

Р. Е. Первенёнок, А. Л. Сицко

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ В СИСТЕМЕ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Аннотация. Рассмотрена адаптивная фазовая автоподстройка частоты, которая позволяет улучшить стабильность синхронизации активного фильтра, добиться качественной компенсации высших гармонических составляющих тока, потребляемого автономными объектами. Следовательно, применение такого активного фильтра существенно улучшит качества электроэнергии и нормальное безаварийное функционирование оборудования в целом. Система управления с адаптивной фазовой автоподстройкой частот имеет достоинства, выражаемые в надежной и эффективной системе управления, дает возможность оперативно реагировать на динамические изменения нагрузки, что характерно для работы функционального оборудования автономных объектов. Система управления становится в более гибкой, надежной, эффективной и обеспечивает получение мгновенного значения тока компенсации по измеренным значениям кривой тока нагрузки. Вычисления возможно проводить в режиме реального времени. Алгоритмы LMS, NLMS, RLS рассмотрены в качестве настройки весовых коэффициентов адаптивной фазовой автоподстройки частоты в системе коррекции параметров питающего напряжения. На основе имитационного моделирования алгоритмов, проведенного в среде MATLAB, сделан сравнительный анализ их эффективности. Показано, что наивысшее качество подавления и минимальное время переходного процесса имеет алгоритм NLMS. Этот алгоритм работает в режиме реального времени и рекомендуется для применения в системе коррекции показателей питающего напряжения.

Ключевые слова: система автономного электроснабжения, автономный объект, система управления, устройство синхронизации, активный фильтр, адаптивная фазовая автоподстройка частоты

Для цитирования: Первенёнок, Р. Е. Фазовая синхронизация в системе коррекции параметров питающего напряжения методом адаптивной фильтрации / Р. Е. Первенёнок, А. Л. Сицко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, №2. – С. 212–219. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-212-219>

Roman E. Pervianenak, Alexander L. Sitsko

Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PHASE SYNCHRONIZATION IN THE SYSTEM OF SUPPLY VOLTAGE PARAMETERS CORRECTION BY THE ADAPTIVE FILTRATION METHOD

Abstract. An adaptive phase-locked loop is considered, which makes it possible to improve the stability of synchronous active filters, to achieve compensation for high-quality harmonic components of the current consumed by autonomous objects. Therefore, the use of such an active filter will improve the power quality and the normal trouble-free operation of the equipment in general. A control system with an adaptive phase-locked loop often has the advantages of a reliable and efficient control system. It makes it possible to quickly respond to dynamic changes in the load, which is typical for the operation of functional equipment of autonomous objects. The control system becomes more flexible, reliable, efficient and provides an instantaneous value of the compensation current from the measured values of the load current curve. Calculations can be carried out in real time. LMS, NLMS, RLS algorithms are considered as adjusting the weighted adaptive phase-locked loop in the system for correcting the supply voltage parameters. Based on the simulation of algorithms carried out in the MATLAB environment, a comparative analysis of their effectiveness is made. It is shown that the NLMS algorithm has the highest suppression quality and minimum transient time. The NLMS algorithm works in real time and is recommended for use in the supply voltage correction system.

Keywords: autonomous power supply system, autonomous object, control system, synchronization device, active filter, adaptive phase-locked loop

For citation: Pervianenak R. E., Sitsko A. L. 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*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 212–219 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-2-212-219>

Введение. Система автономного электроснабжения (САЭС) является неотъемлемой частью автономных объектов (АО). Ее задачей как функциональной системы АО является бесперебойное обеспечение потребителей электрической энергией с требуемым качеством во всех режимах работы.

В состав функционального оборудования АО входят электрические нагрузки (ЭН) с нелинейной вольтамперной характеристикой. Главная особенность таких ЭН – потребление несинусоидального тока. При сравнимых мощностях САЭС переменного тока и импульсной (нелинейной) нагрузки искажается форма синусоидального напряжения. Данные искажения оказывают отрицательное влияние на функциональное оборудование АО, что выражается в сокращении срока службы изоляции электрических машин и аппаратов электрооборудования, в снижении коэффициента мощности и электромагнитного момента на валу асинхронных двигателей и др. [1].

