DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-198-204
УДК 621.313.12

Н.А. Доброскок, О.В. Мохова
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «КГНЦ», Санкт-Петербург, Россия

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ, РАБОТАЮЩИМ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Рассматривается вопрос о возможности повышения качества формирования импульсной последовательности тока на выходе генератора постоянного тока с независимым возбуждением для создания сильного импульсного магнитного поля. Генератор располагается на одном валу с разгонным асинхронным двигателем и приводным синхронным двигателем и входит в состав импульсного источника тока большой мощности. Ввиду наличия нелинейностей в математическом описании объекта и широкого диапазона изменения значений формируемого тока предложен вариант прямой беспоисковой нелинейной адаптивной системы управления с эталонной моделью с известными функциями роста с алгоритмами сигнальной настройки, позволяющей воспроизводить с высокой точностью программно заданную импульсную последовательность.

Ключевые слова: импульсный источник тока большой мощности, генератор постоянного тока с независимым возбуждением, адаптивная система управления.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-198-204
UDC 621.313.12

N. Dobroskok, O. Mokhova
TSNII SET branch of KSRC, St. Petersburg, Russia

ADAPTIVE CONTROL OF SEPARATELY EXCITED DC GENERATOR WORKING IN PULSE MODE

This paper discusses the possibility of improving output current pulse pattern of separately excited DC generator to obtain a strong pulsing magnetic field. The generator has a common shaft with its accelerating synchronous motor and forms a part of heavy-duty pulsing power supply. In view of the non-linearities in the mathematical description of the object, as well as due to wide variation range of obtained current, this paper suggests a variant of direct search-free non-linear adaptive control system with the reference model that will feature known growth functions with signal tuning algorithms, which will provide for high-fidelity reproduction of software-defined pulse pattern.

Keywords: heavy-duty pulsing power supply, separately excited DC generator, adaptive control system.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Одним из основных требований к качеству импульсных источников питания, в частности импульсных источников тока (ИИТ) большой мощности, является высокая точность воспроизведения импульсного тока в нагрузке, обуславливающего формирование сильного импульсного магнитного поля, которое предназначено для электромагнитной обработки судов. Для выполнения данного требования решается ряд задач, связанных с определением структуры ИИТ, способного прецизионно воспроизводить программно заданную импульсную последовательность тока нагрузки, состоящую из разнополярных импульсов

Для цитирования: Доброскок Н.А., Мохова О.В. Адаптивное управление генератором постоянного тока с независимым возбуждением, работающим в импульсном режиме. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; Специальный выпуск 2: 198–204.
For citations: Dobroskok N.A., Mokhova O.V. Adaptive control of separately excited DC generator working in pulse mode. Transactions of the Krylov State Research Center. 2019; Special Edition 2: 198–204 (*in Russian*).

трапецеидальной формы с заданными параметрами и законом убывания их амплитуды. При этом выбор структуры должен быть согласован с параметрами первичного источника электроэнергии. В работе рассмотрен случай сети бесконечной мощности. Полагаем, что в случае, когда мощность первичного источника электроэнергии недостаточна для формирования импульсов максимальной амплитуды либо динамические характеристики набора мощности не соответствует параметрам импульсной последовательности, в структуру ИИТ возможно ввести накопитель энергии.

