

■ ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ■

УДК 519.7

И. Б. ФУРТАТ, А. Н. НЕХОРОШИХ

(ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ В УСЛОВИЯХ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ ИЗМЕРЕНИЯ**

Рассматривается задача робастного управления электрическим генератором по углу нагрузки при воздействии внешних ограниченных возмущений и наличии высокочастотных помех измерения. Предложенный алгоритм позволяет уменьшить влияние помехи на выходную переменную и компенсирует параметрические неопределенности и внешние возмущения.

Введение. На сегодняшний день предложено большое количество решений задачи управления процессами генерации электроэнергии. Так, на базе нелинейной модели [4, 7, 12] в [10, 14] рассмотрено управление электрическим генератором с шинами бесконечной мощности при кратковременных аварийных ситуациях. В [5] для управления электрическим генератором авторы представляют его модель через гамильтониан системы. В [2] предложен нелинейный адаптивный закон управления генератором, математическая модель которого расширена до системы дифференциальных уравнений седьмого порядка [1], при условии измерения вектора состояния.

Одним из распространенных способов для решения задачи управления в условиях неопределенностей является синтез регуляторов с использованием оценок производных регулируемой переменной на базе наблюдателя с большим коэффициентом усиления. Впервые наблюдатель с большим коэффициентом усиления был предложен в [8, 9] для минимально-фазовых объектов. Данный наблюдатель имеет размерность $\gamma - 1$, где γ – относительная степень объекта управления.

Однако при наличии высокочастотных помех измерений применение наблюдателя с большим коэффициентом усиления может приводить к существенным ошибкам оценки производной регулируемой переменной.

В [6, 13] предложен новый наблюдатель, который является расширением наблюдателя с большим коэффициентом усиления [8] на случай высокочастотных помех измерения. При этом размерность нового наблюдателя равна $2\gamma - 2$.

В настоящей работе рассматривается модель генератора, предложенная в [4, 7, 12]. Предполагается, что начальные условия и параметры генератора неизвестны. Ставится задача робастного управления при условии измерения только угла нагрузки генератора при наличии высокочастотных помех измерения. Цель управления состоит в стабилизации угла нагрузки генератора с заданной точностью. В отличие от [6, 13], для решения задачи предлагается использовать подход, основанный на разделении фильтрующих и оценивающих свойств системы управления в виде двух независимых алгоритмов.

Постановка задачи. Рассмотрим электрический генератор [4, 7, 12], модель которого может быть сведена к виду:

$$Q(p)\delta(t) = k(R(p) + \Delta R(t))(u_f(t) + f(t)); \quad y(t) = \delta(t) + w(t), \quad (1)$$

де $\delta(t)$ – угол поворота ротора относительно синхронной оси вращения, рад; $u_f(t)$ – сигнал управления напряжением возбуждения, отн. ед. (относительные единицы); $f(t)$ – ограниченное по амплитуде возмущающее воздействие, отн. ед.; $w(t)$ – ограниченная по амплитуде высокочастотная помеха измерений, рад; $Q(p)$ – нормированный линейный дифференциальный оператор порядка $n = 4$ с неизвестными коэффициентами; $R(p)$ – нормированный линейный дифференци-

альный оператор порядка $m = 1$ с известными коэффициентами; $\Delta R(t)$ – неизвестная ограниченная функция; $k > 0$; $p = d/dt$. Неизвестные коэффициенты полинома $Q(p)$, значения функции $\Delta R(t)$ и число $k > 0$ принадлежат известному компактному множеству Ξ .

Требуется спроектировать непрерывную систему управления, обеспечивающую выполнение целевого условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\delta(t) - \delta_0| < \varepsilon, \quad (2)$$

где $\varepsilon > 0$ – точность регулирования; δ_0 – требуемое значение угла нагрузки, рад.

Метод решения. Перепишем (1) в виде

$$Q(p)\delta(t) = kR(p)u_f(t) + \phi(t); \quad y(t) = \delta(t) + w(t), \quad (3)$$

где $\phi(t) = k\Delta R(t)u_f(t) + k(R(p) + \Delta R(t))f(t)$ – функция, содержащая в себе неопределенности объекта.

Для выделения сигнала $\delta(t)$ из сигнала $y(t)$ рассмотрим следующий фильтр низких частот:

$$\hat{y}(t) = \frac{1}{\prod_{i=1}^r (\mu\sigma_i p + 1)} y(t), \quad (4)$$

где $\sigma_i > 0$; $\mu > 0$ – малый параметр; r – порядок фильтра; $\hat{y}(t)$ – оценка сигнала $\delta(t)$.

