

УДК 620.9+004.9

С.Г. Черный, А.А. Жиленков

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭКСПЕРТНЫХ ПОДСИСТЕМ В СОСТАВЕ УСТРОЙСТВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

S.G. Cherny, A.A. Zhilenkov

IDENTIFICATION OF EXTERNAL PARAMETERS FOR THE EXPERT SUBSYSTEMS IN THE COMPOSITION OF THE SHIPBOARD OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Одной из важнейших задач для фильтро-компенсирующих устройств является точное определение изменяющихся гармонических составляющих несинусоидального сигнала. Именно это позволяет силовой части фильтра компенсировать соответствующие гармоники. В автономных электроэнергетических системах, работающих на мощную полупроводниковую нагрузку, формы сетевых токов и напряжений существенно искажены, а генераторные установки генерируют напряжение с непостоянной частотой, фазой и амплитудой. Что делает определение гармонического состава искаженных сигналов нетривиальной задачей.

МОЩНОСТЬ; НАГРУЗКА; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ; ИДЕНТИФИКАЦИЯ; ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ.

One of the most important tasks for the filter-compensation devices is an accurate determination of changing harmonic components of a non-sinusoidal signal. It helps the power component of the filter compensate the appropriate harmonics. The form of the network currents and voltages in the autonomous electric energetic systems operating with powerful semiconductor load are rather distorted and generator sets generate voltage with non-constant frequency, phase and amplitude. Thus, the calculation of the harmonic composition of the distorted signals proves to be a sophisticated problem.

POWER LOAD; INTELLIGENT SYSTEMS; IDENTIFICATION; OPTIMAL CONTROL.

Современные судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) характеризуются наличием в своем составе большого количества преобразовательной нагрузки, включающей преобразователи частоты, источники бесперебойного питания, инверторы, выпрямители и другие потребители, отличающиеся нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Так, на современных судах широко используются системы электродвижения на основе гребных электрических установок (ГЭУ), которые для наиболее эффективного использования системы получают питание от единой СЭЭС, обеспечивающей энергией все общесудовые потребители. Питание таких пропульсивных установок осуществляется через полупроводниковые

преобразователи, негативно воздействующие на питающую сеть переменного тока путем генерации в нее высших гармонических составляющих токов и напряжений, значения которых превышают допустимые нормативной документацией [5].

Высшие гармонические составляющие тока и напряжения, обуславливающие потребляемую от станции мощность искажений, наряду с реактивной мощностью, увеличивают вероятность возникновения резонансных явлений в СЭЭС, нарушают работу микропроцессорной техники, устройств защиты и автоматики, вызывают ускоренное старение изоляции основного электрооборудования. То есть снижают надежность электроснабжения и работу самих потребителей автономного объекта. В свя-



зи с этим все большее внимание уделяется вопросам разработки способов и средств устранения негативного влияния высших гармоник токов и напряжений: вопросам создания автоматических систем управления процессами генерирования, передачи и распределения электрической энергии, позволяющим обеспечить требуемое качество электроэнергии, устранение взаимного влияния параллельно работающего оборудования со стороны питающей сети и т. п.

Экспериментальные исследования [1–4], проведенные на автопароме «Ейск» Керченской государственной компании «Керченская паромная переправа», показали необходимость применения на судне активных фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), а также модернизации систем автоматического регулирования дизель-генераторных агрегатов (САР ДГА) судна для компенсации неактивной мощности, генерируемой в СЭЭС. На пароме установлена ГЭУ постоянного тока, питающаяся от единой СЭЭС переменного тока через тиристорные преобразователи, которые являются основной нагрузкой сети. СЭЭС автопарома характеризуется как нестабильная, склонная к резонансным явлениям, качанию мощности, срыву работы систем автоматики и т. п. негативным явлениям, обусловленным значительным искажением форм токов и напряжений сети. В связи с характерными особенностями СЭЭС, применение многих хорошо зарекомендовавших себя на береговых предприятиях устройств компенсации неактивной мощности в виде пассивных резонансных фильтров, активных фильтров и т. п., является малоэффективным. В первую очередь это связано с ограниченностью мощности источников энергии СЭЭС и нестабильностью параметров электроэнергии, генерируемой ими.