Современная силовая электроника позволяет создавать системы коррекции качества питающего напряжения на основе параллельных активных фильтров (АФ) [2]. Принцип действия АФ основан на анализе гармоник тока или напряжения нелинейной нагрузки и генерации в систему электроснабжения САЭС таких же гармоник тока или напряжения, но с противоположной фазой. При этом контроль показателей качества электрической энергии, измерение активной и реактивной мощности требуют синхронизации. Для синхронизации используется напряжение, которое может быть искажено из-за наличия гармоник, коммутационных помех и др.

Синхронизацию чаще всего выполняют по сигналу основной частоты прямой последовательности. Эту задачу решают, применяя фильтры низких частот [3, 4], фильтр Калмана [5], системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [6]. Однако эти подходы имеют ряд недостатков, не позволяющих их применять при дисбалансе нагрузки между фазами, гармонических искажений, вариации частоты.

Повышение эффективности устройства синхронизации в системе управления активно-го фильтра. В статье предлагается рассмотреть процесс адаптивной синхронизации в системе управления (СУ) АФ, который позволяет функционировать АФ в режиме реального времени при изменении характеристик нелинейной нагрузки.

В большинстве случаев устройство синхронизации (УС) находится вне замкнутого контура регулирования СУ АФ, и поэтому любой дестабилизирующий фактор, изменяющий напряжение САЭС, приводит к отклонению ее выходных характеристик. Если АОВ работает от промышленной сети «большой» мощности (минимальные искажения и стабильные параметры сети), то в этом случае можно получить устойчивый неискаженный сигнал синхронизации. Однако в случае сети «малой» мощности, которой в большинстве практических случаев является САЭС АОВ, получение неискаженного сигнала синхронизации является достаточно сложной задачей, так как такой сигнал должен точно совпадать по фазе с первой гармоникой напряжения САЭС.

Первые устройства синхронизации строились по разомкнутому принципу и представляли собой последовательное включение, например, апериодического фильтра первого порядка и релейного элемента с симметричными относительно нулевого уровня порогами переключения [7]. Главным недостатком подобных УС является то, что в них заданный угол синхронизации существенно меняется при отклонении амплитуды и частоты напряжения сети [8], что неизбежно приводит к аварийным ситуациям и сбоям в работе не только силовых АФ, но и в целом оборудования АО.

Применение полосовых фильтров, которые выделяют полезную составляющую частоты напряжения сети без фазового сдвига, может быть эффективно при работе АФ в сети «малой» мощности. Однако основным недостатком этих схем является генерирование ими неканонических гармоник, вызывающих проблемы гармонической неустойчивости [9]. Поэтому полосовые фильтры в системах управления АФ не используются. В связи с этим для улучшения качества сигнала синхронизации в САЭС предлагается воспользоваться ФАПЧ на основе адаптивной фильтрации (АФАПЧ). Составной частью адаптивного фильтра, которая отвечает за изменение его параметров, является применяемый алгоритм адаптации.

Существует множество алгоритмов, различающихся быстротой сходимостью и вычислительной сложностью. Нами проведен сравнительный анализ трех алгоритмов: LMS, NLMS, RLS. В качестве критериев сравнения были выбраны коэффициент подавления помехи, скорость сходимости к установившемуся режиму и вычислительная сложность [11].

Принцип действия АФАПЧ состоит в подстройке тактовой частоты системы под частоту основной гармоники сети. При этом такой подход основан на преобразованиях Парка–Горева и Кларка, часто используемых для управления компенсаторами реактивной мощности [10].

Преобразования Парка–Горева и Кларка лежат в основе теории «мгновенной мощности», которая обосновывает возможность использования системы ФАПЧ вместо отдельной системы синхронизации [10]. Однако при наличии высших гармоник и шумов в сигналах токов и напряжений требуется, чтобы преобразования Парка–Горева были синхронизированы как по фазе, так и по частоте с фазными напряжениями сети.

