

В. А. Беззубов, студент, valentin.bezzubov@yandex.ru,
А. А. Бобцов, д-р техн. наук, проф., bobtsov@mail.ru,
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Алгоритм идентификации параметров неизмеряемого синусоидального возмущения с нестационарной амплитудой

Рассматривается задача синтеза алгоритма идентификации частоты синусоидального возмущающего воздействия, действующего на линейный стационарный объект управления. Данная задача решается в классе объектов с известными параметрами и измеряемым вектором переменных состояния. Относительно частоты возмущающего воздействия допускается, что для нее известно ограничение сверху.

Несмотря на кажущуюся тривиальность проблема осложняется нестационарностью амплитуды синусоидального возмущения, в связи с чем использование многочисленных методов идентификации параметров измеряемых синусоидальных сигналов не приносит успеха. Связано это прежде всего с нестационарностью амплитуды возмущения. В статье рассматривается случай, когда возмущающее воздействие представляет собой синусоидальный сигнал с неизвестными частотой и фазой, но амплитуда является произведением неизвестной константы на известную строго положительную функцию времени. Для нестационарной строго положительной функции предполагается, что известна верхняя граница ее производной. Данное допущение на амплитуду нестационарного синусоидального возмущения не является математической абстракцией. Подобные модели возникают в системах обнаружения неисправностей в открытой цепи для однофазного преобразования постоянного тока в переменный. Хорошо известно, что альтернативные источники энергии требуют высокого уровня интеграции в электрические сети. Для этой цели используются преобразователи постоянного тока в переменный, которые обеспечивают синхронизацию соответствующего потока энергии в электрические сети. Эти преобразователи энергии используют высокочастотное переключение для управления процессом преобразования энергии. В результате постоянной работы и переходных процессов в энергетических сетях могут возникать неисправности. После сбоя преобразователь постоянного тока в переменный не сможет подавать симметричное напряжение и ток в электрическую сеть и, как следствие, неисправный преобразователь вызовет гармоническое зашумление. Оценивая подобное гармоническое зашумление/возмущение, можно избежать аварийных ситуаций.

Доказана асимптотическая сходимость оценки частоты возмущающего воздействия к истинному значению. Для понимания процедуры синтеза алгоритма оценки и иллюстрации его работоспособности представлен пример с результатами компьютерного моделирования, демонстрирующими достижение заданной цели.

Ключевые слова: идентификация неизвестных параметров, наблюдатели внешних возмущений, нестационарные сигналы

Введение

В статье рассматривается классическая (для современной теории автоматического управления) проблема идентификации параметров неизмеряемого синусоидального возмущающего воздействия. Отличительной особенностью рассматриваемой в данной статье задачи является умножение синусоидального возмущающего воздействия на известную нестационарную знакоопределенную скалярную функцию. Такая постановка задачи, с одной стороны, обогащает новыми подходами теоретические исследования, проводимые в области идентификации параметров синусоидальных сигналов (см., например, работы [11–13]), а с другой стороны, представляет несомненный практический интерес для современных систем обнаружения неисправностей в открытой цепи для однофазного преобразования постоянного тока в переменный. Хорошо известно, что альтернативные источники энергии требуют высокого уровня интеграции в электрические сети. Для этой цели используются преобразователи постоянного тока в переменный, которые обе-

спечивают синхронизацию соответствующего потока энергии в электрические сети. Эти преобразователи энергии используют высокочастотное переключение для управления процессом преобразования энергии. В результате постоянной работы и переходных процессов в энергетических сетях могут возникать неисправности (см, например, [14, 15]). После сбоя преобразователь постоянного тока в переменный не сможет подавать симметричное напряжение и ток в электрическую сеть, а следовательно, неисправный преобразователь вызовет гармоническое зашумление [16–18]. Оценивая подобное гармоническое зашумление/возмущение, можно избежать аварийных ситуаций. Именно в данной прикладной задаче возникает необходимость оценивания параметров синусоидального возмущающего воздействия, амплитуда которого умножена на известную нестационарную положительную скалярную функцию.

