

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-249-262>

УДК 621.313

Сравнительный анализ методов управления параллельным активным фильтром по критерию минимума коэффициента нелинейных искажений

Р. Е. Первененок¹⁾, А. Л. Сицко¹⁾, С. В. Пантелеев¹⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В настоящее время происходит увеличение темпов роста энергопотребления, что подтверждается механизацией промышленной и бытовой сфер, возрастанием энергозатрат на обеспечение качества жизни, а также наступившей эрой электромобилей. При этом актуальными становятся вопросы рационального, эффективного использования источников энергии. В частности, в электроэнергетике актуальным направлением является применение силовых активных фильтров (САФ). Достоинством САФ является способность одновременно компенсировать как реактивную мощность электрической нагрузки на основной частоте, так и высшие гармонические искажения, что позволяет существенно повысить качество электроэнергии в распределительных сетях. Реализация систем управления САФ на основе теории мгновенной мощности (pq -теории) за последние десятилетия получила значительное развитие. Данный подход обеспечивает эффективную компенсацию в установившихся режимах, однако его эффективность снижается при динамических изменениях характера нагрузки. Наиболее прогрессивными являются методы управления САФ, основанные на использовании нейронных сетей и цифровой обработки сигнала. В большинстве случаев в качестве базового элемента нейронной сети используется адаптивный пороговый логический элемент (Adaline), который представляет собой цифровой КИХ-фильтр второго порядка, настраиваемый с помощью алгоритма наискорейшего спуска. Такая структура позволяет осуществлять адаптивную фильтрацию гармонических составляющих в реальном масштабе времени. Вместе с тем применение технологий цифровой обработки сигналов позволяет использовать адаптивные методы спектрального оценивания и подавления помех, которые обеспечивают возможность регуляторам подстраивать в режиме реального времени свои параметры при изменении несинусоидального режима в сети. Это особенно важно при работе с импульсной электрической нагрузкой, характеризующейся быстрыми изменениями спектрального состава тока. В статье проведен анализ известных методов управления САФ для электрических цепей при подключении импульсной электрической нагрузки. Установлено, что наиболее эффективным по критерию минимизации коэффициента гармонических искажений тока (THD) при времени установления переходного процесса $t \leq 0,01$ с является адаптивный метод, где THD после подключения САФ составляет 1,57 %, что подтверждает высокую эффективность интеллектуальных алгоритмов управления для обеспечения качества электроэнергии в современных электроэнергетических системах.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, метод управления, pq -теория, адаптивный метод, цифровая обработка

Для цитирования: Первененок, Р. Е. Сравнительный анализ методов управления параллельным активным фильтром по критерию минимума коэффициента нелинейных искажений / Р. Е. Первененок, А. Л. Сицко, С. В. Пантелеев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 3. С. 249–262. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-249-262>

Адрес для переписки

Первененок Роман Евгеньевич
Военная академия Республики Беларусь
просп. Независимости, 220,
220057, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 235-39-49
ronnn.08@mail ru

Address for correspondence

Pervenенок Roman E.
Military Academy of the Republic of Belarus
220, Nezavisimosty Ave.,
220057, Minsk, Republic of Belarus
Тел. +375 17 235-39-49
ronnn.08@mail ru

Comparative Analysis of Parallel Active Filter Control Methods by the Criterion of the Minimum Coefficient of Total Harmonic Distortion

R. E. Pervenенок¹⁾, A. L. Sitsko¹⁾, S. V. Panteleev¹⁾

¹⁾ Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Energy consumption is currently growing at an accelerating pace, evidenced by the mechanization of industrial and domestic sectors, rising energy costs for quality of life, and the advent of electric vehicles. At the same time, the rational and efficient use of energy sources is becoming increasingly important. In particular, the use of power active filters (PAF) is an urgent area in the electric power industry. The advantage of PAF is the ability to simultaneously compensate for both the reactive power of the electrical load at the fundamental frequency and higher harmonic distortion, which significantly improves the quality of electricity in distribution networks. The implementation of PAF control systems based on instantaneous power theory (*pq*-theory) has significantly advanced in recent decades. This approach provides effective compensation in steady-state conditions, but its effectiveness decreases with dynamic load changes. The most advanced PAF control methods are those based on neural networks and digital signal processing. In most cases, an adaptive threshold logic element (Adaline) is used as the basic element of a neural network. This element is a second-order digital FIR filter that can be configured using a steepest descent algorithm. This structure allows adaptive filtering of harmonic components in real time. Furthermore, the use of digital signal processing technologies makes it possible to use adaptive spectral estimation and interference suppression methods, which enable controllers to adjust their parameters in real time when the non-sinusoidal mode in the network changes. This is especially important when working with pulsed electrical loads, characterized by rapid changes in the spectral composition of the current. The present article analyzes known methods for controlling the PAF for electrical circuits when connecting a pulsed electrical load. It was found that the adaptive method is the most effective one in terms of minimizing the harmonic distortion coefficient (*THD*) of the current with a transient settling time of $t \leq 0,01$ s, where the *THD* after connecting the PAF is 1.57%. This confirms the high efficiency of intelligent control algorithms for ensuring power quality in modern electric power systems.