Математическая модель АФАПЧ. Известно, что система ФАПЧ состоит из следующих элементов: фазового детектора (ФД), фильтра низких частот (ФНЧ) и управляемого генератора (УГ). Структура ФАПЧ представлена на рис. 1. На ФД поступают входные сигналы и сигналы с выхода УГ. ФД сравнивает фазы сигнала измерительной системы САЭС и УГ, и на его выходе формируется сигнал ошибки.

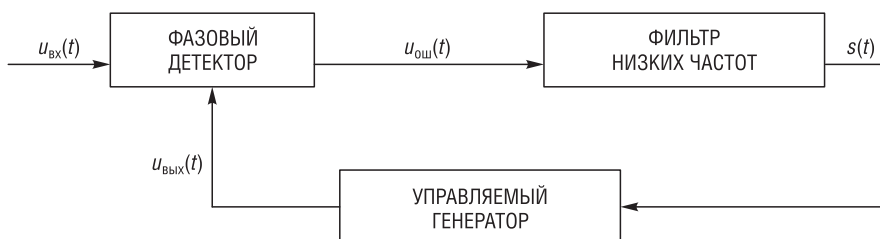


Рис. 1. Структурная схема системы фазовой автоподстройки частоты: $u_{вх}(t)$ – входной сигнал; $u_{вых}(t)$ – выходной сигнал управляемого генератора; $u_{ош}(t)$ – сигнал, пропорциональный разности фаз сигнала $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$; $s(t)$ – выходной сигнал фильтра низких частот, предназначенный для управления частотой управляемого генератора

Fig. 1. Block diagram of the phase-locked loop system: $u_{вх}(t)$ – input signal; $u_{вых}(t)$ – output signal of the controlled generator; $u_{ош}(t)$ – signal proportional to the phase difference of the signal $u_{вх}(t)$ and $u_{вых}(t)$; $s(t)$ – the output signal of the low-pass filter, designed to control the frequency of the controlled generator

Для повышения эффективности работы системы ФАПЧ в условиях нестационарности входных воздействий предложена система АФАПЧ [13], в которой ФД синтезирован на основе алгоритма адаптивной фильтрации. Для повышения качества регулирования схемы, уменьшения ошибки регулирования и времени переходного процесса вместо ФНЧ использован пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор).