На основании результатов предварительных исследований выбран электромеханический вариант исполнения ИИТ большой мощности, поэтому в данной работе рассматривается трехмашинный агрегат, состоящий из механически связанных разгонного асинхронного двигателя (РАД), приводного синхронного двигателя (СД) и генератора постоянного тока с независимым возбуждением (ГПТ НВ) с двумя обмотками возбуждения (ОВ). Существующие аналоги электромеханических ИИТ большой мощности позволяют создавать импульсную последовательность тока с точностью в несколько процентов от амплитуды текущего импульса, однако для минимизации времени и повышения качества электромагнитной обработки судов требуется точность порядка долей процента от амплитуды формируемого импульса. Стоит отметить, что решение задачи обеспечения такой точности напрямую связано с возможностями средств измерения силы постоянного электрического тока, которые в ограниченном диапазоне условий окружающей среды позволяют получить значение абсолютной статической погрешности, составляющее единицы ампер при измерении тока величиной несколько килоампер. При составлении математического описания исследуемого объекта должны быть учтены особенности его конструкции и обусловленные ими нелинейности различного рода, а также широкий диапазон изменения значения формируемого тока. Поэтому в качестве системы управления предложена прямая беспоисковая нелинейная адаптивная система управления с известными функциями роста с эталонной моделью с алгоритмом сигнальной настройки, которая позволяет обеспечить требуемое качество формирования выходного тока ГПТ НВ.

Работа ИИТ большой мощности, функциональная схема которого представлена на рис. 1, состоит из подготовительного и рабочего этапов.

Подготовительный этап подразумевает под собой разгон ИИТ большой мощности от неподвижного состояния до синхронной скорости согласно следующему алгоритму: приведение во вращение за счет РАД; подача питания на ОВ СД, работающего в генераторном режиме, при достижении половины от номинальной скорости вращения системы; синхронизация СД, работающего в генераторном режиме, с сетью с использованием синхронизирующего устройства; подача питания на трехфазную обмотку статора СД, работающего в генераторном режиме; переход СД, работающего в генераторном режиме, в двигательный режим; вхождение СД в синхронизм; отключение питания РАД.

В течение рабочего этапа решаются две задачи. Первая – стабилизация скорости вращения системы посредством управления ОВ СД по сигналу обратной связи от датчика положения ротора при питании статорной обмотки от сети бесконечной мощности. Вторая – воспроизведение с высокой точностью программно заданной импульсной последовательности тока нагрузки, состоящей из разнополярных импульсов трапецеидальной формы с заданными значениями длительностей фронта $T_ф$, поддержания вершины $T_в$, среза $T_с$ импульса, паузы между импульсами $t_п$, в соответствии с экспоненциальным законом убывания амплитуды A импульсов посредством управления ОВ ГПТ НВ по сигналу обратной связи от датчика тока якорной цепи.

В рамках исследования процессов ИИТ большой мощности в импульсном режиме работы допускается, что система на момент начала формирования выходной последовательности тока вращается со стабилизированной синхронной скоростью.

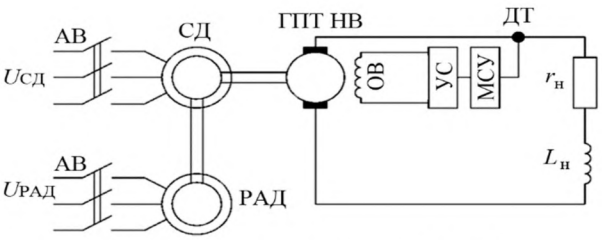


Рис. 1. Функциональная схема ИИТ большой мощности: АВ – автоматический выключатель; ДТ – датчик тока; УС – устройство стабилизации; МСУ – микропроцессорная система управления; $U_{СД}$ – напряжение питания статора приводного СД; $L_н$, $r_н$ – индуктивность и активное сопротивление нагрузки соответственно

Fig. 1. Functional layout of heavy-duty pulsing power supply: АВ – automatic switch; ДТ – current gauge; УС – stabilizer; МСУ – microchip-based control system; $U_{СД}$ – stator feed voltage of synchronous drive; $L_н$, $r_н$ – inductance and active resistance of load respectively.