Keywords: power active filter, control method, *pq*-theory, adaptive method, digital processing

For citation: Pervenенок R. E., Sitsko A. L., Panteleev S. V. (2026) Comparative Analysis of Parallel Active Filter Control Methods by the Criterion of the Minimum Coefficient of Total Harmonic Distortion. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (3), 249–262 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-3-249-262>

Введение

Низкое качество электрической энергии оказывает отрицательное влияние на электрооборудование – снижается его коэффициент полезного действия и растут потери электроэнергии при передаче в электросетях.

В системах электроснабжения несинусоидальные напряжение и ток характеризуются гармоническими и интергармоническими составляющими, которые в ГОСТ 32144–2013 не нормируются [1].

ГОСТ 32144–2013 нормирует качество электроэнергии по 10 показателям. Одним из таких показателей является коэффициент несинусоидальности кривой напряжения, который для сетей 0,4 кВ может достигать величины 8 % (предельно допустимое значение 12 %) (при расчете до 40-й гар-

моники). Коэффициент несинусоидальности кривой тока ГОСТом не нормируется, но потребляемый несинусоидальный ток является первопричиной искажения кривой напряжения [1].

В [2, 3] отмечается, что основными источниками снижения качества электроэнергии являются распределительные сети и конечные потребители. Значительное влияние на качество электроэнергии оказывают устройства распределенной генерации и системы резервного электропитания. Конечные потребители, в состав которых входят элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, представляют собой персональные компьютеры, системы освещения с энергосберегающими источниками света и электроприводы с регулируемой скоростью вращения.

Для повышения качества электрической энергии используют фильтрокомпенсирующие устройства – пассивные и активные фильтры гармоник. Наиболее эффективным является использование параллельных активных фильтров [4].

Качество работы силовых активных фильтров (САФ) существенно зависит от применяемого метода управления. Поэтому целью настоящей статьи являются обзор известных и перспективных методов управления САФ и выбор из них рациональных для эффективной компенсации реактивной мощности, устранения несимметрии напряжений и компенсации высших гармоник тока.

Основная часть

САФ состоит из силовой части и системы управления. Силовая часть включает в себя мостовую схему полупроводникового коммутатора из транзисторов, реакторы из дросселей в звене переменного тока и сглаживающий емкостной фильтр в звене постоянного тока. Транзисторы (*IGBT*, *MOOSFET*) выполняют функцию полностью управляемых ключей, обладающих двусторонней проводимостью тока при поступлении сигнала из системы управления, которая включает в себя алгоритмы формирования и реализации управляющих сигналов. Типовыми функциями системы управления САФ являются [5]:

1) получение от системы датчиков информации о величинах мгновенных значений токов и напряжений в цифровом виде;

2) формирование управляющего сигнала, позволяющего компенсировать отклонение вектора тока (напряжения) в системе «сеть – электрическая нагрузка» от заданных;

3) генерирование компенсирующего сигнала в противофазе относительно искаженной формы тока (напряжения) (без первой гармоники);

4) управление силовыми ключами с применением принципов гистерезисного регулирования или широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Методы формирования управляющих сигналов можно классифицировать на частотные и временные. Методы формирования управляющих сигналов в частотной области основываются на представлении несинусоидальных токов и напряжений в виде ряда Фурье. С помощью дискретного

преобразования Фурье (ДПФ) отсчеты периодического входного сигнала (несинусоидального тока или напряжения) представляются в виде комплексного ряда. Для уменьшения количества вычислительных операций применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое позволяет разделить N -точечное преобразование на два $N/2$ -точечных ДПФ. Также на практике получило широкое применение рекурсивное ДПФ с применением скользящего окна, которое позволяет уменьшить вычислительные затраты по сравнению прямым ДПФ [6].

Общим недостатком методов формирования управляющих сигналов в частной области является необходимость применения аналоговых фильтров для исключения эффекта наложения спектров, что вносит дополнительные фазовые и амплитудные искажения и снижает быстродействие.

С развитием цифровой техники широкое применение получили методы формирования управляющих сигналов во временной области, достоинством которых является способность эффективного регулирования в установившемся и переходном режимах работы электрической цепи с произвольными формами токов и напряжений. При регулировании во временной области выполняется обработка мгновенных значений сигналов без преобразований Фурье, что значительно уменьшает вычислительную нагрузку и повышает быстродействие систем управления.

Наиболее известными являются методы мгновенной мощности (pq -теория, метод единичного коэффициента мощности, метод полной компенсации гармоник), метод мгновенных значений симметричных составляющих токов и напряжений трехфазной цепи, методы на основе нейронных сетей и алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Теория мгновенной мощности (pq -теория) подробно рассмотрена в работах [7, 8]. Она основывается на преобразовании мгновенных значений напряжений (токов) в трехфазной системе координат (abc) в вектор на комплексной плоскости в системе координат $\alpha\beta 0$ или $pq0$. Такие преобразования координат называются преобразованием Кларка и Парка соответственно и характеризуются свойством инвариантности мощности в исходных и преобразованных координатах. После преобразования координат представляется возможным рассчитать постоянные и пульсирующие составляющие мгновенной активной и мгновенной реактивной мощности. При этом только постоянная составляющая мгновенной активной мощности характеризует скорость передачи энергии от источника в нагрузку [9].