Зададим закон управления в виде [3]

$$u_f(t) = -\alpha \sum_{i=0}^{\gamma-1} d_i \bar{y}^{(i)}(t), \quad (5)$$

где $\alpha > 0$, коэффициенты $d_0, d_1, \dots, d_{\gamma-1}$ выбираются так, чтобы полином $D(\lambda) = d_{\gamma-1}\lambda^{\gamma-1} + d_{\gamma-2}\lambda^{\gamma-2} + \dots + d_1\lambda + d_0$ был гурвицев, $g = n - m$ – относительная степень объекта управления, $\bar{y}^{(i)}(t)$ – оценка i -й производной сигнала $\hat{y}(t)$, $i = 0, 1, \dots, \gamma - 1$.

Подставив (5) в (3), получим

$$F(p)\delta_e(t) = \alpha kR(p)g(t) + \alpha kR(p)D(p)\psi(t) + \phi(t) - f_0\delta_0, \quad (6)$$

где $\delta_e(t) = \delta(t) - \delta_0$ – ошибка стабилизации выходной переменной; $F(p) = Q(p) + \alpha kR(p)D(p)$; $g(t) = D(p)\hat{y}(t) - \sum_{i=0}^{\gamma-1} d_i \bar{y}^{(i)}(t)$; $\psi(t) = \delta(t) - \hat{y}(t)$; f_0 – свободный член оператора $F(p)$. Значение функции $g(t)$ зависит от точности оценивания производных сигнала $\hat{y}(t)$, значение функции $\psi(t)$ – от выбора параметров фильтра (4). Поскольку известно множество Ξ (предположение 1) то всегда существует число α и полином $D(\lambda)$ такие, что полином $F(\lambda)$ будет гурвицевым.

Для реализации закона управления (5) воспользуемся наблюдателем, заданным уравнениями

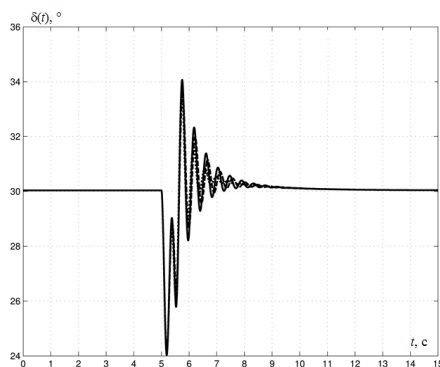
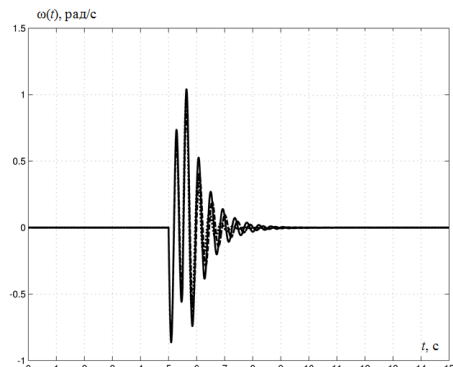
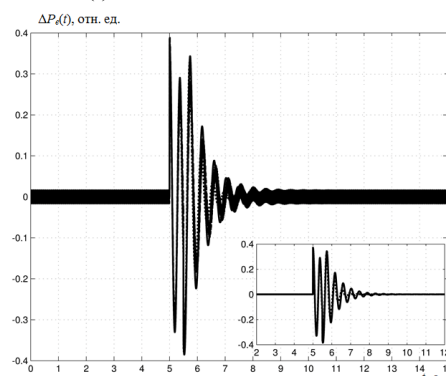
$$\bar{y}(t) = \hat{y}(t), \quad \bar{y}^{(j)}(t) = \frac{\bar{y}^{(j-1)}(t) - \bar{y}^{(j-1)}(t-h)}{h}, \quad j = \overline{1, \gamma-1}, \quad (7)$$

где h – время задержки, с. В результате предложенная система управления включает два независимых алгоритма: алгоритм фильтрации высокочастотной помехи (4) и наблюдатель (7).

Утверждение. Пусть помеха $w(t)$ ограничена по амплитуде, если $r > \gamma$, и ограничена вместе с ее $\gamma - r - 1$ производными, если $r \leq \gamma$. Тогда существуют числа $\alpha > 0$ и $h > 0$ такие, что система управления, состоящая из объекта управления (1), фильтра (4), наблюдателя (7) и закона управления (5), обеспечивает выполнение целевого условия (2) и ограниченность всех сигналов в замкнутой системе. Доказательство утверждения можно провести, опираясь на использование метода Ляпунова-Красовского. Для этого системы (4) и (6) переписываются во фробениусовой нормальной форме так, что вектор состояния каждой системы состоит из выходной переменной ($\hat{y}(t)$ и δ_e соответственно) и ее производных. Затем из этих систем формируется расширенная система, для которой вводится функционал Ляпунова-Красовского. Можно показать, что найдутся числа $\alpha > 0$ и $h > 0$ такие, что производная функционала Ляпунова-Красовского отрицательна и целевое условие (2) выполняется. Подробное доказательство приведено в [11].