Синтезу системы автоматического управления предшествует составление математического описания ГПТ НВ. Представление экспериментальной характеристики холостого хода (ХХХ) генератора в виде непрерывной функции может быть произведено путем аппроксимации зависимости электродвижущей силы (ЭДС) $E_я$ от тока возбуждения $i_{ОВ}$ полиномом вида

$$E_я\left(i_{ОВ}\right) = f_{xxx}\left(i_{ОВ}\right) = \\ = a_1 i_{ОВ} + a_3 i_{ОВ}^3 + a_5 i_{ОВ}^5 + a_7 i_{ОВ}^7 + a_9 i_{ОВ}^9. \quad (1)$$

На основании [1] параметры кривой намагничивания (КН) могут быть рассчитаны через значения ЭДС:

$$f_{КН}(i_{ОВ}) = \frac{p_г}{30 c_э} \cdot \frac{E_я}{\left(w_{ОВ} + k_{тр} w_{ОВД}\right)} \cdot \frac{1}{\omega} = \\ = \frac{k_{ОВ}}{\left(w_{ОВ} + k_{тр} w_{ОВД}\right)} \cdot \frac{E_я}{\omega}, \quad (2)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трансформации, учитывающий соотношение числа витков основной ОВ $w_{ОВ}$ и дополнительной ОВ (ОВД) $w_{ОВД}$; $p_г$ – число пар полюсов; $c_Э$ – конструктивная постоянная ЭДС; ω – угловая частота вращения ИИТ большой мощности.

Будем полагать, что при формировании фронта и полки первого из пары разнополярных импульсов ЭДС будет изменяться по основной КН, полученной полиномиальной аппроксимацией экспериментальной ХХХ (1). Далее вплоть до момента окончания формирования этой пары ЭДС определяется гистерезисной кривой ГПТ НВ, математическое описание которой получено на основе $T(x)$-модели Такакса [2]. Следовательно, процесс изменения $E_я$ для любой пары импульсов можно представить в виде системы уравнений

$$E_я(t) = f_г(i_{ОВ}) = E_{я\max} \times \\ \times \begin{cases} f_{XXX}(x_s), \ (t \le T_ф) \wedge (j = 1); \\ f_{XXX}(x_{\max} i_{ОВ\ \max}) \dfrac{\left(x_s + x_n\right)}{\left(x_{\max} + x_n\right)}, \\ (t \le ((j-1)T + T_ф)) \wedge (j > 1); \\ \tanh(x_s + a_0) - b, \\ (t > ((j-1)T + T_ф)) \wedge (t \le (j-1)T + 0{,}5T + T_ф); \\ \tanh(x_s - a_0) + b, \\ (t > ((j-1)T + 0{,}5T + T_ф)) \wedge (t \le (j-1)T + T), \end{cases} \quad (3)$$

где

$$x_s = \frac{i_{ОВ}(t)}{i_{ОВ\ \max}}; \ x_{\max 0} = A; \ x_{\max} = -A;$$

$$b = \frac{x_{\max} - x_s}{x_{\max 0} - x_{\max}} \cdot \operatorname{sign}(x_{\max}) \times \\ \times \left(\frac{f_{xxx}(i_{ов}(t)}{E_{я\max}} - \tanh(x_{\max 0} - \operatorname{sign}(x_{\max}) a_0) \right) + \quad (4) \\ + \left(1 - \frac{x_{\max} - x_s}{x_{\max 0} - x_{\max}} \right) \operatorname{sign}(x_{\max}) \times \\ \times \left(\frac{f_{xxx}(i_{ов}(t)}{E_{я\max}} - \tanh(x_{\max} - \operatorname{sign}(x_{\max}) a_0) \right);$$

где $i_{ОВ\max}$, $E_{я\max}$ – номинальные значения тока возбуждения и ЭДС генератора соответственно; x_S – нормированное значение тока возбуждения; x_{max0} – значение исходной (предыдущей) вершины петли гистерезиса, которая в зависимости от знака производной тока якоря принимает либо положительное значение амплитуды текущей пары импульсов A (нисходящая кривая петли гистерезиса), либо отрицательное (восходящая кривая петли гистерезиса); x_{max} – значение конечной (текущей) вершины петли гистерезиса; a_0, b – коэффициенты, характеризующие коэрцитивную силу и остаточную намагниченность соответственно и принимающие значения от 0 до 1; x_n – нормированное значение точки пересечения нисходящей кривой оси абсцисс текущей пары импульсов; j – номер текущей пары импульсов.