Сама по себе задача оценивания параметров синусоидальных сигналов при их измеримости является хорошо изученной (см., например, работы [1–10]). В статьях [2, 3] для определения па-

раметров использовали градиентный алгоритм с предварительным применением к сигналу апериодического фильтра. Недостатком данного подхода можно считать невозможность определения параметров за конечное время. Алгоритм нелинейного представления синусоидального сигнала с последующим применением нелинейного наблюдателя Люенбергера рассмотрен в статье [7]. В работе [8] использовано быстрое дискретное преобразование Фурье с последующим определением максимума на амплитудно-частотной характеристике. Идентификация параметров измеряемого мультигармонического сигнала рассматривается в статье [9]. В работе [10] представлены алгоритмы для определения параметров измеряемых синусоидальных сигналов с нестационарной амплитудой. Даже из подобного краткого анализа методов следует, что существует большое разнообразие подходов для оценивания параметров синусоидального сигнала. Однако повышенную сложность представляет идентификация параметров измеряемого синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой. В работах [4, 5] рассматриваются методы идентификации, использующие запаздывающие сигналы, что позволило получить новый результат для идентификации частоты синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой. Однако кажущаяся на первый взгляд простота использования данных методов идентификации в случае нестационарной амплитуды неизмеряемого синусоидального возмущающего воздействия является обманчивой.

В настоящей статье рассматривается задача синтеза алгоритма оценивания частоты неизмеряемого синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой, известной с точностью до постоянного множителя. Сформулированы условия, при выполнении которых обеспечивается сходимость к нулю ошибки оценивания частоты синусоидального возмущения.

Постановка задачи

Рассмотрим линейную стационарную систему, на вход которой действует неизмеряемое синусоидальное возмущение с неизвестными амплитудой, частотой и фазой:

$$\dot{x} = Ax + B(u + \Phi(t)\delta(t)), \quad (1)$$

где $\delta(t) = \sigma \sin(\omega t + \varphi)$, ω и φ — неизвестные постоянные параметры; $\Phi(t)$ — известная функция времени.

Ставится задача синтезировать алгоритм идентификации неизвестного параметра ω ,

обеспечивающий для любых $0 < \omega \leq \bar{\omega}$ выполнение следующего целевого условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega - \hat{\omega}(t)| = 0, \quad (2)$$

где $\hat{\omega}(t)$ — текущая оценка частоты ω .

Допущение 1. Известна верхняя граница $\bar{\omega}$ частоты ω .

Допущение 2. Скалярная функция $\Phi(t)$ является строго положительной и известной, т. е. $\Phi(t) \geq \Phi_0 > 0$ (где Φ_0 — известное число). Известно число Φ_1 такое, что для всех t выполнено $\Phi_1 \geq |\dot{\Phi}|$.

Допущение 3. Все элементы вектора состояния x измеряемы.

Основной результат

Синтез алгоритма идентификации неизвестного параметра ω будем осуществлять в два этапа. На первом этапе будем предполагать, что сигнал $\Phi(t)\delta(t)$ измеряется. Далее, базируясь на результатах первого этапа, рассмотрим решение задачи (2), допуская, что все элементы вектора состояния x измеряются.

Этап 1. Предположим, что сигнал $\Phi(t)\delta(t)$ измеряется. Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая синусоидальное воздействие $\delta(t)$, может быть описана следующим образом (см., например, работу [2]):

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = -\omega^2 z_1, \\ \delta = z_1. \end{cases} \quad (3)$$

Следуя статье [13], представим систему (3) в виде

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \theta \xi_1, \\ \delta = k_1 \xi_1 + k_2 \xi_2, \end{cases} \quad (4)$$

где $\theta = -\omega^2$.

Для удобства дальнейших преобразований представим систему (4) в векторно-матричном виде

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \Gamma \xi, \\ \delta = k^T \xi, \end{cases}$$

где $k^T = [k_1 \ k_2]$. Матрица Γ имеет вид

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \theta & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \theta \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} = \Gamma_0 + \theta qh^T,$$

где $h^T = [1 \ 0]$, $q^T = [0 \ 1]$ и $\Gamma_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.