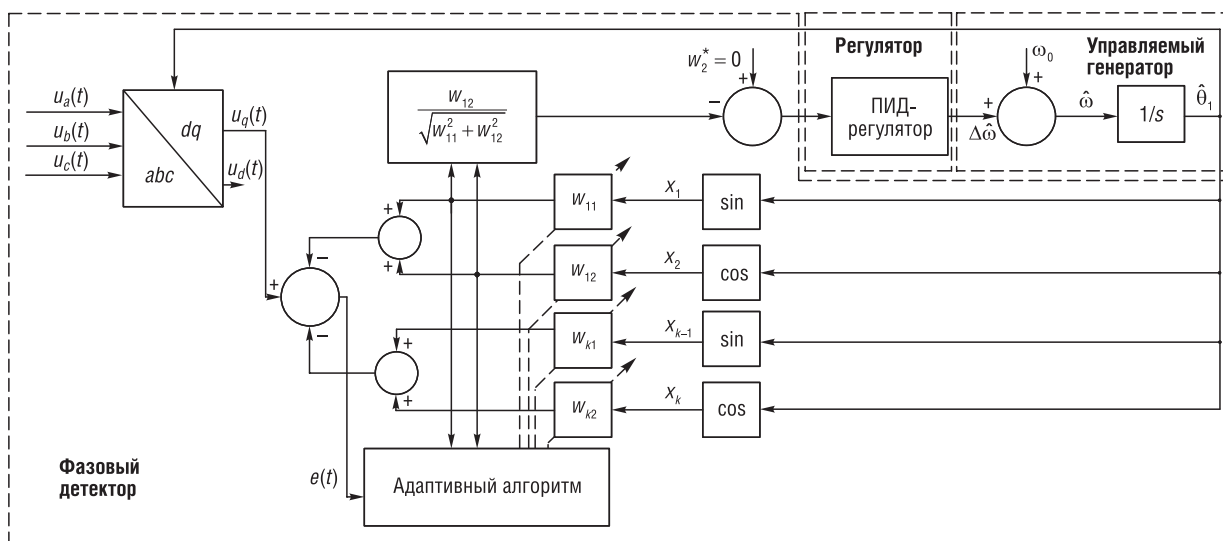


Рис. 2. Схема системы адаптивной фазовой автоподстройки частоты

Fig. 2. Diagram of the adaptive phase-locked loop

Рассмотрим процедуру синтеза системы АФАПЧ с алгоритмами LMS, NLMS, RLS, которая заключается в нахождении коэффициентов вектора весов, минимизирующего фазового сигнала рассогласования между сигналами на входе ФД и сигналами на выходе УГ [13].

После преобразования Парка–Горева и Кларка сигнал напряжения сети можно представить в виде ряда Фурье:

$$U_q(t) = U_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N U_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n), \quad (1)$$

где $U_q(t)$ – напряжение на входе ФД; U_1 и U_n – амплитуда первой и n -й гармоники соответственно; φ_1 и φ_n – начальная фаза первой и n -й гармоники соответственно; ω_0 – угловая частота сети; N – количество гармоник.

Фазовый угол первой гармоники φ_1 напряжения сети определяется по формуле

$$\varphi_1 = \theta_1 + \Delta\theta_1, \quad (2)$$

где θ_1 и $\Delta\theta_1$ представляют оцененный фазовый угол напряжения основной гармоники напряжения и ошибку оценивания соответственно.

Тогда гармонический компонент n -го порядка можно представить следующим образом:

$$n\omega_0 t + \varphi_n = n(\omega_0 t + \theta_1) + \varphi_n - n\theta_1 = n(\omega_0 t + \theta_1) + n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1). \quad (3)$$

Подставив выражение (2) и (3) в выражение (1), получаем:

$$U_q(t) = U_1 \cos(\Delta\theta_1) \sin(\omega_0 t + \theta_1) + U_1 \sin(\Delta\theta_1) \cos(\omega_0 t + \theta_1) + \sum_{n=2}^N \left\{ U_n [\cos(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1)) \sin(n(\omega_0 t + \theta_1))] + \right. \\ \left. + \sin(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1)) \cos(n(\omega_0 t + \theta_1)) \right\}. \quad (4)$$

Напряжение $U_q(t)$ (4) представим в виде произведения двух векторов: вектора тригонометрических функций X и вектора весов W :

$$W = [U_1 \cos(\Delta\theta_1), U_1 \sin(\Delta\theta_1), \dots, U_n \cos(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1)), U_n \sin(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1))]^T; \quad (5)$$

$$X = [\sin(\omega_0 t + \theta_1), \cos(\omega_0 t + \theta_1), \dots, \sin[n(\omega_0 t + \theta_1)], \cos[n(\omega_0 t + \theta_1)]]^T. \quad (6)$$

Тогда уравнение (4) примет следующий вид:

$$U_q = W^T X, \quad (7)$$

где U_q – оценка выходного напряжения.

Обозначим составляющие вектора весов $w_{11} = U_1 \cos(\Delta\theta_1)$, $w_{12} = U_1 \sin(\Delta\theta_1), \dots$, $w_{k1} = U_n \cos(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1))$, $w_{k2} = U_n \sin(n\Delta\theta_1 + (\varphi_n - n\varphi_1))$, тогда

$$W = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{n1}, w_{n2}]^T. \quad (8)$$

Пусть W_k обозначает вектор весовых коэффициентов системы АФАПЧ на k -м шаге, а W_{k+1} – вектор весовых коэффициентов на $(k+1)$ -шаге. Тогда размер шага весовых коэффициентов

$$\delta W_{k+1} = W_{k+1} - W_k. \quad (9)$$

Для каждой пары (X, U_q) существует по крайней мере один вектор весовых коэффициентов W_{k+1} такой, что выполняется следующее условие:

$$U_{qk} = W_{k+1}^+ X_k, \quad (10)$$

где W_{k+1}^+ – эрмитово сопряженная матрица.