Математическая модель ГПТ НВ с двумя ОВ с учетом явления магнитного гистерезиса (3) может быть представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений относительно тока возбуждения $i_{ОВ}$ и тока якоря $i_я$:

$$\frac{dx_1}{dt} = c_{12} u_{ОВ} - c_{11} f_г'(x_1) - a_{11} x_1; \\ \frac{dx_2}{dt} = c_{21} f_г(x_1) - a_{22} x_2, \quad (5)$$

где

$$x_1 = i_{ОВ}; \ x_2 = i_я; \ a_{11} = \frac{r_{ОВ} + r_{ОВД}}{(L_{ОВ} + L_{ОВД})}; \\ c_{11} = \frac{k_{ОВ}(w_{ОВ} + k_{тр} w_{ОВД})}{\omega_0 (L_{ОВ} + L_{ОВД})}; \ c_{12} = \frac{1}{(L_{ОВ} + L_{ОВД})}; \quad (6) \\ a_{22} = \frac{r_я + r_н}{L_я + L_н}; \ c_{21} = 1/\left(L_я + L_н\right).$$

При этом функция

$$E_я'(t) = f_г'(i_{ОВ}) = \left(E_{я\max} / i_{ОВ\ \max}\right) \times$$

$$\times \begin{cases} f_I' = \begin{cases} a_1 + 3a_3 x_s^2 + 5a_5 x_s^4 + 7a_7 x_s^6 + 9a_9 x_s^8, \\ (t \le T_ф) \wedge (i = 1); \\ f_{XXX}(x_{\max} i_{ов\ \max}) \left(\dfrac{1}{(x_{\max} + x_n)} + \right. \\ \left. + \dfrac{x_n}{(x_{\max} + x_n)} \right), \\ (t \le ((i-1)T + T_ф)) \wedge (i > 1); \end{cases} \\ f_{II}' = \operatorname{sech}^2(x_s + a_0), \\ (t > ((i-1)T + T_ф)) \wedge (t \le (i-1)T + 0{,}5T + T_ф); \\ f_{III}' = \operatorname{sech}^2(x_s - a_0), \\ (t > (i-1)T + 0{,}5T + T_ф)) \wedge (t \le (i-1)T + T) \end{cases} \quad (7)$$

получена путем взятия производной от (3).

Матричная форма записи (5) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)u, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{A}(\mathbf{x},t) = \begin{bmatrix} -a_{11} - c_{11} f_{г2}(x_1) & 0 \\ c_{21} f_{г1}(x_1) & -a_{22} \end{bmatrix}; \ \mathbf{B}(\mathbf{x},t) = \begin{bmatrix} c_{12} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

При этом $f_{г1}(x_1)$ и $f_{г2}(x_1)$ выведены за счет вынесения x_1 из $f_г(x_1)$ (3) и $f_г'(x_1)$ (7) соответственно.

В связи с наличием в $f_{г1}(x_1)$ и $f_г'(x_1)$ тригонометрических функций в виде гиперболического тангенса $\tanh(x)$ и косеканса $\operatorname{sech}^2(x)$ при

$$x = x_s \pm a_0 = \left(x_1 / x_{1\max}\right) - \operatorname{sign}(x_{\max}) a_0, \quad (10)$$

для $f_{г1}(x_1)$ и $f_{г2}(x_1)$ в работе допускается использование разложения указанных функций в степенной ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} \tanh(x) &= x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7; \\ \operatorname{sec h}^2(x) &= 1 - x^2 + \frac{2}{3}x^4 - \frac{17}{45}x^6 + \frac{41}{320}x^8. \end{aligned} \quad (11)$$