Введем в рассмотрение новую переменную

$$\Phi(t)\delta(t) = r(t).$$

Пусть наблюдатель вектора ξ имеет вид

$$\dot{\hat{\xi}} = \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} \hat{\xi}_1 q + \mu q(r - \Phi k^T \hat{\xi}) = \quad (5)$$

$$= \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} \hat{\xi}_1 q + \mu q \Phi k^T (\xi - \hat{\xi}),$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\gamma \Phi \hat{\delta} \hat{\xi}_1 = -\gamma \tilde{r} \hat{\xi}_1, \quad (6)$$

где параметры $\mu > 0$ и $\gamma > 0$, функция $\tilde{r} = \hat{r} - r$, вектор $k = Pq$, а матрица $P = P^T > 0$ является решением матричного уравнения Риккати вида

$$\Gamma_0^T P + P \Gamma_0 - P q q^T P = -2\alpha P - Q, \quad (7)$$

где матрица $Q = Q^T > 0$, строго положительное число α выбирается следующим образом:

$$\alpha > \frac{\Phi_1}{\Phi_0}.$$

Утверждение. Пусть для идентификации неизвестного параметра $\theta = -\omega^2$ используется алгоритм (5), (6). Тогда целевое условие (2) будет выполнено.

Доказательство. Сформируем ошибку оценивания вектора ξ :

$$\tilde{\xi} = \hat{\xi} - \xi. \quad (8)$$

Дифференцируя соотношение (8), получаем

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} \hat{\xi}_1 q - \mu \Phi q k^T \tilde{\xi} - \Gamma_0 \xi - \theta \xi_1 q = \\ &= (\Gamma_0 - \mu \Phi q k^T) \tilde{\xi} + (\hat{\theta} \hat{\xi}_1 - \theta \xi_1) q. \end{aligned} \quad (9)$$

Второе слагаемое уравнения (9) можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{\theta} \hat{\xi}_1 - \theta \xi_1 &= (\theta + \tilde{\theta})(\xi_1 + \tilde{\xi}_1) - \theta \xi_1 = \\ &= \theta \tilde{\xi}_1 + \theta \xi_1 + \tilde{\theta} \xi_1 + \tilde{\theta} \tilde{\xi}_1 - \theta \xi_1 = \theta \tilde{\xi}_1 + \tilde{\theta} \hat{\xi}_1. \end{aligned}$$

Тогда вектор $\tilde{\xi}$ примет вид

$$\dot{\tilde{\xi}} = \Gamma_c \tilde{\xi} + \tilde{\theta} q \hat{\xi}_1, \quad (10)$$

где $\Gamma_c = \Gamma_0 - \mu \Phi q k^T + \theta q h^T$.

Определим функцию Ляпунова для данной системы в виде

$$V = \Phi \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^2. \quad (11)$$

Тогда производная функции (11) по времени равна

$$\dot{V} = \Phi \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi} + \Phi \tilde{\xi}^T (\Gamma_c^T P + P \Gamma_c) \tilde{\xi} + 2\Phi \tilde{\theta} \tilde{\xi}^T P q \hat{\xi}_1 + \frac{2}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}.$$

Рассмотрим подробнее выражение $\tilde{\xi}^T (\Gamma_c^T P + P \Gamma_c) \tilde{\xi}$:

$$\begin{aligned} &\tilde{\xi}^T (\Gamma_0^T P + P \Gamma_0 - 2\mu \Phi P q q^T P + \theta P q h^T + \theta h q^T P) \tilde{\xi} \leq \\ &\leq \tilde{\xi}^T (\Gamma_0^T P + P \Gamma_0 - 2\mu \Phi_0 P q q^T P + \theta^2 \beta P q q^T P + \\ &\quad + \beta^{-1} h h^T) \tilde{\xi} = \tilde{\xi}^T (\Gamma_0^T P + P \Gamma_0 - P q q^T P - \\ &\quad - (2\mu \Phi_0 - 1) P q q^T P + \theta^2 \beta P q q^T P + \beta^{-1} h h^T) \tilde{\xi} = \\ &= \tilde{\xi}^T (-2\alpha P - Q - (2\mu \Phi_0 - 1) P q q^T P + \\ &\quad + \theta^2 \beta P q q^T P + \beta^{-1} h h^T) \tilde{\xi} \leq \tilde{\xi}^T (-2\alpha P - Q - \\ &\quad - (2\mu \Phi_0 - 1) P q q^T P + \omega^4 \beta P q q^T P + \beta^{-1} h h^T) \tilde{\xi}, \end{aligned}$$

где последнее неравенство выполнено в силу допущения 1 и число $\beta > 0$.

Выберем число μ следующим образом:

$$-Q - (2\mu \Phi_0 - 1) P q q^T P + \omega^4 \beta P q q^T P + \beta^{-1} h h^T < 0. \quad (12)$$

Далее, в силу уравнения (6) имеем

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\gamma \Phi \tilde{\xi}^T P q \hat{\xi}_1. \quad (13)$$

Тогда из уравнения (13) следует

$$\frac{2}{\gamma} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} + 2\Phi \tilde{\theta} \tilde{\xi}^T P q \hat{\xi}_1 = 0. \quad (14)$$

Подставляя соотношения (12) и (14) в выражение для производной от функции Ляпунова (11), получаем

$$\dot{V} \leq -2\alpha \Phi \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi} + \Phi \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi} \leq -2\alpha \Phi_0 \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi} + \Phi_1 \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi}.$$

В силу допущения 2 и условия $\alpha > \frac{\Phi_1}{\Phi_0}$ получаем

$$\dot{V} \leq -\alpha \Phi_0 \tilde{\xi}^T P \tilde{\xi}. \quad (15)$$

Из неравенства (15) легко показать, что вектор-функция $\tilde{\xi}(t)$ принадлежит лебегову пространству L_2 . Тогда, по лемме Барбалата (см., например, работы [19, 20]) получаем

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\xi} \in L_2 \cap L_\infty \\ \tilde{\theta} \in L_\infty \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\xi}| = 0.$$

Отсюда следует

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\xi}| = 0 \text{ и } \lim_{t \rightarrow \infty} |k^T \tilde{\xi}| = \lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\delta}| = \lim_{t \rightarrow \infty} |\delta(t) - \hat{\delta}(t)| = 0.$$

Далее легко показать (см., например, работу [13]), что

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\theta}| = \lim_{t \rightarrow \infty} \sqrt{|\tilde{\theta}|} = \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega - \hat{\omega}(t)| = 0.$$

Этап 2. Поскольку по условиям задачи сигнал $\Phi(t)\delta(t) = r(t)$ не измеряется, то возникает необходимость модификации алгоритма идентификации вида (5), (6). Осуществляя про-

стейшие алгебраические манипуляции с уравнением (1), для сигнала $r(t)$ получаем

$$r(t) = \frac{B^T}{B^T B} (\dot{x} - Ax) - u. \quad (16)$$

Тогда уравнение (5) можно переписать следующим образом:

$$\dot{\hat{\xi}} = \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} q \hat{\xi}_1 + \mu q \left(\frac{B^T}{B^T B} (\dot{x} - Ax) - u - \Phi k^T \hat{\xi} \right).$$

Введем новую переменную

$$\chi = \hat{\xi} - q \frac{B^T}{B^T B} x. \quad (17)$$

Тогда, дифференцируя выражение (17), имеем

$$\dot{\chi} = \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} q \hat{\xi}_1 - \mu q \left(\Phi k^T \hat{\xi} + \frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right). \quad (18)$$

С помощью замены (16) запишем уравнение (6) следующим образом:

$$\dot{\theta} = -\gamma \hat{\xi}_1 \hat{r} + \gamma \hat{\xi}_1 r = \gamma \hat{\xi}_1 \hat{r} + \gamma \hat{\xi}_1 \left(\frac{B^T}{B^T B} (\dot{x} - Ax) - u \right).$$

