

Р. С. ВОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук, ДДТУ, Днепродзержинск;
А. В. САДОВОЙ, д-р техн. наук, проректор, ДДТУ, Днепродзержинск

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ОБОБЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЕМ НАБЛЮДАЕМОСТИ

Обзор работ, посвященных использованию методов линеаризации нелинейных уравнений, показал преимущества и недостатки линеаризации обратными связями по выходу и определил цель исследования. Для достижения поставленной цели уравнения движения обобщенного электромеханического объекта в псевдоаффинной форме дополнены уравнениями фильтра в матричной форме. Путем использования методов дифференциальной геометрии обоснована структура и параметры линеаризующего регулятора.

Ключевые слова: линеаризация обратными связями, динамическая система, нелинейный электромеханический объект, линеаризующий регулятор

Введение. В настоящее время одним из самых эффективных методов линеаризации нелинейных объектов, который не приводит к пренебрежению их уникальными свойствами, является линеаризация обратными связями. Совершенствованию и использованию этого метода посвящено большое количество работ как на территории бывшего СССР [1–5], так и во всем мире [6–10].

Общим недостатком указанных работ является предположение о алгебраической зависимости выходной измеряемой координаты от переменных состояния объекта. Это предположение является весьма грубым, поскольку в реальных технических системах сигналы, получаемые с датчиков, подвергаются фильтрации, а неподдающиеся непосредственному измерению координаты восстанавливаются при помощи наблюдающих устройств. Процесс фильтрации и наблюдения описывается дифференциальными уравнениями и сопровождается не только изменением амплитуды сигнала, но и вносит запаздывание. Пренебрежение этими факторами на этапе математического описания динамики объекта управления может привести к снижению запаса устойчивости замкнутой системы и вызвать возникновение слабодемпфированных колебаний. Поэтому работа, устраняющая указанные недостатки, является актуальной.

Цель работы. Целью работы является определение линеаризующего управляющего воздействия для обобщенной электромеханической системы (ЭМС) с фильтрованием сигнала обратной связи по регулируемой координате.

Методика исследования нелинейных ЭМС. Динамику обобщенной полностью управляемой электромеханической системы с одним входом в общем случае можно описать нелинейными дифференциальными уравнениями, представленными в нормальной форме в матричном виде [9]

$$pY = F(Y, u), \quad (1)$$

где $Y = (y_1 \dots y_n)^T$ - вектор переменных состояния, n - порядок системы управления, u - управляющее воздействие, F - вектор функций, описывающих

динамику системы управления.

Поскольку линеаризация обратными связями разработана для аффинных систем, представим уравнения (1) в псевдоаффинной форме

$$p\mathbf{Y} = \Phi(\mathbf{Y}, u) + \mathbf{G}u, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{G} = (0 \ \dots \ 0 \ 1)^T, \quad \Phi = (f_1(\mathbf{Y}, u) \ \dots \ f_{n-1}(\mathbf{Y}, u) \ f_n(\mathbf{Y}, u) - u)^T. \quad (3)$$

Дополним уравнение (2) дифференциальным уравнением наблюдаемости

$$p^k \hat{y}_j = H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (4)$$

где k - порядок дифференциального уравнения, описывающего динамику наблюдающего устройства, $H_d(\cdot)$ - некоторая дифференциальная зависимость, описывающая динамику наблюдающего устройства, $\hat{\mathbf{Y}}$ - вектор переменных состояния наблюдателя j -ой координаты

$$\hat{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} \hat{y}_j & p\hat{y}_j & \dots & p^{k-1}\hat{y}_j \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Представим дифференциальное уравнение (4) в виде системы k -го порядка

$$p\hat{y}_i = \hat{y}_{i+1}; \quad i = j, \dots, k-1, \quad p\hat{y}_k = H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (6)$$

Или

$$p\hat{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (7)$$

где

$$\tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) = \begin{pmatrix} \hat{y}_j & \dots & \hat{y}_{k-1} & H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) \end{pmatrix}^T. \quad (8)$$

Уравнения (7) позволяют сформулировать следующую теорему: *Дифференциальные уравнения наблюдаемости (7) являются обобщением известного уравнения наблюдаемости*

$$\hat{y}_j = H_a(\mathbf{Y}) \quad (9)$$

и позволяют путем введения производных от задающего воздействия расширить класс управляющих воздействий, линеаризующих динамику исходного нелинейного электромеханического объекта.

В уравнении (9) $H_a(\cdot)$ - алгебраическая зависимость, определяющая взаимосвязь переменных состояния объекта с наблюдаемой координатой.