В результате обширных исследований рассмотренного комплекса проблем предложен ряд инженерных решений [6–8], направленных на повышение показателей качества электроэнергии в автономных СЭЭС, основной нагрузкой которых являются полупроводниковые преобразователи, питающие мощные электроприводы, заряд-

ные устройства и т. п. судовые потребители электроэнергии. Необходимым функциональным узлом предложенных разработок, определяющим их эффективность в частности и работоспособность в общем, является устройство идентификации внешних параметров системы управления. Основная функция блока – выделение из искаженного сигнала необходимых для его анализа гармонических составляющих, определение их параметров, и использование результатов этого анализа в управлении средствами повышения значений показателей качества электроэнергии СЭЭС. При этом регулируются такие показатели, как уровни целевых гармоник токов и напряжений, значения суммарных гармонических искажений, показателей мощности искажений, реактивной мощности и т. д.

Формулирование целей. Наиболее важной задачей для ФКУ является точное определение изменяющихся гармонических составляющих несинусоидального сигнала: их величины и фазового угла. Именно это позволяет силовой части фильтра компенсировать соответствующие гармоники. Помимо быстрого преобразования Фурье (БПФ), в настоящее время активно применяются методы на основе фильтра Калмана, а также системы управления на основе искусственных нейронных сетей. Однако каждый из этих методов имеет в той или иной степени один недостаток: время адаптации к изменениям в анализируемом сигнале. В наилучшем случае, при неизменной частоте тока питающей сети и резком изменении его гармонического состава, системе управления необходимо время не менее одного периода напряжения сети. Изменение же частоты питающей сети, низкочастотные колебания (характерные для дисбаланса в трехфазной сети без нулевого провода), мощные помехи приводят, как правило, к катастрофическим последствиям. Это связано с тем, что при анализе сигнала в частотной области, изменение частоты основной гармоники на 0,4 Гц приводит к ошибке в определении амплитуды пятой гармоники более 10 %. Чтобы избавиться от этой ошибки, необходимо определять частоту основной гармоники. Для этого ис-

пользуют метод, отслеживающий частоту сигнала по его прохождению через ноль. Но даже в четырехпроводной сети этот алгоритм требует времени не менее трех периодов основной гармоники. Учитывая отсутствие в СЭЭС нулевого провода (и, как следствие, неизвестность фазных напряжений сети), искаженность линейных напряжений, а также прочих дестабилизирующих факторов, существующие системы управления обладают длительным временем регулирования, либо в принципе дают критическую ошибку.

Таким образом, при всем разнообразии существующих способов выделения гармоник мощности искажения, актуальнейшей задачей остается реализация быстрого и точного алгоритма идентификации недоступных для измерения сигналов и параметров сложной распределенной системы.

Идентификация нестационарной основной гармоники искаженного сигнала. В общей форме входной сигнал $v(t)$ системы идентификации, являющийся сигналом, пропорциональным сетевому току или напряжению СЭЭС, может быть описан функцией-рядом Фурье:

$$\hat{v}(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin(k\omega_k(t)t + \varphi_k(t)), \quad (1)$$

где $A_k(t)$ – амплитуда; $\omega_k(t)$ – частота и $\varphi_k(t)$ – фазовый угол k -й гармоники; N – количество гармоник (в общем случае $N = \infty$).

Так как в настоящей статье рассмотрено решение задачи идентификации нестационарных параметров основной гармоники входного сигнала, то искомая функция будет иметь вид

$$y(t) = A(t) \sin(\omega(t)t + \varphi(t)), \quad (2)$$

где $A(t) = A_1(t)$ – амплитуда; $\omega(t) = \omega_1(t)$ – частота и $\varphi(t) = \varphi_1(t)$ – фазовый угол искомой функции.

Введем вектор параметров $\phi(t) = [A(t), \omega(t), \varphi(t)]^T$, который принадлежит пространству параметров $\Phi(t) = \{[A, \omega, \varphi]^T\}$.

Ошибка аппроксимации характеризуется выражением

$$\varepsilon_n = y_n - \hat{v}_n. \quad (3)$$

Энергетическая функция ошибки, выражаемая среднеквадратичной погрешностью:

$$E_n = \frac{1}{2} \varepsilon_n^2. \quad (4)$$

Функция (4) является функцией трех переменных $E(A, \omega, \varphi)$ или $E(\Phi)$. Задачей аппроксимации является поиск такого алгоритма изменения элементов вектора Φ , при котором происходит минимизация функции (4). То есть поиск такого значения $\hat{\Phi}$ вектора Φ , которому соответствует экстремальное значение функции E (минимум), когда будет выполняться условие

$$E(\phi) \geq E(\hat{\phi}); \forall E \in \Phi, \quad (5)$$

где Φ – допустимая область или область возможных значений вектора ϕ , определяемая ограничениями

$$A \in [A_{\min}, A_{\max}], \quad \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (*)$$

$$\text{и } \varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}].$$

На данном этапе мы подошли к задаче поиска экстремума (минимума) энергетической функции (4). Функция является дифференцируемой по всем элементам, но выражение (2) предполагает нелинейное преобразование элементов входного вектора Φ . Последнее обстоятельство ставит под вопрос возможность применения градиентных алгоритмов, наиболее зарекомендовавших себя в экстремальных системах.