Введем переменную

$$\eta = \hat{\theta} - \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x. \quad (19)$$

Дифференцируя, имеем

$$\dot{\eta} = -\gamma \hat{\xi}_1 \hat{r} - \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x - \gamma \hat{\xi}_1 \left(\frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right).$$

Выразим $\hat{\xi}_1$ через χ :

$$\hat{\xi}_1 = h^T \hat{\xi} = h^T \chi + h^T q \frac{B^T}{B^T B} x = h^T \chi.$$

Следовательно, производная $\hat{\xi}_1$ может быть записана в виде

$$\dot{\hat{\xi}}_1 = h^T \dot{\chi} = \hat{\xi}_2.$$

Таким образом, на базе алгоритма (5), (6) получаем его реализуемый аналог, не предусматривающий измерения сигнала $\Phi(t)\delta(t) = r(t)$:

$$\begin{cases} \dot{\chi} = \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} q \hat{\xi}_1 - \mu q \left(\Phi k^T \hat{\xi} + \frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right), \\ \dot{\eta} = -\gamma \hat{\xi}_1 \hat{r} - \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x - \gamma \hat{\xi}_1 \left(\frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right), \\ \hat{\xi} = \chi + q \frac{B^T}{B^T B} x, \\ \hat{\theta} = \eta + \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x. \end{cases} \quad (20)$$

Как было показано в *Утверждении*, алгоритм идентификации (20) будет обеспечивать выполнение целевого неравенства (2) при выполнении следующих условий:

- число μ выбирается таким образом, чтобы неравенство (12) было выполнено;
- число α должно соответствовать строгому неравенству $\alpha > \frac{\Phi_1}{\Phi_0}$.

Для иллюстрации работоспособности предлагаемого алгоритма идентификации рассмотрим численный пример.

Пример

Покажем работоспособность алгоритма (20) с помощью компьютерного моделирования. Рассмотрим объект управления (1) с матрицами A и B вида

$$A = \begin{bmatrix} -10 & 2 \\ 1 & -20 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Пусть управляющее воздействие $u = 0$ и функция $\Phi(t) = 2 + \sin t$. Тогда в соответствии с методикой, представленной на *Этапе 1*, выберем параметры α , β , μ и матрицы P и k следующим образом: $\alpha = 1,1$, $\beta = 0,001$, $\mu = 80,4918$, $P = \begin{bmatrix} 16,4002 & 6,0894 \\ 6,0894 & 4,8932 \end{bmatrix}$ и $k = \begin{bmatrix} 6,0894 \\ 4,8932 \end{bmatrix}$.

Результаты компьютерного моделирования алгоритма идентификации (20) для различных значений коэффициента γ представлены на рис. 1–4. Из графиков следует достижимость

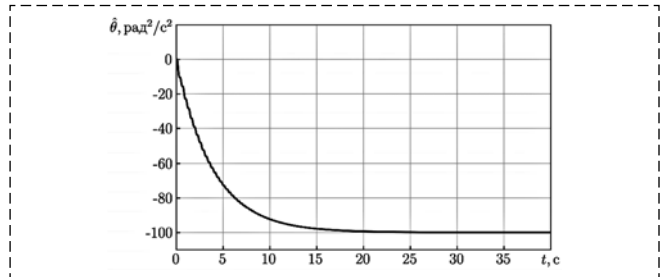


Рис. 1. График оценки $\hat{\theta}(t)$ при $\omega = 10$ рад/с и $\gamma = 10^5$

Fig. 1. Estimate $\hat{\theta}(t)$ in case of $\omega = 10$ rad/s and $\gamma = 10^5$