В качестве доказательства линеаризуем динамическую систему, которая описывается уравнениями (2) и (4) по выходу. Для этого найдем полную производную правой части последнего уравнения системы (6)

$$p\left(p\hat{y}_k\right) = p^{k+1}\hat{y}_j = p H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} p\mathbf{Y} + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\hat{\mathbf{Y}}} p\hat{\mathbf{Y}}. \quad (10)$$

С учетом правых частей уравнений (2) и (7) выражение (10) примет вид

$$p^{k+1} \hat{y}_j = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \Phi(\mathbf{Y}, u) + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \mathbf{G}u + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\hat{\mathbf{Y}}} \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) \quad (11)$$

Слагаемые правой части уравнения (11) представляют собой производные Ли, которые определяются выражениями

$$L_{\Phi} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \Phi(\mathbf{Y}, u); \quad L_{\mathbf{G}} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \mathbf{G}; \quad (12)$$

$$L_{\tilde{\mathbf{H}}_d} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}).$$

С учетом производных Ли (12) уравнение (11) будет

$$p^{k+1} \hat{y}_j = L_{\Phi} H_d + L_{\mathbf{G}} H_d u + L_{\tilde{\mathbf{H}}_d} H_d. \quad (13)$$

Как и в известном случае алгебраического уравнения наблюдаемости (9), линеаризация обратными связями по выходу при использовании дифференциального уравнения наблюдаемости (7) сводится к рекурсивному r -кратному дифференцированию уравнения (11). Условием прекращения дифференцирования является ненулевая производная Ли $L_{\mathbf{G}} H_d$, определяющая влияние управляющего воздействия u на $r+k$ -ую производную наблюдаемой величины. При этом уравнение (13) примет вид

$$p^{r+k} \hat{y}_j = \sum_{i=1}^r L_{\Phi}^i H_d + \sum_{i=1}^r L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^i H_d + \sum_{i,j=1}^{r-1} L_{\Phi}^i L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^j H_d + \sum_{i,j=1}^{r-1} L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^j L_{\Phi}^i H_d + L_{\mathbf{G}} L_{\Phi}^{r-1} H_d u. \quad (14)$$

Второе, третье и четвертое слагаемые уравнения (14) определяются компонентами матрицы $\tilde{\mathbf{H}}_d$, которые в силу выражения (8) зависят от траекторий движения наблюдающего устройства. Таким образом, в отличие от классической линеаризации обратными связями по выходу в рассматриваемом случае вводится не только новое управляющее воздействие v , заменяющее r -ую производную от наблюдаемой величины

$$p^r \hat{y}_j = v, \quad (15)$$

но и ряд производных от нового управляющего воздействия

$$p^{r+i} \hat{y}_j = p^i v; \quad i = 1, \dots, k. \quad (16)$$

Подстановка производных (15) и (16) в уравнение (14) и выполнение соответствующих алгебраических преобразований, позволяет представить уравнение (14) следующим образом

$$p^k v = W(\mathbf{Y}, u, \mathbf{V}), \quad (17)$$

где $W(\cdot)$ - результат преобразования правой части уравнения (14)

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v & pv & \dots & p^{k-1}v \end{pmatrix}^T. \quad (18)$$

Решение уравнения (17) относительно управляющего воздействия u будем искать в виде

$$u = W^{-1}(Y, V, p^k v) \quad (19)$$

или с учетом матрицы (18)

$$u = W^{-1}(y_1, \dots, y_n, v, pv, \dots, p^k v). \quad (20)$$

В отличие от классической линеаризации обратными связями, полученное управляющее воздействие зависит от n переменных состояния рассматриваемого объекта и k первых производных от задающего воздействия v . Теорема доказана.

Следствие теоремы: Если наблюдающее устройство, определяющее регулируемую координату электромеханического объекта, является инерционным и описывается системой k дифференциальных уравнений, то для компенсации этой инерционности в состав линеаризующего регулятора помимо звеньев, выполняющих алгебраические операции, должны быть включены k дифференцирующих звена.

Обсуждение результатов использования предложенной методики. В качестве примера линеаризуем обобщенный электромеханический объект первого порядка с апериодическим звеном первого порядка в канале обратной связи по скорости.

Дифференциальное уравнение объекта управления имеет вид

$$T_m p \omega + \omega = u / c, \quad (21)$$

где T_m - электромеханическая постоянная времени, c - конструктивный коэффициент, ω - скорость двигателя, u - напряжение питания.