Ошибка оценки алгоритмов формулируется в соответствии с выражением

$$e_k = U_{qk} - \hat{W}_k^+ X_k. \quad (11)$$

Особенности вычислительных процедур алгоритмов [13, 15] LMS, NLMS и RLS и их вычислительная сложность сведены в таблицу.

Характеристики адаптивных алгоритмов
Characteristics of adaptive algorithms

Алгоритм	Вычислительная процедура (k – число итераций)	Вычислительная сложность
Наименьших средних квадратов (LMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \eta e_k X_k$	2N сложений, 2N умножений
Нормализованный средних квадратов (NLMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \frac{\eta}{\delta^2 + X_k^+ X_k} X_k e_k$	3N сложений, 3N умножений, деление
Рекурсивный наименьших квадратов (RLS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + g_k e_k$ $g_k = \frac{R_k^{-1} X_k}{\lambda + R_k^{-1} X_k^+ X_k}$ $R_{k+1}^{-1} = \lambda^{-1} [R_k^{-1} - g_k X_k^+ R_k^{-1}]$	$2N^2 + 3N$ сложений, $3N^2 + 3N$ умножений, деление

Примечание: 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.

Входной сигнала для ПИД-регулятора АФАПЧ принимает значение

$$U_{\text{вх ПИД}} = \frac{w_{12}}{\sqrt{w_{11}^2 + w_{12}^2}} = \frac{U_1 \sin(\Delta\theta_1)}{\sqrt{U_1^2 \sin^2(\Delta\theta_1) + U_1^2 \cos^2(\Delta\theta_1)}} = \sin(\Delta\theta_1). \quad (11)$$

Исследование модели системы АФАПЧ. Для моделирования работы адаптивных алгоритмов в АФАПЧ был использован программный комплекс MATLAB [14].

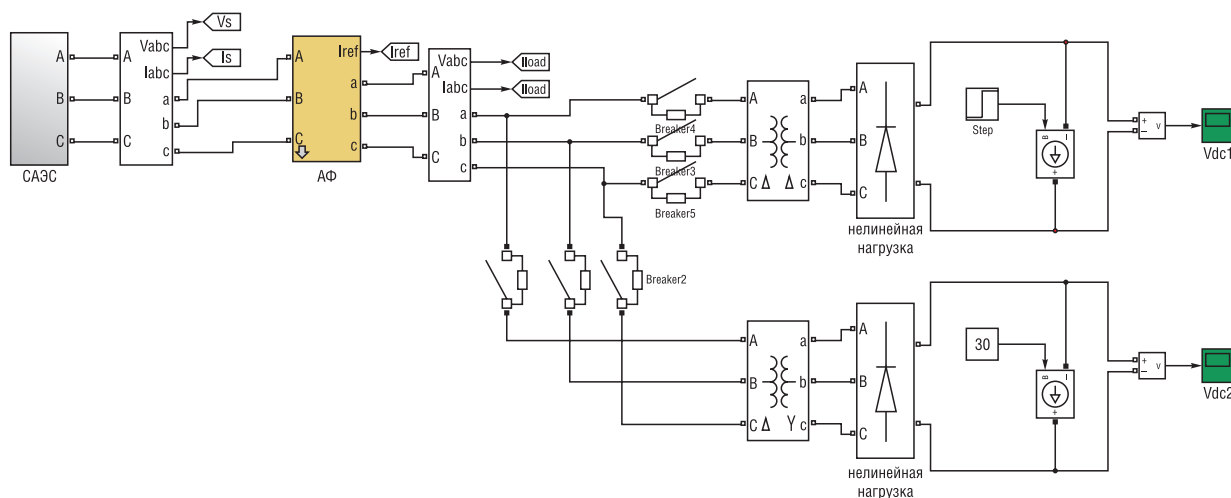


Рис. 3. Имитационная модель активного фильтра с нелинейной нагрузкой
Fig. 3. Simulation model of an active filter with a non-linear load

Моделирование выполнено при следующих условиях:

- 1) При подключении нелинейной нагрузки в промежутке времени 0,1–0,8 с происходит провал напряжения в 20 В (рис. 4).
- 2) Число весовых коэффициентов 32, шаг сходимости LMS-алгоритма $\eta = 0,1$, NLMS-алгоритма $\eta = 0,35$; коэффициент забывания в RLS-алгоритме $\lambda = 1$, начальные значения векторов нулевые [11].