Вместе с тем полная мощность может быть представлена совокупностью компонентов активной мощности P , реактивной мощности Q и мощности искажений D . Схема циркуляции компонентов полной мощности в системе «сеть – активный фильтр – нагрузка» представлена на рис. 1.

Таким образом, в контуре управления САФ выполняется расчет компенсационных токов, посредством инъекции которых в систему «сеть – электрическая нагрузка» передается мощность искажения, позволяющая компенсировать пульсирующую мгновенную мощность и мгновенную реактивную мощность.

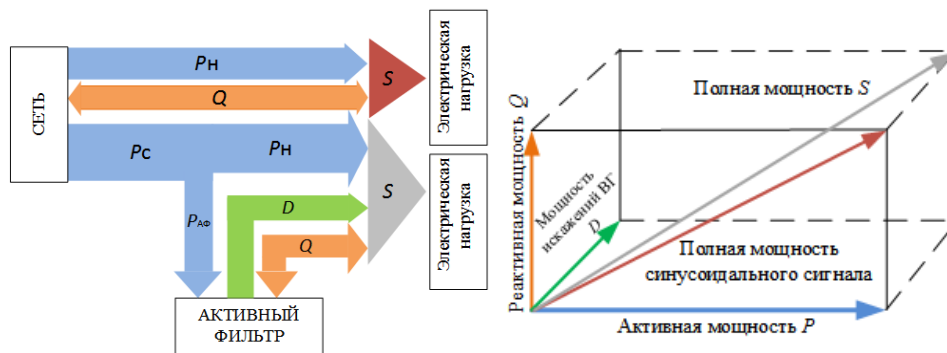


Рис. 1. Распределение мощности в системе: «сеть – активный фильтр – электрическая нагрузка»: P_C – активная мощность, отбираемая из сети; P_H – то же, потребляемая нагрузкой; $P_{АФ}$ – мощность, потребляемая активным фильтром; Q – реактивная мощность, потребляемая/генерируемая нагрузкой и активным фильтром; D – мощность искажений

Fig. 1. Power distribution in the system: “network – active filter – electric load”:

P_C – active power taken from the network; P_H – the same, consumed by the load;
 $P_{АФ}$ – power consumed by the active filter; Q – reactive power consumed/generated by the load and the active filter; D – distortion power

Метод единичного коэффициента мощности. Система управления САФ на основе метода единичного коэффициента мощности обеспечивает синфазность тока и напряжения сети, минимизируя таким образом реактивную мощность. Основой применения такого метода является pq -теория. Однако обеспечение $\cos\varphi=1$ достигается компенсацией только тех высших гармоник тока нагрузки, которые существенным образом влияют на фазовый угол между током и напряжением. В таком случае формирование компенсационного тока САФ i_f и инжекция его в систему «сеть – нагрузка» не обеспечивает строго синусоидальную форму тока нагрузки [8, 10]

$$i_f = i_n - i_n^* \tag{1}$$

где i_n , i_n^* – измеренный и заданный (опорный) ток нагрузки.

Заданные токи нагрузки определяем по выражению

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_0^* \end{bmatrix} = \psi(t) \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_0 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $\psi(t) = \psi_0$ – проводимость электрической нагрузки.

Проводимость ψ_0 находим по формуле

$$\psi_0 = \frac{\bar{P}_{наф} + \bar{P}_{н0}}{\bar{u}_a^2 + \bar{u}_b^2 + \bar{u}_0^2}, \tag{3}$$

где \bar{P} – постоянная составляющая активной мгновенной мощности; \bar{u} – то же мгновенного напряжения сети.

Метод полной компенсации гармоник. Основная его задача заключается в устранении искажений токов, которые возникают в электрической сети из-за нелинейных нагрузок. В системе управления САФ определяется гармонический состав тока нагрузки, выделяется гармоника основной частоты и формируются токи компенсации всех высших гармоник, инжекция которых в противофазе позволяет устранить искажения тока нагрузки. Результатом применения такого метода является синусоидальная форма тока нагрузки, совпадающая по фазе с напряжением сети. Для корректной реализации такого метода в трехфазной сети выполняется расчет заданных токов нагрузки с учетом напряжения источника на частоте основной гармоники

$$\begin{bmatrix} i_0^* \\ i_a^* \\ i_b^* \end{bmatrix} = \frac{\bar{P}}{u_{1\alpha}^2 + u_{1\beta}^2} \begin{bmatrix} 0 \\ u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $u_{1\alpha}$ и $u_{1\beta}$ – напряжение источника на частоте основной гармоники.

Метод, основанный на использовании симметричных составляющих, достаточно полно рассмотрен в [7]. В таком методе используется преобразование системы фазных токов нагрузки в три симметричные составляющие (положительную, отрицательную и нулевую). Величина отрицательной и нулевой симметричных составляющих характеризует степень несимметрии нагрузки и гармонических искажений токов. В процессе определения токов компенсации необходимо учитывать следующие условия:

1) ток нейтрального проводника равен нулю: $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$.

2) реактивная мощность, отдаваемая источником, равна нулю: $(u_{sb} - u_{sc})i_{sa} + (u_{sc} - u_{sa})i_{sb} + (u_{sa} - u_{sb})i_{sc} = 0$.