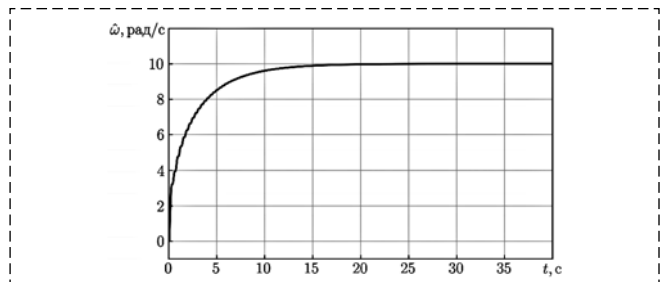


Рис. 2. График оценки $\hat{\omega}(t)$ при $\omega = 10$ рад/с и $\gamma = 10^5$

Fig. 2. Estimate $\hat{\omega}(t)$ in case of $\omega = 10$ rad/s and $\gamma = 10^5$

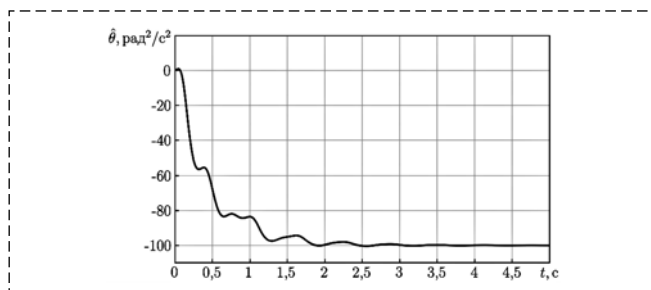


Рис. 3. График оценки $\hat{\theta}(t)$ при $\omega = 10$ рад/с и $\gamma = 10^6$
 Fig. 3. Estimate $\hat{\theta}(t)$ in case of $\omega = 10$ rad/s and $\gamma = 10^6$

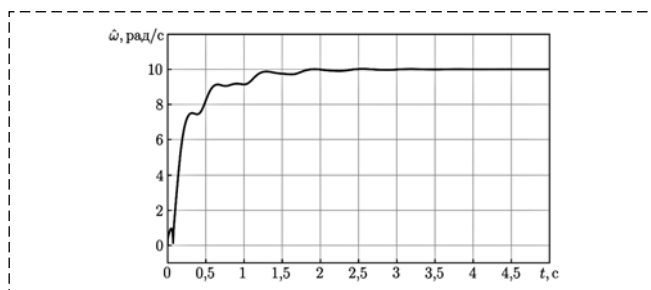


Рис. 4. График оценки $\hat{\omega}(t)$ при $\omega = 10$ рад/с и $\gamma = 10^6$
 Fig. 4. Estimate $\hat{\omega}(t)$ in case of $\omega = 10$ rad/s and $\gamma = 10^6$

целевого условия вида (2). Также можно видеть из графиков переходных процессов, что за счет увеличения коэффициента γ можно улучшать скорость параметрической сходимости.

Заключение

Предложен алгоритм (20) для оценивания частоты неизмеряемого синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой для линейного стационарного объекта (1). Была доказана работоспособность предложенного подхода и выполнено компьютерное моделирование, демонстрирующее параметрическую сходимость переменной θ алгоритма к истинному значению θ .

В качестве перспективных шагов развития предлагаемого результата видится его расширение на случай n гармоник, а также неизмеряемости вектора переменных состояния модели (1).

Список литературы

1. Fedele G., Ferrise A., D'Aquila G. A global frequency estimator based on a frequency-locked-loop filter // American Control Conference (ACC). 2016. P. 7001–7006.
2. Aranovskiy S. V., Bobtsov A. A., Kremlev A. S., Nikolaev N. A., Slita O. V. Identification of Frequency of Biased Harmonic Signal // European Journal of Control. 2010. Vol. 50. P. 129–139.
3. Le Van Tuan, Korotina M. M., Bobtsov A. A., Aranovskiy S. V., Pyrkin A. A. Online estimation of time-varying frequency of a sinusoidal signal // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52. P. 245–250.

4. Vedyakov A. A., Vedyakova A. O., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Aranovskiy S. V. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. P. 12880–12885.

5. Vedyakov A. A., Vedyakova A. O., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Kakanov M. A. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude and phase // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. P. 663–668.