При использовании метода градиента, вектор параметров ϕ вычисляется методом градиентного спуска по правилу (6). Задаваясь некоторым ϕ , для данной точки вычисляются градиент энергетической функции (4). Затем каждый компонент вектора ϕ изменяют со скоростью, пропорциональной составляющей градиента (6) по этому компоненту:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = -\mu \text{grad}_{\phi(t)} E(\phi), \quad (6)$$

где $\text{grad}_{\phi(t)} E(\Phi) = \frac{\partial [E(t, \phi(t))]}{\partial \phi(t)}$; μ – диагональная матрица постоянных коэффициентов скорости аппроксимации, которые при поиске минимума должны удовлетворять условию $\mu_i > 0$.

При использовании метода наискорейшего спуска градиент измеряется непрерывно в процессе изменения ϕ , так что в каждый момент скорость изменения вектора ϕ пропорциональна градиенту. В экстремальной точке $\hat{\phi}$ все компоненты вектора градиента обращаются в нуль. Метод градиентного спуска гарантирует достижение экстремума при квадратичной форме энергетической функции. Для неквадратичных функций (каковой является и рассматриваемая в настоящей статье энергетическая функция) необходимо математически доказывать сходимость метода к точке экстремума.

Для нахождения экстремума функций, не являющихся квадратичными, используют методы сопряженных градиентов. Существенным недостатком данных методов является их чувствительность к погрешностям счета. Для обеспечения сходимости при этом применяется периодический рестарт алгоритма, метод Флетчера–Ривса, который при неквадратичности целевой функции из конечного становится итеративным, либо метод Полака–Рибьера с различными модификациями, направленными на гарантирование сходимости. Перечисленные методы итеративны, т. е. не обеспечивают гарантированной сходимости за конечное

число шагов и требуют значительной вычислительной мощности при практической реализации (особенно, когда необходимо выделять несколько гармонических составляющих). На рис. 1 приведены результаты моделирования на коротком интервале при использовании градиентного метода в поставленной задаче. На рис. 2 приведены результаты моделирования при использовании градиентного метода в поставленной задаче на большом интервале. Анализ результатов применения распространенных модификаций градиентных методов при решении поставленной задачи, аналогично рис. 2 демонстрирует расхождение процесса.

Рассмотрим математические аспекты возможности применения градиентных методов в поставленной задаче. Выпишем градиенты для восстановленных параметров вектора ϕ :

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{A}(t)}{dt} &= -\mu_A \frac{\partial[E(t, \phi(t))]}{\partial\hat{A}(t)}; \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= -\mu_\omega \frac{\partial[E(t, \phi(t))]}{\partial\hat{\omega}(t)}; \\ \frac{d\hat{\phi}(t)}{dt} &= -\mu_\phi \frac{\partial[E(t, \phi(t))]}{\partial\hat{\phi}(t)}. \end{aligned} \quad (7)$$