3) Коэффициенты ПИД-регулятора K_p , K_i , K_d равны значениям 300, 10000 и 1 соответственно.

Как видно из рис. 5, RLS-алгоритм и LMS-алгоритм будут сходиться после 100-й итерации, NLMS-алгоритм сходится на 60-й итерации.

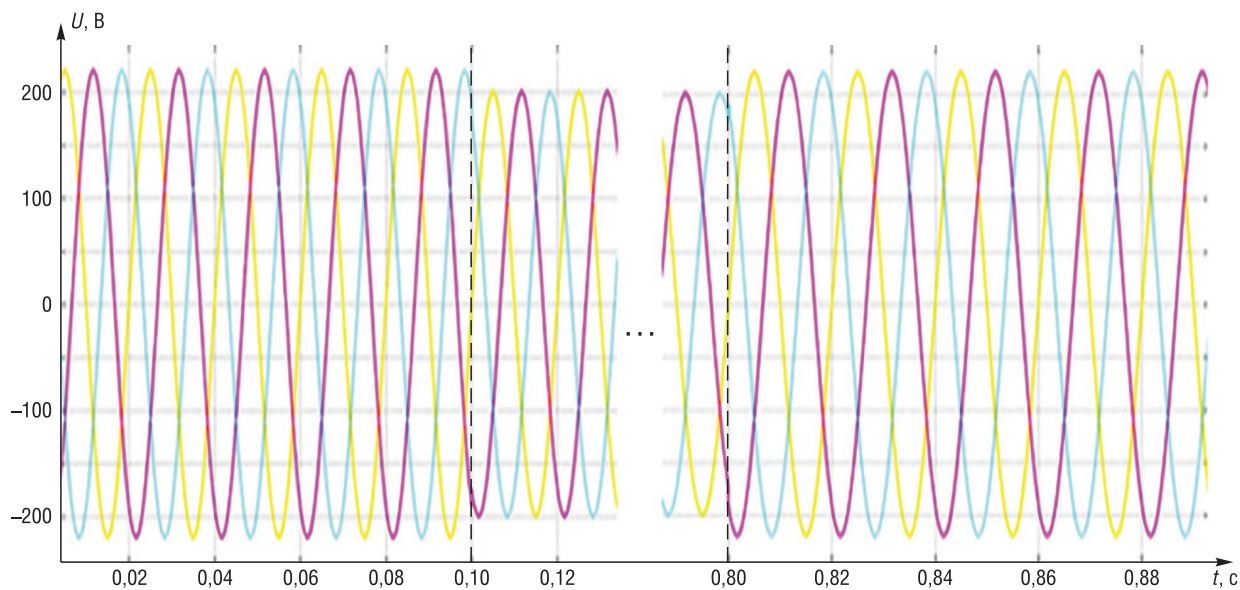


Рис. 4. График изменения напряжения при подключении нелинейной нагрузки
 Fig. 4. The graph of voltage changes when connecting a non-linear load

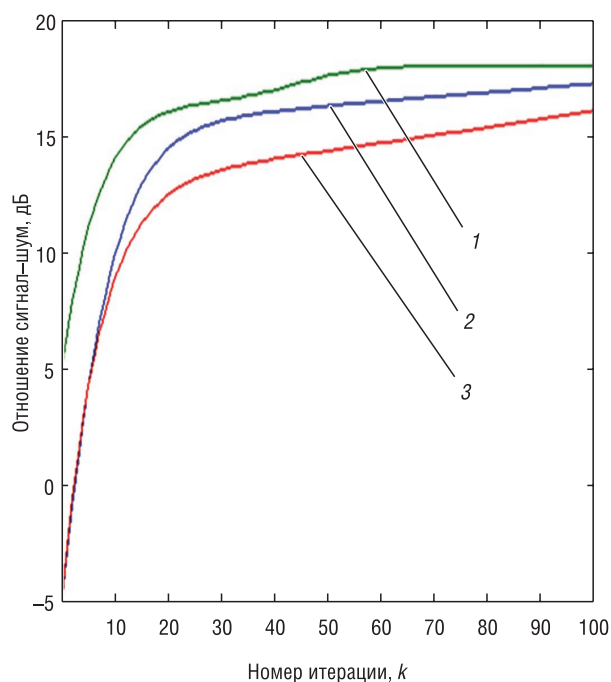


Рис. 5. Зависимость сигнал-шум от номера итерации:
 1 – NLMS, 2 – LMS, 3 – RLS
 Fig. 5. Signal-to-noise versus iteration number: 1 – NLMS, 2 – LMS, 3 – RLS