6. Ведяков А. А., Бобцов А. А., Пыркин А. А. Оценивание параметров синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 812–817.

7. Praly L., Isidori A., Marconi L. A new observer for an unknown harmonic oscillator. 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems. 2006. P. 24–28.

8. Singh P., Singhal A. Frequency estimation of a sinusoidal signal // 2016 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC). 2016. P. 320–322.

9. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Vedyakov A. A., Kolyubin S. A. Estimation of polyharmonic signal parameters // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, N. 8. P. 1400–1416.

10. Ле Ван Туан, Бобцов А. А. Идентификация параметров синусоидального сигнала с неизвестной нестационарной амплитудой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 6. С. 976–981.

11. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Vedyakov A. A., Borisov O. I., Gromov V. S., Margun A. A., Bazylev D. N. Fast Compensation of Unknown Multiharmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Input Delay // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46. P. 546–551.

12. Пыркин А. А., Бобцов А. А., Никифоров В. О., Колубин С. А., Ведяков А. А., Борисов О. И., Громов В. С. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и телемеханика. 2015. № 12. С. 43–64.

13. Bobtsov A. A. New approach to the problem of globally convergent frequency estimator // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2008. Vol. 22, N. 3. P. 306–317.

14. Salehifar M., Arashloo R. S., Moreno-Eguilaz M., Sala V., Romeral L. Observer-based open transistor fault diagnosis and fault-tolerant control of five-phase permanent magnet motor drive for application in electric vehicles // IET Power Electronics. 2015. Vol. 8. P. 76–87.

15. Yang S., Bryant A., Mawby P., Xiang D., Ran L., Tavner P. An industry-based survey of reliability in power electronic converters // IEEE Transactions on Industry Applications. 2011. Vol. 47, N. 3. P. 1441–1451.

16. Salimian H., Iman-Eini H. Fault-tolerant operation of three-phase cascaded H-bridge converters using an auxiliary module // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, N. 2. P. 1018–1027.

17. Jlassi I., Estima J. O., El-Khil K., Bellaaj N. M., Marques A. J. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of pmsg drives for wind turbine systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30, N. 5. P. 2689–2702.

18. Mirafzal B. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61, N. 10. P. 5192–5202.

19. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / Учеб. пособ. СПб: Наука, 2000. 549 с.

20. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Courier Dover Publications, 2011. 400 p.

Parameters Estimation Algorithm for an Unmeasured Sinusoidal Signal with Time-Varying Amplitude

V. A. Bezzubov, valentin.bezzubov@yandex.ru, A. A. Bobtsov, bobtsov@mail.ru,
ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Bobtsov Alexey A., Ph.D., Professor, ITMO University,
197101, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: bobtsov@mail.ru Accepted May 25, 2020

Abstract

In this paper the problem of identification algorithm for unknown frequency of a sinusoidal disturbance for a linear plant was considered. This problem is solved in the class of plants with known parameters and a measured of state variables. Regarding the frequency of the sinusoidal disturbance was assumed that the it upper limit is known. Despite the seeming triviality the considered problem is difficult. Using of numerous methods for parameters identification of the measured sinusoidal signals does not give success if the amplitude of sinusoidal disturbance is time-varying. In this paper we will assume that amplitude is the product of an unknown constant by a known strictly positive function of time. For the time-varying strictly positive function we will suppose that the upper boundary of its derivative is known. We note that such assumption on the amplitude of a time-varying sinusoidal disturbance is not a mathematical abstraction. Similar models arise in fault-detection strategy in DC/AC conversion. It is well known that alternative energy sources require a high level of integration into the electrical power grids. For this purpose, DC/AC and AC/AC power converter are used to provide the coupling, synchronization and appropriate power flow to the electrical networks. These power converters employ high-frequency switching to manipulate the energy conversion process. As a result of a constant operation and load transients, the power switches in the DC/AC and AC/AC topologies are facing voltage, current and temperature stresses that could lead to a fault. After a fault, the DC/AC and AC/AC power converter will not be able to provide a symmetric voltage and current to the electrical network and, consequently, the faulty converter will induce harmonic noise. By evaluating such harmonic noise / disturbance, emergency situations can be avoided. In this paper the asymptotic convergence of the estimation of the frequency of the perturbing effect to the true value is proven. For clarification of design procedure of estimation algorithm and performance illustration an example was presented. The computer simulation results are demonstrating the achievement of a given purpose.