В таком случае активная мощность, отдаваемая источником, $P = u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb} + u_{sc}i_{sc}$ будет максимальной.

При применении в САФ метода симметричных составляющих заданные токи нагрузки определяются по выражениям, где в качестве опорного напряжения принято u_{sa} . Вместе с тем в [7] рассмотрены различные способы формирования управляющих воздействий, отличающиеся выбором опорных напряжений:

$$i_{sa} = \frac{u_{sa} - u_{sa}^0}{\Delta} P; \quad (5)$$

$$i_{sb} = \frac{u_{sb} - u_{sa}^0}{\Delta} P; \quad (6)$$

$$i_{sc} = \frac{u_{sc} - u_{sa}^0}{\Delta} P, \quad (7)$$

где $u_{sa}^0 = \frac{1}{3}(u_{sa} + u_{sb} + u_{sc})$; $\Delta = u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2 - 3(u_{sa}^0)^2$.

Кроме того, в уравнениях (5)–(7) следует учесть, что для симметричной системы синусоидальных напряжений источника составляющая $u_{sa}^0 = 0$.

Метод управления САФ на основе симметричных составляющих целесообразно применять в трехфазных системах со значительной несимметрией в нагрузке.

Методы, основанные на использовании нейронных сетей и алгоритмов цифровой обработки сигналов. Развитие теории цифровой обработки сигналов [11–13] и цифровых аппаратных средств дает возможность разрабатывать адаптивные методы управления САФ, что позволяет контуру управления отрабатывать возмущающие воздействия в виде изменения напряжения источника и характера нагрузки в режиме реального времени.

Вместе с тем в настоящее время значительное количество прикладных задач решается с помощью нейронных сетей. При разработке нейросетевых методов управления САФ, как правило, используется базовый адаптивный пороговый элемент нейронной сети (*Adaline*) [14].

В статье [15] рассмотрен адаптивный способ управления САФ, позволяющий работать в режиме реального времени при изменяющихся характеристиках нелинейной нагрузки. Сущность способа заключается в следующем. После измерения ток нагрузки $i_n(t)$ представляется в виде ряда Фурье (8), создается вектор предыдущих отсчетов

$$i_n(t) = \sum_{n=1}^N i_{n,n}^a(t) \sin(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^N i_{n,n}^b(t) \cos(n\omega_0 t), \quad (8)$$

где $i_n(t)$ – ток нагрузки фазы A ; $n = 1, 5, 7, \dots, N$ – номера гармоник (в трехфазных симметричных электрических цепях четные и кратные трем гармоники отсутствуют); $i_{n,n}^a(t)$, $i_{n,n}^b(t)$ – амплитуды синусоидальной и косинусоидальной составляющих фазного тока нагрузки соответственно; ω_0 – частота сети.

Выражение для расчета тока нагрузки (8) записываем в матричной форме

$$i_n^i = (w_i)^T x_n, \quad (9)$$

где $w_i = [i_1^a \ i_5^a \ \dots \ i_N^a \ i_1^b \ i_5^b \ \dots \ i_N^b]^T$ – вектор весовых коэффициентов амплитуд синусоидальной и косинусоидальной составляющих фазного тока нагрузки соответственно; $x_n = [\sin(\omega_0 t) \ \cos(\omega_0 t) \ \sin(5\omega_0 t) \ \cos(5\omega_0 t) \ \dots \ \sin(n\omega_0 t) \ \times \ \cos(n\omega_0 t)]^T$ – вектор коэффициентов синусоидальной и косинусоидальной составляющих фазного тока нагрузки.

Далее посредством применения текущих весовых коэффициентов к токовым гармоническим компонентам выполняются выделение из искаженного сигнала гармоники тока основной частоты, корректировка ве-

совых коэффициентов, расчет и формирование компенсирующих токов в противофазе с основной гармоникой.

Наиболее распространенными адаптивными нейросетевыми способами управления САФ являются те, что основаны на алгоритме наименьших средних квадратов (*LMS*), нормализованном алгоритме наименьших средних квадратов (*NLMS*) и рекурсивном алгоритме наименьших квадратов (*RLS*). Сравнительная характеристика таких алгоритмов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики адаптивных алгоритмов
Characteristics of adaptive algorithms

Алгоритм	Вычислительная процедура (k – число итераций)	Вычислительная сложность
Алгоритм наименьших средних квадратов (<i>LMS</i>)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \eta e_k X_k$	$2N$ сложений, $2N$ умножений
Нормализованный алгоритм средних квадратов (<i>NLMS</i>)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \frac{\eta}{\delta^2 + X_k^+ X_k} X_k e_k$	$3N$ сложений, $3N$ умножений, деление
Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов (<i>RLS</i>)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + g_k e_k$, $g_k = \frac{R_k^{-1} X_k}{\lambda + R_k^{-1} X_k^+ X_k}$, $R_{k+1}^{-1} = \lambda^{-1} [R_k^{-1} - g_k X_k^+ R_k^{-1}]$	$2N^2 + 3N$ сложений, $3N^2 + 3N$ умножений, деление
<p>Примечания: λ – коэффициент забывания; η – шаг сходимости; R_k^{-1} – матрица, вычисляемая рекурсивно на каждой итерации; g_k – вектор коэффициентов Калмана, являющийся, по существу, набором переменных шагов сходимости для каждого весового коэффициента; δ^2 – малое действительное число, $\delta^2 \geq 0,01\sigma_x^2$; σ_x^2 – дисперсия входного сигнала адаптивного фильтра; N – число.</p>		

В [16–18] доказано, что алгоритм *NLMS* является наиболее эффективным, имеет промежуточную сложность вычисления и быструю скорость сходимости.