Сигнал в канале обратной связи формируется в соответствии с уравнением

$$T p \hat{\omega} + \hat{\omega} = K \omega, \quad (22)$$

где T и k - постоянная времени и коэффициент передачи фильтра в канале обратной связи. Представим уравнения (21) и (22) в нормальной форме

$$p \omega = -\frac{1}{T_m} \omega + \frac{1}{T_m c} u; \quad (23)$$

$$p \hat{\omega} = -\frac{1}{T} \hat{\omega} + \frac{K}{T} \omega \quad (24)$$

и ввиду малости порядка объекта управления рассмотрим упрощенную процедуру синтеза линеаризующего регулятора без использования матричного исчисления и дифференциальной геометрии.

Для определения нового управляющего воздействия v продифференцируем уравнение (24)

$$p^2 \hat{\omega} = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} + \frac{K}{T} p \omega. \quad (25)$$

С учетом зависимостей (23) и (24) уравнение (25) преобразуем следующим образом

$$p^2 \hat{\omega} = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} + \frac{K}{T} \left(-\frac{1}{T_m} \omega + \frac{U}{T_m c} \right) = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} - \frac{K}{T_m T} \omega + \frac{K}{T_m T c} u. \quad (26)$$

Введем новое управляющее воздействие

$$p\hat{\omega} = v \quad , \quad p^2\hat{\omega} = pv \quad (27)$$

С учетом производных (27) уравнение (26) примет вид

$$pv = -\frac{1}{T}v - \frac{K}{T_m T}\omega + \frac{K}{T_m T_c}u. \quad (28)$$

Решив уравнение (28) относительно управляющего воздействия u , получим

$$u = \frac{T_m T_c}{K}pv + \frac{T_m c}{K}v + c\omega = c\omega + T_m c \frac{Tp+1}{K}v. \quad (29)$$

Анализ выражения (29) показывает наличие во втором слагаемом передаточной функции, обратной передаточной функции фильтра. Благодаря этому слагаемому в синтезированной системе осуществляется формирование

форсирующего воз-
действия, компен-
сирующего инер-
ционность филь-
тра. Структурная
схема системы управления, ко-
торая построена на
основании алго-
ритма (29), приве-
дена на рис. 1.

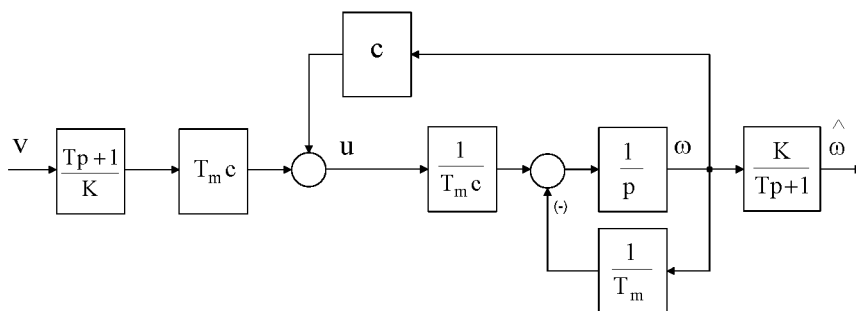


Рис. 1 – Структурная схема синтезированной системы управления

Обобщая результаты,

приведенные в рассматриваемом примере можно утверждать, что:

1. Синтезированный линеаризующий регулятор за счет положительной обратной связи по скорости компенсирует внутреннюю обратную двигателя;
2. Компенсация инерционности фильтра в канале обратной связи по скорости осуществляется дифференцированием задающего воздействия v ;
3. Синтезированный линеаризующий регулятор соответствует принципу симметрии систем автоматического управления;

Выводы. Приведенные в работе выкладки позволяют сделать вывод, что учет на этапе составления математического описания объекта управления неидеальностей каналов обратной связи позволяет повысить качество процессов управления электромеханическими объектами путем введения в алгоритм управления компенсирующих связей и составляющих.

