

В. А. БЕЗЗУБОВ, А. А. БОБЦОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТЫ НЕИЗМЕРЯЕМОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ АМПЛИТУДОЙ

В докладе 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. Сформулированы условия, при выполнении которых обеспечивается сходимость к нулю ошибки оценивания.

Введение. Рассматривается задача идентификации параметров неизмеряемого синусоидального возмущающего воздействия. Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является умножение синусоидального возмущающего воздействия на известную нестационарную знакоопределенную скалярную функцию. Такая постановка задачи представляет практический интерес для современных систем обнаружения неисправностей в открытой цепи для однофазного преобразования постоянного тока в переменный (например, [1]).

Задача оценивания параметров синусоидальных сигналов при их измеримости является хорошо изученной (например, [2–4]). В статье [2] для определения параметров использовался 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 [3]. В подходе [4] рассматривается метод идентификации параметров гармонического сигнала с нестационарными амплитудой и фазой, использующий запаздывающие сигналы, что позволило получить новый результат для идентификации частоты синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой.

Предлагаемый доклад посвящен синтезу алгоритма идентификации частоты неизмеряемого синусоидального возмущения с нестационарной амплитудой, выраженному произведением стационарного синусоидального сигнала на измеряемую скалярную функцию времени, причём производная данной функции не является известной.

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:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega - \hat{\omega}(t)| = 0, \quad (1)$$

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. Более того известны числа Φ_0 и Φ_1 такие, что для всех t выполнено $\Phi(t) \geq \Phi_0 > 0$ и $\Phi_1 \geq |\dot{\Phi}|$.

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:

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

Следуя [5] представим (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 (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:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \theta & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \theta \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0] = \Gamma_0 + \theta q h^T,$$

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 вида

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

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

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 $Q = Q^T > 0$ и строго положительное число α удовлетворяет неравенству $\alpha > \frac{\Phi_1}{\Phi_0}$.

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 простейшие алгебраические манипуляции с уравнением **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, для сигнала $r(t)$ получаем

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

Введём новую переменную $\chi = \hat{\xi} - \mu q \frac{B^T}{B^T B} x$. Дифференцируя данную переменную имеем

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

Выразим $\hat{\xi}_1$ через χ , тогда

$$\hat{\xi}_1 = h^T \hat{\xi} = h^T \chi + h^T q \frac{B^T}{B^T B} x = h^T \chi \Rightarrow \dot{\hat{\xi}}_1 = h^T \dot{\chi} = \hat{\xi}_2.$$

Введём переменную $\eta = \hat{\theta} - \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x$, дифференцируя которую по времени получим

$$\dot{\eta} = -\gamma \hat{\xi}_1 \dot{r} - \gamma \dot{\hat{\xi}}_1 \frac{B^T}{B^T B} x - \gamma \hat{\xi}_1 \left(\frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right) = -\gamma \hat{\xi}_1 \left(\Phi k^T \hat{\xi} + \frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right) - \gamma \hat{\xi}_2 \frac{B^T}{B^T B} x.$$

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

$$\begin{cases} \dot{\chi} = \Gamma_0 \hat{\xi} + \hat{\theta} q \hat{\xi}_1 - \mu q \left(\Phi k^T \hat{\xi} + \frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right), \\ \dot{\eta} = -\gamma \hat{\xi}_1 \left(\Phi k^T \hat{\xi} + \frac{B^T}{B^T B} Ax + u \right) - \gamma \hat{\xi}_2 \frac{B^T}{B^T B} x, \\ \hat{\xi} = \chi + \mu q \frac{B^T}{B^T B} x, \\ \hat{\theta} = \eta + \gamma \hat{\xi}_1 \frac{B^T}{B^T B} x. \end{cases} \quad (8)$$

Заключение. Предложен алгоритм вида (20) для оценивания частоты неизмеряемого синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой для линейного стационарного объекта (1).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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, P. 76–87.
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. 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.
4. 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.
5. 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.

V.A. Bezzubov, A.A. Bobtsov, (ITMO University, Saint-Petersburg)

Identification of a Frequency for the Unmeasured Harmonic Signal with Time-Varying Amplitude

In this report 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. Necessary conditions for stability of identification algorithm were formed.