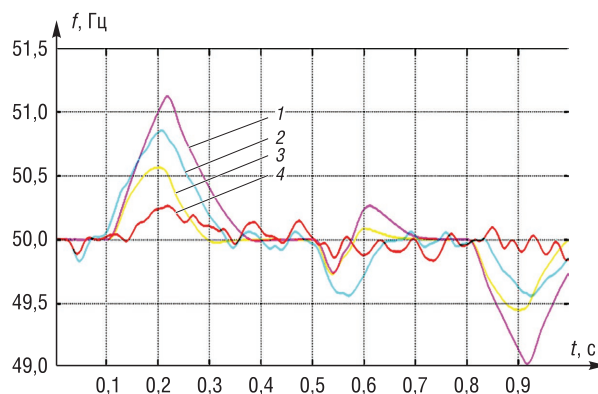


Рис. 6. График изменения частоты сети от времени:
 1 – изменение частоты сети; 2 – изменение частоты фазовой автоподстройки частоты на основе адаптивной фильтрации с RLS; 3 – изменение частоты фазовой автоподстройки частоты на основе адаптивной фильтрации с LMS; 4 – изменение частоты фазовой автоподстройки частоты на основе адаптивной фильтрации с NLMS
 Fig. 6. Schedule of network frequency change from time to time: 1 – network frequency change; 2 – changing the frequency of the phase-locked loop based on adaptive filtering with RLS; 3 – changing the frequency of the phase-locked loop based on adaptive filtering with LMS; 4 – changing the frequency of the phase-locked loop based on adaptive filtering with NLMS

Из рис. 6 видно, что при изменении частоты сети относительно $f = 50$ Гц в диапазоне $\pm 1,2$ Гц соответствующие изменения соответствуют в АФАПЧ с RLS $\pm 0,9$ Гц, в АФАПЧ с LMS $\pm 0,6$ Гц, в АФАПЧ с NLMS $\pm 0,2$ Гц. Изменение частоты в АФАПЧ с NLMS имеет наименьшее значение, что соответствует ГОСТ 32144–2013.

Заклучение. На основе имитационного моделирования алгоритмов адаптации LMS, NLMS и RLS в среде MATLAB сделан сравнительный анализ их эффективности. Показано, что наивысшее качество подавления и лучшую сходимость имеет алгоритм NLMS. Данный алгоритм имеет промежуточную вычислительную сложность (между LMS и RLS), работает в режиме реального времени, поэтому может быть рекомендован для коррекции показателей питающего напряжения.