Keywords: unknown parameters estimation, external disturbance state observers, time-varying signals

For citation:

Bezzubov V. A., Bobtsov A. A. Parameters Estimation Algorithm for an Unmeasured Sinusoidal Signal with Time-Varying Amplitude, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no.8, pp. 464–469.

DOI: 10.17587/mau.21.464-469

References

1. Fedele G., Ferrise A., D'Aquila G. A global frequency estimator based on a frequency-locked-loop filter, *American Control Conference (ACC)*, 2016, pp. 7001–7006.
2. Aranovskiy S. V., Bobtsov A. A., Kremlev A. S., Nikolaev N. A., Slita O. V. Identification of Frequency of Biased Harmonic Signal, *European Journal of Control*, 2010, vol. 50, pp. 129–139.
3. Le Van Tuan, Korotina M. M., Bobtsov A. A., Aranovskiy S. V., Pyrkin A. A. Online estimation of time-varying frequency of a sinusoidal signal, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, pp. 245–250.
4. Vedyakov A. A., Vedyakova A. O., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Aranovskiy S. V. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude, *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, pp. 12880–12885.
5. Vedyakov A. A., Vedyakova A. O., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Kakanov M. A. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude and phase, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, pp. 663–668.
6. Vedyakov A. A., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A. Otsenivanie parametrov sinusoidal'nogo signala s nestatsionarnoy amplitudoy (Parameters estimation of a sinusoidal signal with non-stationary amplitude), *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 812–817 (in Russian).
7. Praly L., Isidori A., Marconi L. A new observer for an unknown harmonic oscillator, *17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, 2006, pp. 24–28.
8. Singh P., Singhal A. Frequency estimation of a sinusoidal signal, *2016 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, 2016, pp. 320–322.
9. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Vedyakov A. A., Kolyubin S. A. Estimation of polyharmonic signal parameters, *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 8, pp. 1400–1416.
10. Le Van Tuan, Bobtsov A. A. Parameters estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude, *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik informatsionnikh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 976–981 (in Russian).
11. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Vedyakov A. A., Borisov O. I., Gromov V. S., Margun A. A., Bazylev D. N. Fast Compensation of Unknown Multiharmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Input Delay, *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46, pp. 546–551.
12. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Nikiforov V. O., Kolyubin S. A., Vedyakov A. A., Borisov O. I., Gromov V. S. Compensation of polyharmonic disturbance in state and output of a linear system with delay in control channel, *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 12, pp. 43–64 (in Russian).
13. Bobtsov A. A. New approach to the problem of globally convergent frequency estimator, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2008, vol. 22, no. 3, pp. 306–317.
14. Salehifar M., Arashloo R. S., Moreno-Eguilaz M., Sala V., and Romeral L. Observer-based open transistor fault diagnosis and fault-tolerant control of five-phase permanent magnet motor drive for application in electric vehicles, *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, pp. 76–87.
15. Yang S., Bryant A., Mawby P., Xiang D., Ran L., Tavner P. An industry-based survey of reliability in power electronic converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451.
16. Salimian H., Iman-Eini H. Fault-tolerant operation of three-phase cascaded H-bridge converters using an auxiliary module, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1018–1027.
17. Jlassi I., Estima J. O., El-Khil K., Bellaaj N. M., Marques A. J. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of pmsg drives for wind turbine systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 5, pp. 2689–2702.
18. Mirafzal B. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 10, pp. 5192–5202.
19. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. Nonlinear and adaptive control of complex dynamical systems, Saint-Petersburg, Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
20. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Courier Dover Publications, 2011, 400 p.