На рис. 1–3 приведены переходные процессы электрического генератора [4, 7, 12] по углу ротора $\delta(t)$ относительной угловой скорости $\omega(t)$ и активной мощности $\Delta P_e(t)$. При моделировании рассмотрена аварийная ситуация, связанная с внезапным изменением реактивного сопротивления линии передачи. Продемонстрирована эффективность предложенной схемы (4), (5), (7) (сплошная линия), закона управления (5) и наблюдателя с большим коэффициентом усиления [8] (пунктирная линия), закона управления (5) и наблюдателя с большим коэффициентом усиления в условиях помех измерения [6, 13] (штриховая).

Из рисунков видно, что использование всех схем управления приводит к стабилизации электрогенератора. Переходные процессы по углу ротора и относительной угловой скорости практически идентичны. Однако разница между активной электрической мощностью, вырабатываемой генератором, и механической мощностью, прикладываемой к ротору, в установившемся режиме на порядок меньше при использовании предложенной схемы, нежели при использовании наблюдателя с большим коэффициентом усиления.

Рис. 1. Переходный процесс по $\delta(t)$ Рис. 2. Переходный процесс по $\omega(t)$ Рис. 3. Переходный процесс по $\Delta P_e(t)$

Заключение. На базе модели [4, 7, 12] предложен алгоритм робастного управления по углу ротора в условиях параметрической и функциональной неопределенности модели генератора и при наличии высокочастотных помех измерения. Для синтеза системы управления используется подход, позволяющий независимо управлять качеством фильтрации помехи и точностью

оценивания производных выходной переменной. Приведенный алгоритм прост в реализации, выборе параметров и позволяет компенсировать неопределенности модели генератора с необходимой точностью.

Утверждение получено при поддержке гранта РФФ № 14-29-00142 в ИПМаш РАН. Другие части работы проводилась при поддержке гранта Президента Российской Федерации (договор № 14.W01.16.6325-МД (МД-6325.2016.8)), грантов РФФИ (16-08-00282, 16-08-00686), гранта МОН РФ (проект 14.Z50.31.0031) и гранта Правительства РФ (074-U01).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов В.Н., Шашихин В.Н.** Синтез координирующего робастного управления взаимосвязанными синхронными генераторами // *Электричество*. 2009. № 9. С. 20–26.
2. **Кузьменко А.А.** Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // *Изв. РАН. ТиСУ*. 2008. № 1. С. 112–119.
3. **Фуртат И.Б.** Робастный статический алгоритм управления линейными объектами // *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 3. С. 94–107.
4. **Anderson P.M., Fouad A.A.** Power system control and stability // Iowa: Iowa State University Press. 1977. 658 p.
5. **Astolfi A., Galaz M., Ortega R. et al.** Transient stabilization of multimachine power systems with nontrivial transfer conductance // *IEEE Trans. On Automatic Control*. 2005. Vol. 50. № 1. P. 60–75.
6. **Astolfi D., Marconi L.** A high-gain nonlinear observer with limited gain power // *IEEE Trans. Automatic Control*. 2015. Vol. 60. № 11. P. 3059–3064.
7. **Bergan A.R.** Power Systems Analysis // New Jersey: Prentice Hall. 1986. 529 p.
8. Esfandiari F., Khalil H.K. Output feedback stabilization of fully linearizable systems // *International Journal of Control*. 1992. Vol.56. №5. P. 1007–1037.
9. **Gauthier J., Hammouri H., Othman S.** A simple observer for nonlinear systems application to bioreactors // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1992. Vol.37. №6. P. 875–880.
10. **Guo Y., Hill D.J., Wang Y.** Global transient stability and voltage regulation for power systems // *IEEE Trans. on Power Systems*. 2001. Vol. 16. № 4. P. 678–688.
11. **Nekhoroshikh A., Furtat I.** Robust Stabilization of Linear Plants under Uncertainties and High-Frequency Measurement Noises // *Proc. of the 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017, Valletta, Malta. (in print)*
12. **Pai M.A.** Power system stability // N. Y.: North Holland. 1981. 251 p.
13. **Wang L., Astolfi D., Hongye S., Marconi L., Isidori A.** Output stabilization for a class of nonlinear systems via high-gain observer with limited gain power // *Proc. 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, MICNON 2015, Saint Petersburg, Russia. IFAC-PapersOnLine*. Vol. 48. № 11. P. 730–735.
14. **Wang Y., Xie L., Hill D.J., Middleton R.H.** Robust nonlinear controller design for transient stability enhancement of power systems // *Proc. of the 31st Conf. on Decision and Control. Arizona*. 1992. P. 1117–1122.

Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N. (IPME RAS, ITMO University, St.-Petersburg). **Control of electric generator under high-frequency measurement noises.**

Abstract. The problem of robust control of an electric generator with respect to the loading angle under parametric uncertainties, external disturbances and the presence of high-frequency measurement noise is considered. The proposed algorithm allows to reduce the effect of high-frequency noise and also to compensate parametric uncertainties and external disturbances.