Список использованных источников

1. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
2. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника / Г. С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 667 с.
3. Grid Synchronization Method Based on a Quasi-Ideal Low-Pass Filter Stage and a Phase-Locked Loop / E. Robles [et al.] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jun. 15–19, 2008, Rhodes, Greece, p. 4056–4061. <https://doi.org/10.1109/pesc.2008.4592588>
4. Hsieh, G. Phase-Locked Techniques – A Survey / G. Hsieh, J. Hung // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 1996. – Vol 43, №6. – P. 609–615. <https://doi.org/10.1109/41.544547>
5. Design and Operation of a Phase-Locked Loop with Kalman Estimator-Based Filter for Single-Phase Applications / K. Brabandere [et al.] // IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, p. 525–530. <https://doi.org/10.1109/iecon.2006.348099>
6. Jovcic, J. Phase Locked Loop System for FACTS / J. Jovcic // IEEE Transaction on Power Systems. – 2003. – Vol. 18, №3. – P. 1116–1124. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.814885>
7. 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.
8. 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. <https://doi.org/10.1109/28.567077>
9. Chung, S.-K. Phase-locked loop for grid connected three-phase power conversion systems / S.-K. Chung. // IEEE Proceeding Electric Power Application. – 2000. – Vol. 147, iss. 3. – P. 213–219. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000328>
10. Чижима, С. Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / С. Н. Чижима. – Новосибирск, 2014. – 367 л.
11. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В. И. Джиган. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
12. Akagi, H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, 1983. – P. 1375–1386.
13. Han, Y. A novel harmonic-free power factor corrector based on T-type APF with adaptive linear neural network (ADALINE) control / Y. Han, M. M. Khan, C. Chen // Simulation Modeling Practice & Theory. – 2008. – Vol. 16, №9. – P. 1215–1238. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.06.002>
14. Дьяконов, В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
15. Бычков, Б. И. Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью / Б. И. Бычков, А. С. Романовский, В. Я. Хартонов // Радиооптика. – 2016. – №5. – С. 11–25.

References

1. Zhezhenko I. V., Shidlovskii A. K., Pivnyak G. G., Saenko Yu. L., Noiberger N. A. *Electromagnetic Compatibility of Consumers*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 351 p. (in Russian).
2. Zinov'ev G. S. *Power Electronics*. 5th ed., rev. and add. Moscow, Jurajt Publ., 2012. 667 p. (in Russian).
3. Robles E., Ceballos S., Pou J., Zaragoza J., Gabiola I. Grid Synchronization Method Based on a Quasi-Ideal Low-Pass Filter Stage and a Phase-Locked Loop. *IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jun. 15–19, 2008, Rhodes, Greece*, pp. 4056–4061. <https://doi.org/10.1109/pesc.2008.4592588>
4. Hsieh G., Hung J. Phase-Locked Techniques – A Survey. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 609–615. <https://doi.org/10.1109/41.544547>
5. Brabandere K., Loix T., Engelen K., Bolsens B., Van den Keybus J., Driesen J., Belmans R. Design and Operation of a Phase-Locked Loop with Kalman Estimator-Based Filter for Single-Phase Applications. *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 525–530. <https://doi.org/10.1109/iecon.2006.348099>
6. Jovcic J. Phase Locked Loop System for FACTS. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 1116–1124. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.814885>
7. Borisov P. A., Poljakov N. A. Synchronization of three-phase active voltage rectifiers with the mains. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 4 (80), p. 55–60 (in Russian).
8. 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. <https://doi.org/10.1109/28.567077>

9. Chung, S.-K. Phase-locked loop for grid connected three-phase power conversion systems. *IEEE Proceeding Electric Power Application*, 2000, vol. 147, iss. 3, pp. 213–219. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000328>
10. Chizhima S.N. *Improvement of Methods and Means of Quality Control of Electricity and Power Components in Electric Power Systems with Traction Load*. Novosibirsk, 2014. 367 p. (in Russian).
11. Dzhigan V.I. *Adaptive Signal Filtering: Theory and Algorithms*. Moscow, Tehnosfera Publ., 2013. 528 p. (in Russian).
12. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. *IPEC'83 – International Power Electronics Conference*. Tokyo, 1983, pp. 1375–1386.
13. Han Y., Khan M. M., Chen C. A novel harmonic-free power factor corrector based on T-type APF with adaptive linear neural network (ADALINE) control. *Simulation Modeling Practice & Theory*, 2008, vol. 16, iss. 9, pp. 1215–1238. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.06.002>
14. D'yakonov V. *MATLAB. Signal and Image Processing*. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p. (in Russian).
15. Bychkov B. I., Romanovskii A. S., Hartonov V. Ja. Synchronization of three-phase active voltage rectifiers with the mains. *Radiooptika [Radio Optics]*, 2016, no. 5, pp. 11–25 (in Russian).

Информация об авторах

Первенёнок Роман Евгеньевич – магистр технических наук, адъюнкт кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ronnn.08@mail.ru

Сицко Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Roman E. Pervenyonok – Master of Engineering, Adjunct of the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ronnn.08@mail.ru

Alexander L. Sitsko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).