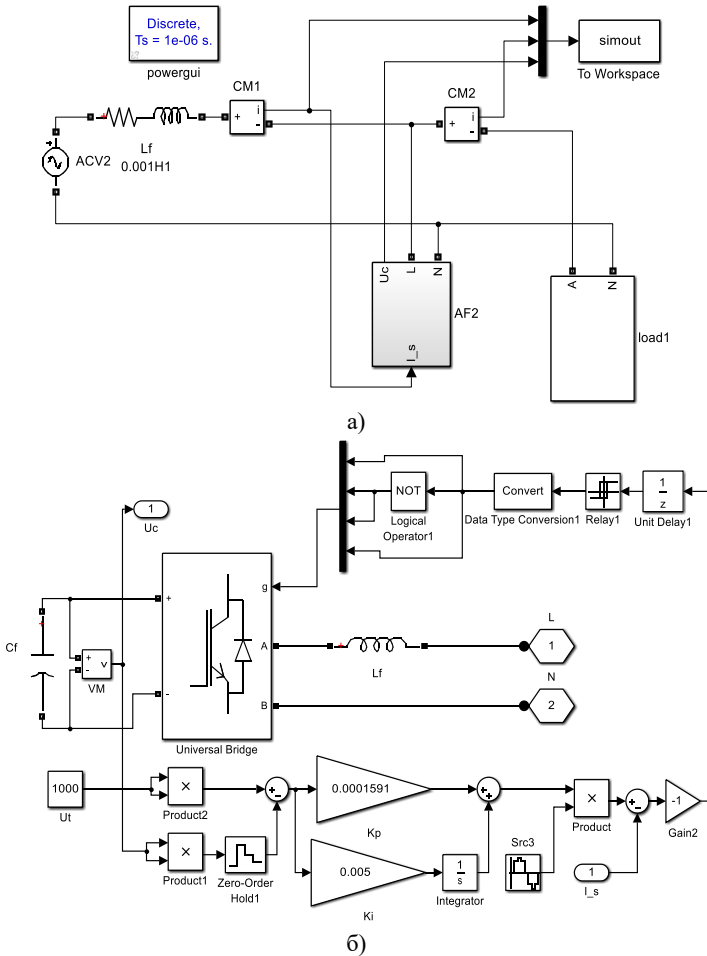


Рис. 3. Имитационная модель упрощенной системы электроснабжения (а) и активного фильтра AF1 (б)

Таблица 1.
Основные параметры имитационной модели

Параметр	Значение
Ёмкость фильтра C_f	700 мкФ
Индуктивность согласующего дросселя L_f	6 мГн
Начальное напряжение на конденсаторе C_f	1000 В
Пропорциональный коэффициент ПИ-регулятора	159×10^{-6}
Интегральный коэффициент ПИ-регулятора	5×10^{-3}
Действующее значение напряжения источника питания U_s	220 В
Параметр блока <i>Zero-Order Hold 1</i>	0,02 с

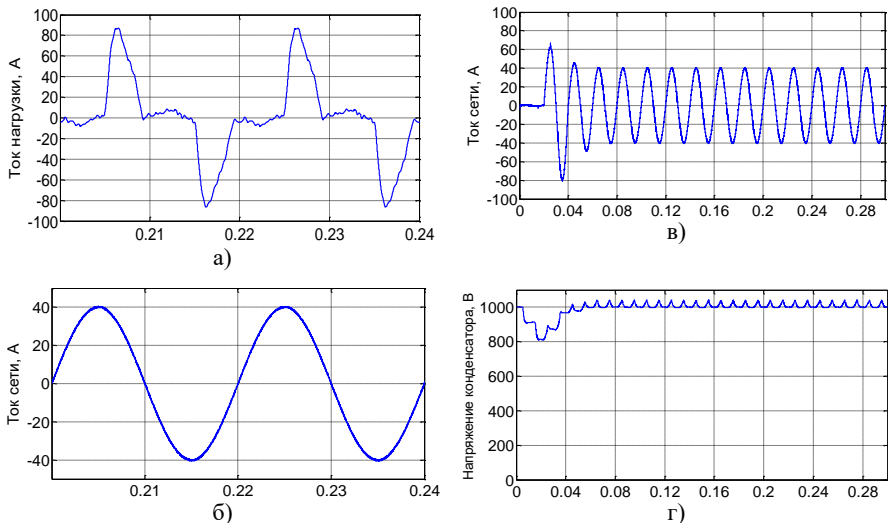


Рис. 4. Укрупненные осциллограммы тока нагрузки (а), сети при работе АФГ (б), осциллограмма тока сети (в) и напряжение конденсатора(г)

VII. Выводы

Произведено физическое обоснование возможности формирования тока компенсации активного фильтра на основе контроля напряжения звена постоянного тока. Разработана имитационная модель активного фильтра и подобранны коэффициент ПИ-регулятора. В ходе моделирования установлено, что уровень гармонических искажений снизился с 76 % до 0,73 %.