В программном комплексе MATLAB-Simulink проведены исследование и расчет параметров качества электрической энергии в электрической цепи с применением САФ, система управления которого функционирует на основе *pq*-теории, метода единичного коэффициента мощности и адаптивного метода (*NLMS*).

На рис. 2–5 представлены исследуемые имитационные модели.

Результаты моделирования. Спектр тока фазы *A* при подключении нелинейной электрической нагрузки представлен на рис. 6, где $THD_i = 31,56\%$. Осциллограмма тока нагрузки фазы *A* до момента времени $t = 0,1$ с имеет искаженную форму (рис. 7). На интервале времени $t = 0,1–0,2$ с выполняется включение САФ, после чего осциллограмма тока принимает синусоидальную форму (рис. 7). Спектры восстановленного

тока фазы *A* характеризуются следующими параметрами качества электрической энергии:

- *pq*-теория – $THD_i = 5,33 \%$ (рис. 8);
- метод единичного коэффициента мощности – $THD_i = 3,06 \%$ (рис. 9);
- адаптивный метод (*NLMS*) – $THD_i = 1,57 \%$ (рис. 10).

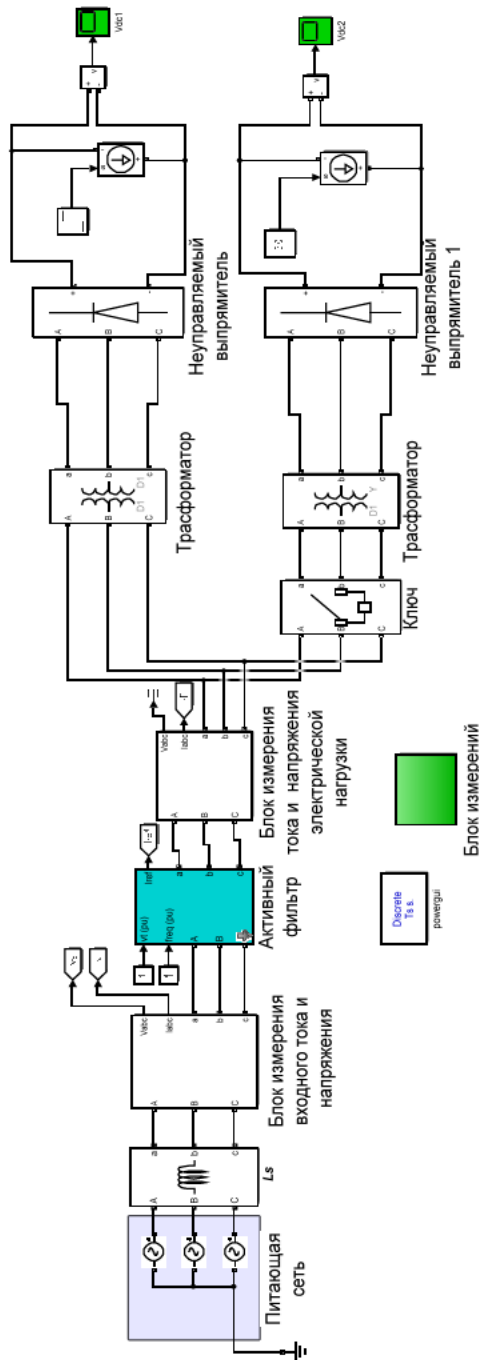


Рис. 2. Имитационная модель САФ «сеть – активный фильтр – электрическая нагрузка»

Fig. 2. Simulation model of the PAF “network – active filter – electrical load”

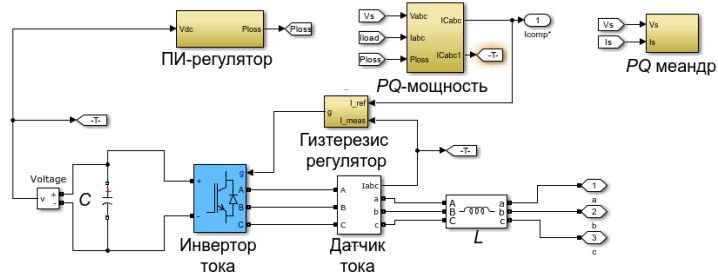


Рис. 3. Имитационная модель САФ «pq-теория»
Fig. 3. Simulation model of the PAF “pq-theory”