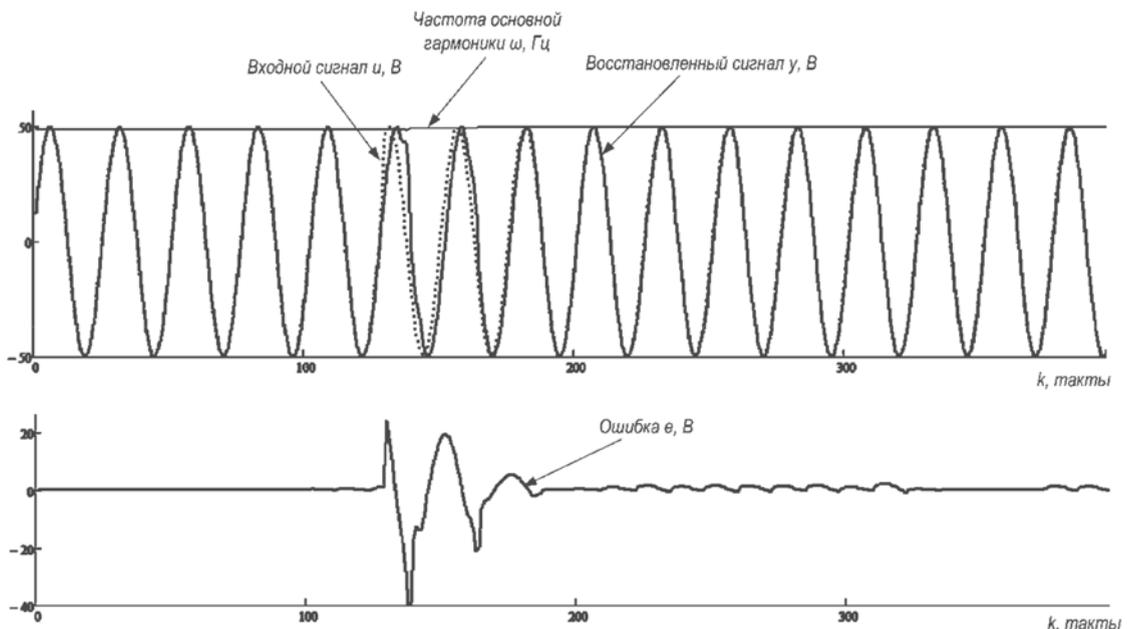


Рис. 1. Отслеживание основной гармоники $y(k)$ искаженного сигнала $v(k)$ с изменяющейся частотой $\omega(k)$ и ошибка слежения $\varepsilon(k)$

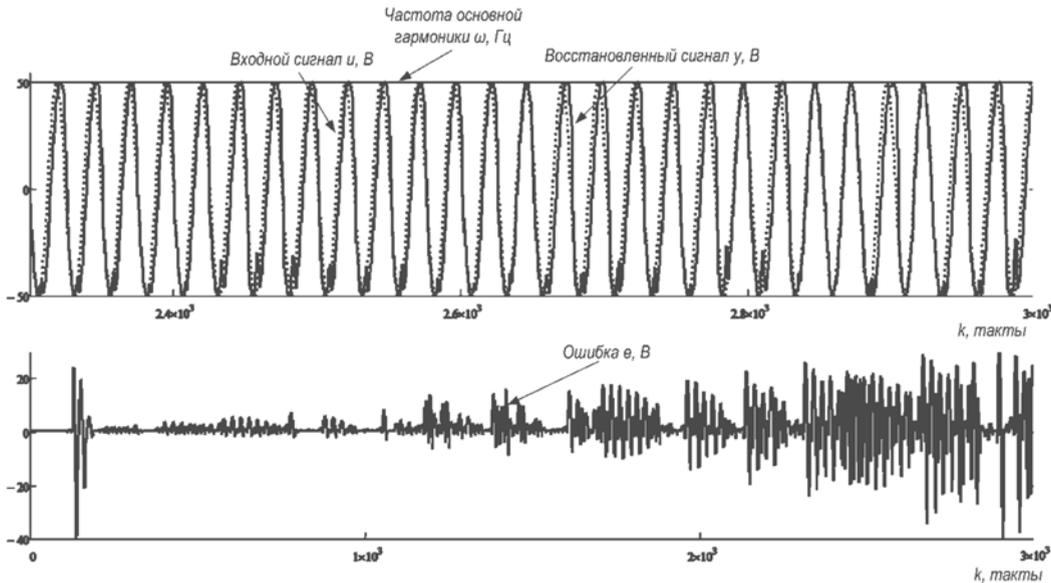


Рис. 2. Расхождение процесса отслеживания основной гармоники $y(k)$ искаженного сигнала $v(k)$ с изменяющейся частотой $\omega(k)$ на большом временном интервале

Энергетическую функцию представим как

$$E(t, \phi(t)) = \frac{1}{2} \varepsilon(t, \phi(t))^2 = \frac{1}{2} [v(t) - \hat{A}(t) \sin(\hat{\omega}(t)t + \hat{\phi}(t))]^2.$$

Подставив ее в (7) и продифференцировав правую часть, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{A}(t)}{dt} &= -\mu_A \varepsilon(t) \sin(\hat{\omega}(t)t + \hat{\phi}(t)); \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= -\mu_\omega \varepsilon(t) \hat{A}(t) t \cos(\hat{\omega}(t)t + \hat{\phi}(t)); \\ \frac{d\hat{\phi}(t)}{dt} &= -\mu_\phi \varepsilon(t) \hat{A}(t) \sin(\hat{\omega}(t)t + \hat{\phi}(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

Как видно, во втором уравнении системы (8) появляется параметр времени вне знака косинуса. Таким образом, для данной энергетической функции выражение градиента по угловой скорости содержит комбинированный, т. е. секулярный (вековой) и нелинейный одновременно, член. При применении методов Ньютона–Рафсона (или подобных), использующих гессиан, таких членов появится несколько.