Выражаю благодарность научному руководителю Авербуху Михаилу Александровичу за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Библиографический список

- [1] Авербух М.А., Жилин Е.В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40-45.
- [2] Сычев Ю.А. Экспериментальные исследования режимов работы параллельного активного фильтра в сетях ОАО «Оренбургнефть» // Записки горного института. 2009. Т. 182. С. 114-117.
- [3] Han B. Single-phase active power filter using FFT with harmonic phase-delay compensation // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada. Pp. 1-6.
- [4] Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. N.J.: Wiley-IEEE Press, 2007. – 379 p.
- [5] Saitou M., Matsui N., Shimizu T. A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation // 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, Oct. 12-16, 2003, Salt Lake City, USA. Vol. 2. Pp. 1222-1227.
- [6] Прокопишин Д.И. Использование цифровых режекторных фильтров в составе системы управление однофазного активного фильтра гармоник // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе, Июнь 6-7, 2018, Воронеж, Россия. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. Том Ч. 1. С. 165-170.
- [7] Чернышов М.О., Довгун В.П., Малошенко О.Е. Гибридные силовые фильтры для трехфазных четырехпроводных сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 11-19.
- [8] Скурятин Ю. В., Белоусов А.В., Денисевич Н.А. Параллельный силовой активный фильтр с управлением на скользящих режимах // Проблемы региональной энергетики. 2018. № 2 (37). С. 20-30.
- [9] Скурятин Ю. В., Белоусов А.В. Повышение эффективности активной фильтрации. Прямое управление потребляемой мощностью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 1. С. 71-77.
- [10] Плехов А.С., Титов Д.Ю., Чернов Е.А. Расчет емкости конденсатора в цепи постоянного тока активного фильтра гармоник // Инженерный вестник Дона, 2014, № 1 (28).

D.I. Prokopishin

**DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM
OF SINGLE-PHASE ACTIVE FILTER
BASED ON DC LINK VOLTAGE MONITORING**

Belgorod State Technological University n. a. V.G. Shukhov
Belgorod, Russia

Abstract. The article describes the operation of a single-phase active filter with controls system based on voltage monitoring of the capacitor in the DC link. The voltage value is controlled by changing the amplitude of the idealized sinusoidal current formed by the active filter. The calculation of the required current amplitude is implemented on the basis of a PI controller, the parameters of which are formed experimentally. A simulation model of a single-phase nonlinear electric load and an active filter in the Matlab Simulink has been developed. As a result of the simulation, it was found that the total harmonic current distortion decreased from 76 % to 0.73 %, and the transition time of changing the voltage of the DC link and over-regulation were 0.2 s and 0.01 %, respectively.

Keywords: DC link voltage monitoring, non-linear electric load, single-phase active filter.

References

- [1] M.A. Averbukh and E.V. Zhilin, “Impact of non-linear and non-symmetrical load on the power supply system of residential microdistricts”, *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 40 – 45, 2017.
- [2] Yu.A. Sychev, “Eksperimental'nye issledovaniya rezhimov raboty parallel'nogo aktivnogo fil'tra v setyah OAO “Orenburgneft” [Experimental research of modes of operation of the parallel active filter in the networks of JSC “Orenburgneft”]”, *Journal of Mining Institute*, vol. 182, pp. 114-117, 2009 (in Russian).
- [3] B. Han, “Single-phase active power filter using FFT with harmonic phase-delay compensation”, in proc. *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 26-30, 2009, Calgary, Canada, pp. 1-6.
- [4] H. Akagi, E.H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. N. J.: Wiley-IEEE Press, 2007.
- [5] M. Saitou, N. Matsui, T. Shimizu, “A control strategy of single-phase active filter using a novel d-q transformation”, in proc. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, Oct. 12-16, 2003, Salt Lake City, USA, vol. 2, pp. 1222-1227.
- [6] D.I. Prokopishin, “Ispol'zovanie cifrovyyh rezhektornykh fil'trov v sostave sistemy upravlenie odnofaznogo aktivnogo fil'tra garmonik [Using digital cutting filters as part of the control system for a single-phase active harmonics filter]”, in proc. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve [En-*

- ergy efficiency and energy saving in modern production and society*], June 6-7, 2018, Voronezh, Russia, vol. Part 2, pp. 165-170 (in Russian).
- [7] M.O. Chernyshov, V.P. Dovgun and O.E. Malashenok, "Hybrid power filters for three-phase four-wire systems", *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, no. 1-2, pp. 11-19, 2016.
- [81] Yu.V. Skuriatin, A.V. Belousov and N.A. Denysevich, "Sliding mode control based shunt active power filter", *Problems of the Regional Energetics*, no. 2 (37), pp. 20-30, 2018.
- [9] Yu.V. Skuriatin and A.V. Belousov, "Improving the active filtering efficiency. direct control of power consumption", *Russian Electromechanics*, no. 1, pp. 71-77, 2016.
- [10] A.S. Plekhov, D.Yu. Titov and E.A. Chernov, "Calculation of the capacitance of the capacitor on the DC link active harmonic filter", *Engineering journal of Don*, no. 1 (28), 2014.