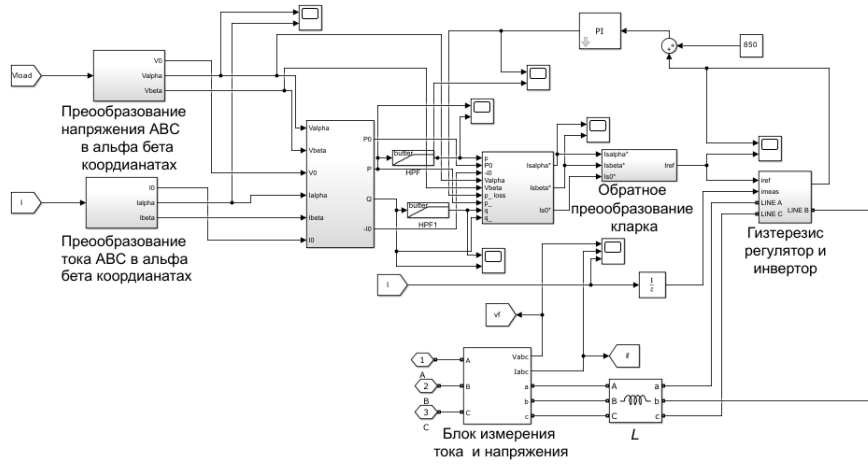


Рис. 4. Имитационная модель САФ «метод единичного коэффициента мощности»
Fig. 4. Simulation model of the PAF “single power factor method”

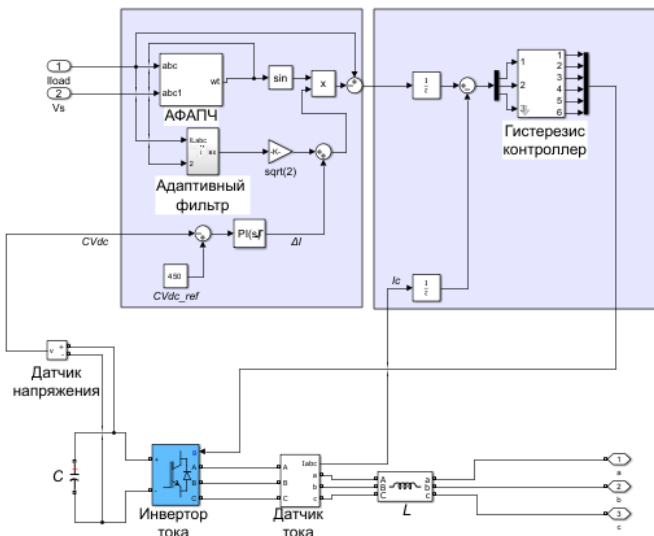


Рис. 5. Имитационная модель САФ «адаптивный метод»
Fig. 5. Simulation model of the SAF “adaptive method”