Этот факт объясняет неудачи в попытках реализовать подобные алгоритмы на основании общих подходов адаптивных систем и градиентных методов в частно-

сти, практическая реализация которых, в описываемых применениях, сталкивается с расходимостью процесса при отслеживании изменения фазы и частоты сигнала. Результаты моделирования также показали, что сходимость градиентных алгоритмов в данном случае критически зависит от значений коэффициентов скорости аппроксимации μ , малейшее отклонение которых от оптимума приводит к немедленному расхождению процесса. Аналогично ведет себя алгоритм и при изменении параметров аппроксимируемого сигнала.

Решение поставленной задачи. Так как частота $\omega(t)$ и фазовый угол $\phi(t)$ искомой функции переменны, то перейдем к понятию полной фазы $\psi(t) = \omega(t)t + \phi(t)$, учитывающей все изменения фазы функции. Тогда систему (8) приведем к виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{A}(t)}{dt} &= -\mu_A \varepsilon(t) \sin \hat{\psi}(t); \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= -\mu_\omega \varepsilon(t) \hat{A}(t) t \cos \hat{\psi}(t); \\ \frac{d\hat{\psi}(t)}{dt} &= \hat{\omega}(t) + \mu_\psi \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (9)$$

Энергетическую функцию представим как $E(t) = \frac{1}{2} [u(t) - \hat{A}(t) \sin \hat{\psi}(t)]^2$, то есть

для ошибки аппроксимации будем иметь $\varepsilon(t) = u(t) - \hat{A}(t) \sin \hat{\psi}(t)$.

При этом входной сигнал системы можно представить как $v(t) = A(t) \sin \psi(t) + \zeta(t)$.

Идея решения задачи заключается в замене переменной времени на постоянный коэффициент α , а изменяющихся во времени параметров искомой функции – на постоянные величины. Аналогичный подход используется в теории гармонической линеаризации или стационаризации. В нашем случае замена опирается на предположение, что в данный момент времени входной сигнал содержит синусоидальную составляющую с постоянной угловой частотой ω_0 и дополнительными гармоническими составляющими. Причем в окрестности (*) не имеется резонансных частот, что очевидно исходя из формы выражения (1). Аналогично происходит замена начальной фазы искомой составляющей. И в конечном итоге полная фаза будет представлена выражением $\psi_0(t) = \omega_0 t + \varphi_0$. Таким образом, мы рассматриваем входной сигнал как сумму периодической функции с фиксированным периодом T_0 и дополнительных периодических составляющих (ξ), не имеющих частотных составляющих в данном периоде.

Опуская математические преобразования, система для отыскания параметров

восстанавливаемого сигнала принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{A}(t)}{dt} &= \alpha_A \varepsilon(t) \int_{t_0}^{t_0+T_0} \sin \hat{\psi}(t) dt; \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} &= \alpha_\omega \varepsilon(t) \hat{A}(t) \int_{t_0}^{t_0+T_0} \cos \hat{\psi}(t) dt; \\ \frac{d\hat{\psi}(t)}{dt} &= \hat{\omega}(t) + \alpha_\psi \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

Моделирование по предложенному алгоритму показало сходимость решения без каких-либо ограничений по интервалу моделирования. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Являясь компромиссом между скоростью сходимости и точностью, коэффициент α определяет основные свойства предложенного алгоритма в каждом конкретном применении. Из результатов моделирования видно, что при изменении частоты и начальной фазы отслеживаемого сигнала, ошибка превысила значение, полученное на рис. 1. Однако в установившемся режиме ошибка не превышает 0,01 %, что на несколько порядков превысило точность слежения, приведенную в результатах моделирования на рис. 2.

Очевидно, что дальнейшее развитие предложенного алгоритма может идти по пути реализации адаптивного подбора ко-