Список литературы: 1. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст]/ Д. П. Ким. - М.: Физматлит, 2004.-464с. 2. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 5. Методы современной теории автоматического управления [Текст]/ Н. Д. Егунов, К. А. Пупков. - М.: Бауманпресс, 2004.-748с. 3. Борисевич, А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB/ А. В. Борисевич - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 200 с. 4. Афанасьев, В. Н. Гарантированное управление нелинейными системами, линеаризуемыми обратной связью/В. Н. Афанасьев// Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды X Международной Четаевской конференции, Казань, 12-16 июня 2012 г.. Т. 3.3: Управление. Ч. 1. Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. С. 156-168. 5. Сулов, В. Ф. Синтез астатических регуляторов многосвязных нелинейных объектов, линеаризуемых обратной связью [Текст]/ В.Ф. Сулов, М. С. Катков, О. В. Надеждин// Морской вестник. Спб.: МорВест, 2005.- №3(15). -С.53-55. 6. Piltan, F. Design Novel Fuzzy Robust Feedback Linearization

Control with Application to Robot Manipulator/*Farzin Piltan, Mohammad Hossain Yarmahmoudi, Mina Mirzaie, Sara Emamzadeh, Zahra Hivand*// International Journal of Intelligent Systems and Applications. - 2013.- Vol 5, Iss 5, P. 1-10. 7. *Belkacem, S.* Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization/ *Belkacem Sebti, Nacéri Farid, Abdessemed Rachid*// Serbian Journal of Electrical Engineering.-2011.-Vol 8, Iss 2, Pp 97-110. 8. *Xiao-jing, S.* Design and Simulation of PMSM Feedback Linearization Control System/ *Song Xiao-jing*// TELKOMNIKA : Indonesian Journal of Electrical Engineering.-2013.- Vol 11, Iss 3, P. 1245-1250. 9. *Mchiri, M.* Observer Based Feedback Linearization Control of an Under-actuated Biped Robot/ *Mchiri Mohamed, Trabelsi Karim*//International Journal of Engineering Trends and Technology.-2013.- Vol 4, Iss 5, P.1899-1907. 10. *Sajedi, S.* A New Approach to Dynamic Control of Synchronous Generator in a Bulk Electric Power System by Direct Feedback Linearization/ *S. Sajedi, F. Khalifeh, T. Karimi, Z. Khalifeh*// Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. -2011.-Vol 3, Iss 11, P.1239-1245.

Bibliography (transliterated): 1. *Kim, D.* (2004) Theory of automated control. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems. Moscow: Fizmatlit, 464. 2. *Pupkov, K.* (2004) Methods of classical and modern automated control theory. Vol.5. Methods of modern automated control theory. Moscow: BaumanPress, 748 3. *Borisevich, A.* (2011) Theory of automated control: elementary introduction with MatLab using. Sankt-Peterburg: Polytechnical university Publ., 200 4. *Afanasiev, V.* (2012) Guaranteed control of nonlinear systems, linearizability feedback Analytical mechanics, stability and control. Proc. X International Chetaev's conference. Kazan, 12-16 June 2012 Vol. 3.3: Control. Part 1, 156-168. 5. *Suslov, V.* (2005) Synthesis astatic controllers of multiply nonlinear objects linearizable feedback. Morskoy vestnik, №3(15), 53-55. 6. *Piltan, F.* (2013) Design Novel Fuzzy Robust Feedback Linearization Control with Application to Robot Manipulator. Int. J. of Intelligent Systems and Applications, 5, 5, 1-10. 7. *Belkacem, S.* (2011) Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization. Serbian Journal of Electrical Engineering, 8, 2, 97-110. 8. *Xiao-jing, S.* (2013) Design and Simulation of PMSM Feedback Linearization Control System. TELKOMNIKA: Indonesian Journal of Electrical Engineering, 11, 3, 1245-1250. 9. *Mchiri, M.* (2013) Observer Based Feedback Linearization Control of an Under-actuated Biped Robot. Int. J. of Engineering Trends and Technology, 4, 5, 1899-1907. 10. *Sajedi, S.* A (2011) New Approach to Dynamic Control of Synchronous Generator in a Bulk Electric Power System by Direct Feedback Linearization Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3, 11, 1239-1245

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 621.311.1.05

В. М. КУТІН, д-р техн. наук, проф., ВНТУ, Вінниця;

О. Є. РУБАНЕНКО, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця;

С. В. МИСЕНКО, інженер, ДП «НЕК «Укренерго» ВП «Південно-Західна ЕС», Вінниця

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розглянуто існуючі методи та засоби для визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів. Обґрунтовано необхідність вдосконалення методів та засобів технічного діагностування високовольтних вимикачів для підвищення їх надійності в умовах експлуатації. Запропоновано комплексний метод діагностування високовольтних елегазових вимикачів, який враховує контроль струму тестового сигналу, як інтегрального показника при визначенні технічного стану його конструктивних елементів.

Ключові слова: комплексний метод, інтегральний показник, тестовий сигнал, діагностування, сенсор, резонанс

© В. М. КУТІН, О. Є. РУБАНЕНКО, С. В. МИСЕНКО, 2014