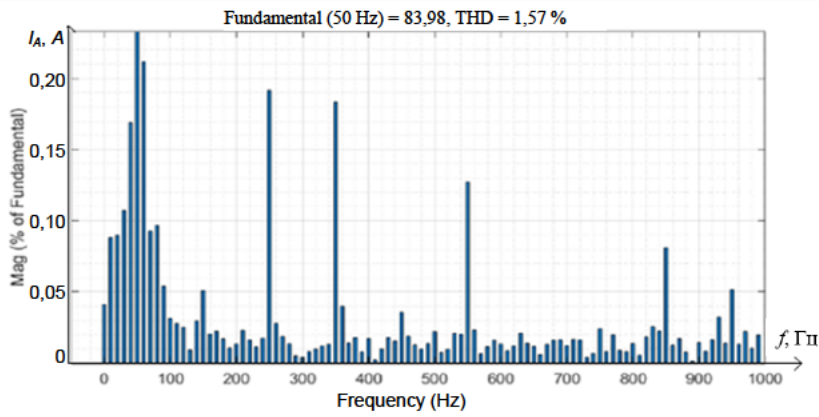


Рис. 6. Спектр тока фазы *A*

Fig. 6. Current spectrum of phase *A*

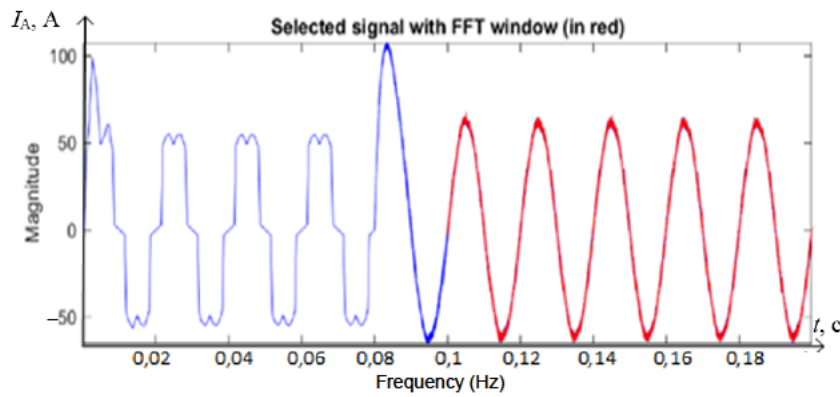


Рис. 7. Осциллограмма тока фазы *A*

Fig. 7. Current waveform of phase *A*

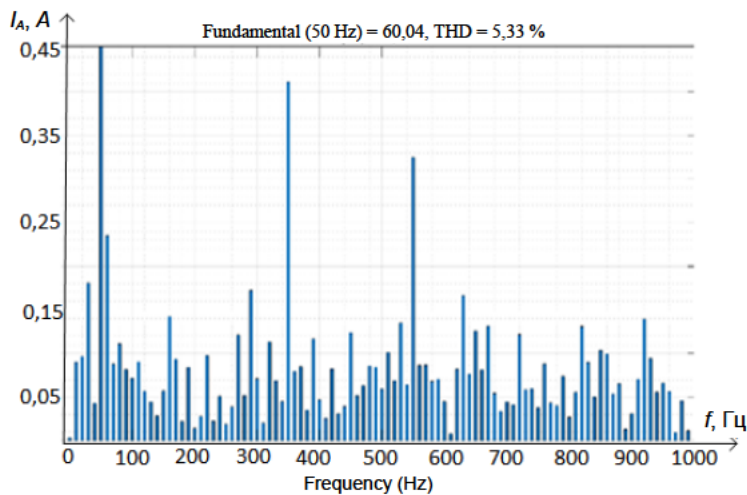


Рис. 8. Спектр восстановленного тока фазы *A* (*pq*-теория)

Fig. 8. Spectrum of the restored phase *A* current (*pq*-theory)

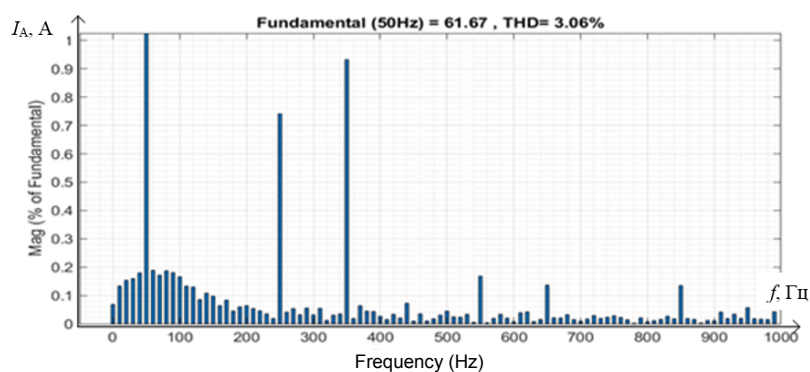


Рис. 9. Спектр восстановленного тока фазы A (метод единичного коэффициента мощности)

Fig. 9. Spectrum of the restored phase A current (single power factor method)

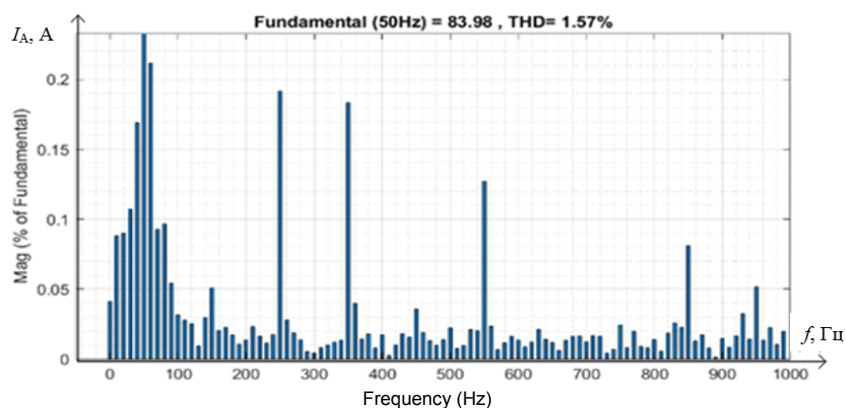


Рис. 10. Спектр восстановленного тока фазы A (адаптивный метод $NLMS$)

Fig. 10. Spectrum of the restored phase A current (adaptive $NLMS$ method)

Результаты имитационного моделирования показали, что наиболее эффективным методом управления САФ является адаптивный метод ($NLMS$), где $THD_i = 1,57\%$.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены методы формирования управляющих сигналов в САФ, основанные на pq -теории, методе единичного коэффициента мощности и адаптивном методе ($NLMS$). Каждый из рассмотренных методов имеет определенные ограничения и сложности реализации, связанные главным образом с обеспечением быстродействия и устойчивости системы при компенсации искажений в несинусоидальных и несимметричных условиях.

2. Установлено, что наиболее эффективным из представленных методов управления САФ является адаптивный метод ($NLMS$). Результаты имитационного моделирования показали, что наилучшим параметром качества