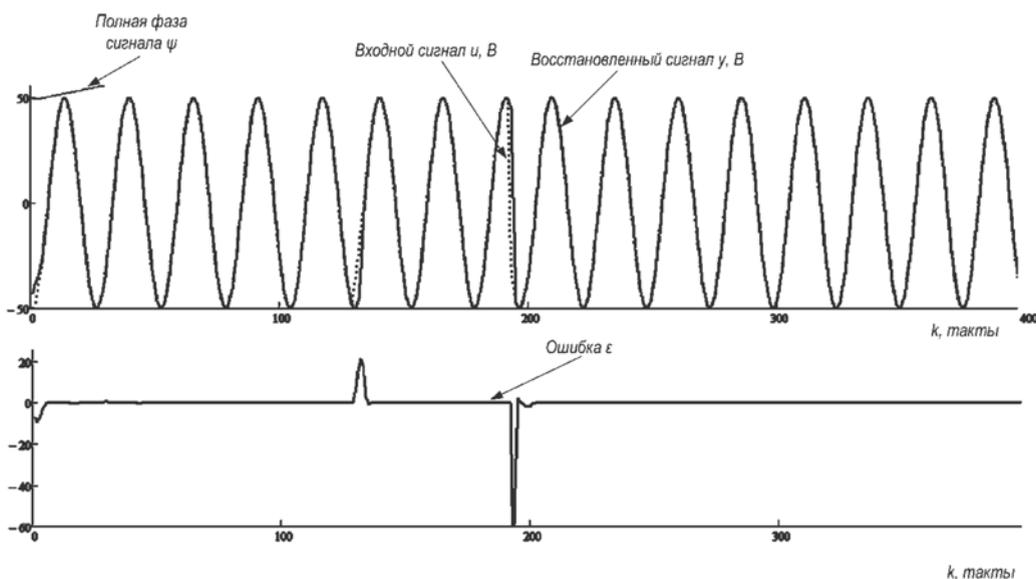


Рис. 3. Отслеживание основной гармоники $y(k)$ искаженного сигнала $v(k)$ с изменяющейся частотой $\omega(k)$ и ошибка слежения $\varepsilon(k)$ по предложенному алгоритму

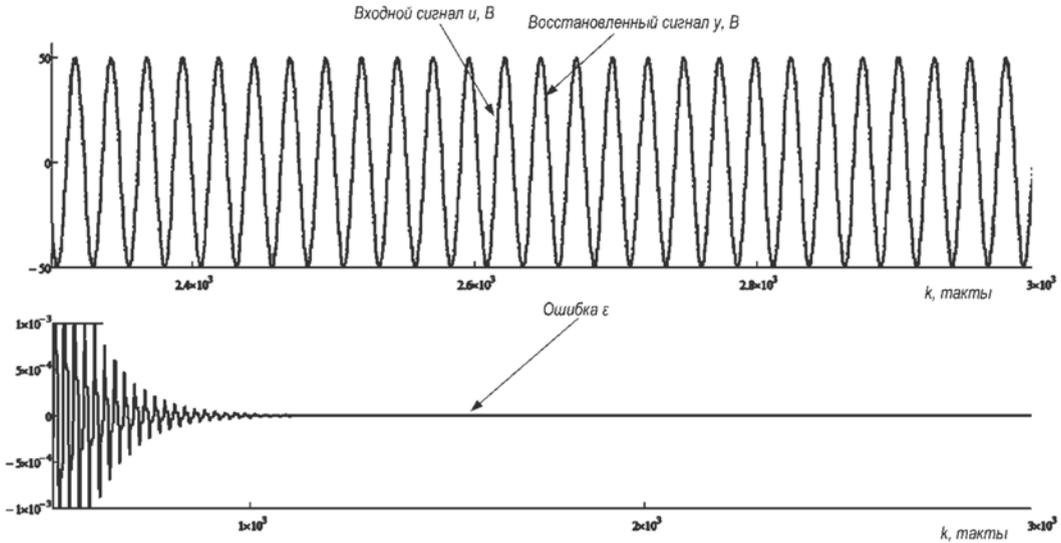


Рис. 4. Процесс отслеживания основной гармоники $u(k)$ искаженного сигнала $v(k)$ на большом временном интервале

эффицентом α в зависимости от текущего значения ошибки ϵ . Это позволит уменьшить ошибку в переходных процессах, не ухудшив показателей качества системы в установившихся.

Математически сходимость, стабильность и уникальность решения предложенного алгоритма может быть доказана с использованием теоремы карт Пуанкаре или доказательств, применяемых при использовании методов гармонической линеаризации, например, метода Крылова—

Боголюбова. Проведенные исследования показали, что система (10) представляет уникальную асимптотическую траекторию, периодическую и лежащую в окрестности аппроксимируемой функции основной гармоники сигнала.