электрической энергии ($THD_i = 1,57\%$) характеризуется адаптивный метод (NLMS) в сравнении с методом pq -теории ($THD_i = 5,33\%$) и методом единичного коэффициента мощности ($THD_i = 3,06\%$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 22.07.2013. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
2. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. / А. Куско, М. Томпсон. М.: Додэка-XXI, 2008. 336 с.
3. Управление качеством электроэнергии / И. И. Каргашев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю. В. Шарова. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 320 с.
4. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / П. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров [и др.]; под ред. В. П. Довгуна. Красноярск: СФУ, 2014. 192 с.
5. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. 2-е изд. М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 632 с.
6. Asiminoaei, L. Detection is Key – Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications / L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen // IEEE Industry Application Magazine. 2007. Vol. 13, No 4. P. 22–33. <https://doi.org/10.1109/mia.2007.4283506>
7. Akagi, H. Active Harmonic Filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93, No 12. P. 2128–2141. <https://doi.org/10.1109/jproc.2005.859603>
8. Montero, V. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems / V. Montero, E. Cadaval, G. González // IEEE Transactions on Power Electronics. 2007. Vol. 22, No 1. P. 229–236. <https://doi.org/10.1109/tpel.2006.886616>
9. Clarke, E. Circuit Analysis of A–C Power Systems. Vol I: Symmetrical and Related Components / E. Clarke. NY: John Wiley and Sons, 1943.
10. Rafi, F. Improved Neutral Current Compensation With a Four-Leg PV Smart VSI in a LV Residential Network / F. Rafi, M. Hossain, J. Lu // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, No 5. P. 2291–2302. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2016.2602220>
11. Адаптивные фильтры: пер. с англ. / под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П. М. Гранта, Б. Фридендер [и др.]. М.: Мир, 1988. 392 с.
12. Кей, С. М. Современные методы спектрального анализа / С. М. Кей, С. Л. Марпл-мл. // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 11. С. 5–51.
13. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. / С. Л. Марпл-мл. М.: Мир, 1990. 584 с.
14. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
15. Первенёнок, Р. Е. Способ управления силовым активным фильтром на основе адаптивной фильтрации / Р. Е. Первенёнок, А. Л. Сицко // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. 2021. № 2. С. 74–85.
16. Первенёнок, Р. Е. Фазовая синхронизация в системе коррекции параметров питающего напряжения на основе применения адаптивной фильтрации / Р. Е. Первенёнок, А. Л. Сицко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. 2021. Т. 66, № 2. С. 86–94. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-455-468>
17. Синтез алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции в девятифазном активном выпрямителе напряжения / С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин, Д. В. Каркоцкий, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 334–345. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-334-345>
18. Ролик, Ю. А. Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой / Ю. А. Ролик, А. В. Горностай // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 3. С. 225–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2015-0-3-225-234>

Поступила 11.12.2025 Подписана в печать 17.02.2026 Опубликовано онлайн 29.05.2026

REFERENCES

1. State Standard 32144-2013. *Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electrical Energy Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems*. Moscow, Standartinform, 2014. 16 p. (in Russian)
2. Kusko A. (2007) *Power quality in electrical systems*. New York, McGraw-Hill, cop.
3. Kartashev I. I., Tul'skii V. N., Shamonov R. G., Sharov Yu. V., Nasyrov R. R. (2006) *Electric Power Quality Management*. Moscow, MPEI Publishing House. 320 (in Russian).
4. Boyarskaya P. P., Dovgun V. P., Egorov D. E., Temerbayev S. A., Shevchenko E. S. (2014) *Synthesis of Filter-Compensating Devices for Power Supply Systems*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University. 192 (in Russian).
5. Rozanov Yu. K., Ryabchitsky M. V., Kvasnyuk A. A. (2009) *Power Electronics*. 2nd ed. Moscow, MPEI Publishing House. 632 (in Russian).
6. Asiminoael L., Blaabjerg F., Hansen S. (2007) Detection is Key – Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13 (4), 22–33. <https://doi.org/10.1109/MIA.2007.4283506>
7. Akagi H. (2005) Active Harmonic Filters. *Proceedings of the IEEE*, 93 (12), 2128–2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>
8. Montero M. I. M., Cadaval E. R., Gonzalez F. B. (2007) Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (1), 229–236. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2006.886616>
9. Clarke E. (1943) *Circuit Analysis of A-C Power Systems. Vol. I: Symmetrical and Related Components*. N.-Y., John Wiley and Sons.
10. Rafi F. H. M., Hossain M. J., Lu J. (2017) Improved Neutral Current Compensation with a Four-Leg PV Smart VSI in a LV Residential Network. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32 (5), 2291–2302. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2602220>
11. Cowan K. F. N., Grant P. M., Adams P. F. (1985) *Adaptive Filters*. Prentice-Hall. 308.
12. Kay S. M., Marple S. L. (1981) Spectrum Analysis – A Modern Perspective. *Proceedings of IEEE*, 69 (11), 1380–1419. <https://doi.org/10.1109/proc.1981.12184>
13. Marple Jr. S. L. (1987) *Digital Spectral Analysis: with Applications*. NJ, Prentice-Hall. 492.
14. Widrow B., Stearns S. (1985) *Adaptive Signal Processing*. NJ, Prentice-Hall. 474.
15. Pervenonok R. E., Sitsko A. L. (2021) Supply Method of Controlling Power Active Filter Based on Adaptive Filtrations *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, (2), 91–98 (in Russian).
16. Pervianenak R. E., Sitsko A. L. (2021) Phase Synchronization in the System of Supply Voltage Parameters Correction by the Adaptive Filtration Method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk =Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 66 (2), 212–219 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-212-219>
17. Panteleev S. V., Malashin A. N., Karkotsky D. V., Sukhodolov Yu. V. (2018) Synthesis of an Algorithm for Vector Pulse-Width Modulation in a Nine-Phase Active Voltage Rectifier. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 334–345 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-334-345>
18. Rolik Yu. A., Gornostay A. V. (2016) Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (3), 225–234 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2015-0-3-225-234>