Действительно, если преобразовать систему (10) соответствующим образом, то мы получим выражение вида $\psi(t) = q(\Phi)\phi(t) + q'(\Phi)\phi'(t)$, на что указывают синусные и косинусные составляющие в уравнениях системы. Данное выражение

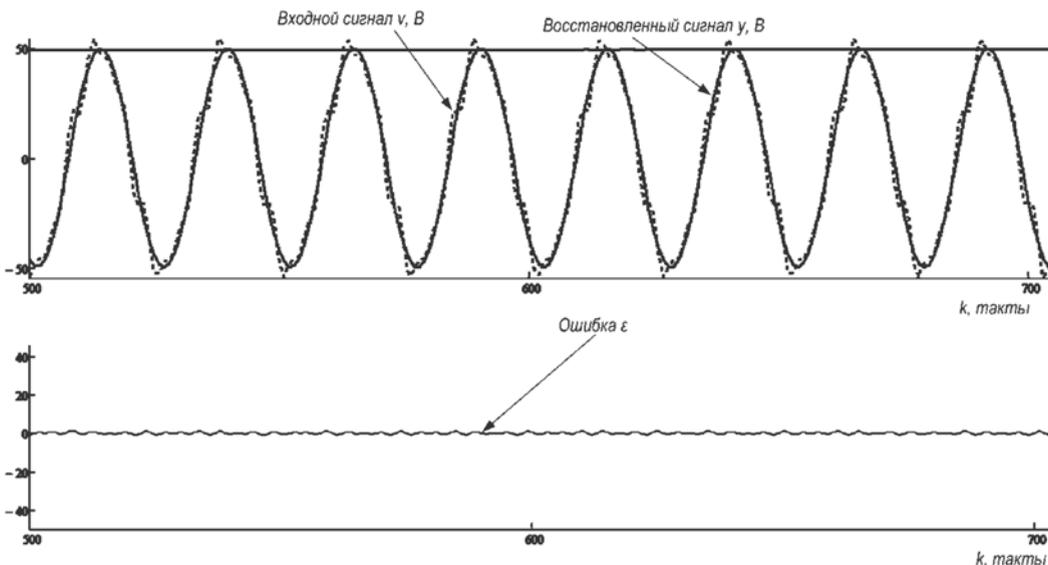


Рис. 5. Аппроксимация основной гармоники $u(k)$ искаженного сигнала $v(k)$ при наличии в нем пятой и седьмой гармоник



описывает траекторию динамической системы (10) вокруг фиксированной точки, находящейся в окрестности (*). А коэффициент α определяет скорость ее движения из точки с координатами $(A_0, \omega_0, \varphi_0)$ в точку $(A_1, \omega_1, \varphi_1)$.

На рис. 5 приведены результаты моделирования процесса слежения за основной гармоникой сигнала $v(t)$, при наличии в нем пятой и седьмой гармоник с уровнями, соответственно, 10 и 5 %.

Предложенный метод слежения за параметрами основной (в принципе, любой) гармоники искаженного сигнала позволяет обеспечить единственное, стабильное и схо-

дящееся решение нелинейной динамической системы. Полученный алгоритм обеспечивает уникальную асимптотическую траекторию, являющуюся периодической и лежащей в окрестности аппроксимируемой функции целевой гармоники сигнала. При этом в установившемся режиме абсолютная ошибка аппроксимации не превышает 0,01 %.

Разработанный метод может с успехом использоваться при построении многомерных систем идентификации внешних параметров как подсистемы экспертных блоков в автоматизированных системах управления качеством электроэнергии на водном транспорте и в других автономных электроэнергетических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жиленков А.А.** Влияния мощных тиристорных выпрямителей на питающую их автономную электростанцию // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2012. Вып. 5/8(59). С. 14–19.

2. **Жиленков А.А.** Определение критериев оценки устойчивости работы управляемого выпрямителя в сети ограниченной мощности // Матер. V междунар. науч.-практич. конф. Современные информационные и инновационные технологии на транспорте. Херсон, 2013. Т. 2. С. 108–109.

3. **Жиленков А.А.** Анализ работы тиристорного привода постоянного тока, работающего в автономной сети // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2012. Вып. 6/8(60). С. 12–14.

4. **Жиленков А.А.** Оценка устойчивости управляемого выпрямителя в сети ограниченной мощности // Матер. II междунар. науч.-практич. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи). Черкаassy, 2013. С. 358–359.

5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. 58 с.

6. **Жиленков А.А., Черный С.Г.** Адаптивная система управления активного фильтра с мо-

дульной топологией // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки. Чернігів: Изд-во Черніг. держ. технол. ун-та, 2013. № 2 (65). С. 230–235.

7. **Жиленков А.А., Черный С.Г.** Моделирование адаптивного управления в сложных распределенных системах с идентификацией параметров // Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 6. С. 253–260.

8. **Zhilentkov A., Cherney S.** Adaptive control in complex distributed systems with the identification of parameters that can't be measured // Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex: research articles. San Francisco, California: B&M Publishing, 2013. Pp. 17–20.

9. **Gyugyi L., Strycula E.** Active AC Power Filter // IEEE Trans, on Industry Applications. 1976. Pp. 529–535.

10. **Jintakosonwit P., Fujita H., Akagi H.** Control and Performance of a Fully-Digital-Controlled Shunt Active Filter for Installation on a Power Distribution System // IEEE Trans, on Power Electronics. 2002. Vol. 17, No. 1. Pp. 132–140.

11. **Kim S., Enjeti P.N.** A New Hybrid Active Power Filter (APF) Topology // IEEE Trans, on Power Electronics. 2002. Vol. 17. No. 1. Pp. 48–54.

12. **Nunez-Zuniga T.E., Pomilio J.A.** Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Loads // IEEE Trans, on Power Electronics. 2002. Vol. 17. No. 2. Pp. 273–278.

REFERENCES

1. **Zhilentkov A.A.** Vliyaniya moshchnykh tiristornykh vypryamiteley na pitayushchuyu ikh avtonomnyuyu elektrostantsiyu, *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, Kharkov, 2012, No. 5/8(59), Pp. 14–19.

2. **Zhilentkov A.A.** Opredeleniye kriteriyev otsenki ustoychivosti raboty upravlyayemogo vypryamitelya v seti ogranichennoy moshchnosti, *Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Sovremennyye informatsionnyye i innovatsionnyye*

tehnologii na transporte. Kherson, 2013, Vol. 2, Pp. 108–109.

3. **Zhilenkov A.A.** Analiz raboty tiristornogo privoda postoyannogo toka, robotayushchego v avtonomnoy seti, *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. Kharkov, 2012, No. 6/8(60), Pp. 12–14.

4. **Zhilenkov A.A.** Otsenka ustoychivosti upravlyayemogo vypryamitelya v seti ogranichennoy moshchnosti, *Obchislyvalniy intelekt (rezultati, problemi, perspektivi): materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Cherkassy, 2013, Pp. 358–359.

5. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya*. Minsk: Mezhdunarodnyy Sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1998, 58 p.

6. **Zhilenkov A.A., Cherny S.G.** Adaptivnaya sistema upravleniya aktivnogo filtra s modulnoy topologiyey, *Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Ser. Tekhnichni nauki*, Chernigiv: Chernig. derzh. tekhnol. un-t Publ., 2013, No. 2(65), Pp. 230–235.

7. **Zhilenkov A.A., Cherny S.G.** Modelirovaniye

adaptivnogo upravleniya v slozhnykh raspredelennykh sistemakh s identifikatsiyey parametrov, *Visnik Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu*, 2013, No. 6, Pp. 253–260.

8. **Zhilenkov A., Cherny S.** Adaptive control in complex distributed systems with the identification of parameters that can't be measured, *Pressing issues and priorities in development of the scientific and technological complex: research articles*, B&M Publishing, San Francisco, California, 2013, Pp. 17–20.

9. **Gyugyi L., Strycula E.** Active AC Power Filter, *IEEE Trans, on Industry Applications*, 1976, Pp. 529–535.

10. **Jintakosonwit P., Fujita H., Akagi H.** Control and Performance of a Fully-Digital-Controlled Shunt Active Filter for Installation on a Power Distribution System, *IEEE Trans, on Power Electronics*, 2002, Vol. 17, No. 1, Pp. 132–140.

11. **Kim S., Enjeti P.N.** A New Hybrid Active Power Filter (APF) Topology, *IEEE Trans, on Power Electronics*, 2002, Vol. 17, No. 1, Pp. 48–54.

12. **Nunez-Zuniga T.Ye., Pomilio J.A.** Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Loads, *IEEE Trans, on Power Electronics*, 2002, Vol.17, No.2, Pp. 273–278.

ЧЕРНЫЙ Сергей Григорьевич — доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета, кандидат технических наук.

298300, Россия, Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82.

E-mail: sergiiblack@gmail.com

CHERNY, Sergey G. *Kerch State Marine Technological University.*

298300, Orgenikidse Str. 82, Kerch, Russia.

E-mail: sergiiblack@gmail.com

ЖИЛЕНКОВ Антон Александрович — старший преподаватель Керченского государственного морского технологического университета.

298300, Россия, Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82.

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

ZHILENKOV, Anton A. *Kerch State Marine Technological University.*

298300, Orgenikidse Str. 82, Kerch, Russia.

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com