Если учесть (3), (7) и (11) с (10), тогда $f_{г1}(x_1)$ и $f_{г2}(x_1)$ могут быть описаны с помощью следующих систем уравнений:

$$E_я(t) = f_г(x_1) = x_1 f_{г1}(x_1) =$$

$$= x_1 \times \begin{cases} f_{I(1)} = \begin{cases} a_1 + a_3 x_1^2 + a_5 x_1^4 + a_7 x_1^6 + a_9 x_1^8, \\ (t \le T_ф) \wedge (i = 1); \\ E_{я\max} f_{XXX}(x_{\max} i_{ОВ\ \max}) \left(1/(x_{\max} + x_n)\right), \\ (t \le ((i-1)T + T_ф)) \wedge (i > 1); \end{cases} \\ f_{II(1),III(1)} = E_{я\max} \left[\dfrac{1}{x_{1\max}} \left(2 - a_0^2 + \dfrac{2}{3}a_0^4 - \dfrac{17}{45}a_0^6\right) + \right. \\ + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1}{x_{1\max}^2} \left(a_0 - \dfrac{4}{3}a_0^3 + \dfrac{17}{15}a_0^5\right) + \\ + \dfrac{x_1^2}{x_{1\max}^3} \left(-\dfrac{1}{3} + \dfrac{4}{3}a_0^2 - \dfrac{595}{3}a_0^4\right) + \\ + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1^3}{x_{1\max}^4} \left(\dfrac{2}{3}a_0 - \dfrac{4}{3}a_0^3 + \dfrac{595}{315}a_0^5\right) + \\ + \dfrac{x_1^4}{x_{1\max}^5} \left(\dfrac{2}{15} - \dfrac{357}{315}a_0^2\right) + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1^8}{x_{1\max}^6} \left(\dfrac{17}{45}a_0\right) + \\ + \dfrac{x_1^6}{x_{1\max}^7} \left(\dfrac{17}{45}a_0\right) + 3a_3 x_1 + 5a_5 x_1^3 + 7a_7 x_1^5 + 9a_9 x_1^7 + \\ + \dfrac{1}{x_{1\max}(x_{\max} + x_n)} \times \left(\tanh(x_{\max} - \operatorname{sign}(x_{\max}) a_0) - \right. \\ \left. \left. - \tanh(x_{\max 0} - \operatorname{sign}(x_{\max}) a_0)\right)\right] \\ (t > ((i-1)T + T_ф)) \wedge (t \le (i-1)T + T_ф). \end{cases} \quad (12)$$

$$E_я'(t) = f_г'(x_1) = x_1 f_{г2}(x_1) =$$

$$= x_1 \times \begin{cases} f_{I(1)}' = \begin{cases} 3a_3 x_1 + 5a_5 x_1^3 + 7a_7 x_1^5 + 9a_9 x_1^7, \\ (t \le T_ф) \wedge (i = 1); \\ 0, \ (t \le ((i-1)T + T_ф)) \wedge (i > 1); \end{cases} \\ f_{II(1),III(1)}' = E_{я\max} \times \\ \times \left[\operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{1}{x_{1\max}} \left(a_0 - \dfrac{4}{3}a_0^3 + \dfrac{102}{45}a_0^5 - \dfrac{41}{40}a_0^7\right) + \right. \\ + \dfrac{x_1}{x_{1\max}^2} \left(-1 + 4a_0^2 - \dfrac{17}{3}a_0^4 + \dfrac{1148}{320}a_0^6\right) + \\ + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1^2}{x_{1\max}^3} \left(-\dfrac{8}{3}a_0 + \dfrac{340}{45}a_0^3 - \dfrac{2296}{40}a_0^5\right) + \\ + \dfrac{x_1^3}{x_{1\max}^4} \left(\dfrac{2}{3} - \dfrac{17}{3}a_0^2 + \dfrac{2870}{320}a_0^4\right) + \\ + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1^4}{x_{1\max}^5} \left(\dfrac{102}{45}a_0 - \dfrac{2296}{320}a_0^3\right) + \\ + \dfrac{x_1^8}{x_{1\max}^6} \left(-\dfrac{17}{45} + \dfrac{1148}{320}a_0^2\right) + \\ \left. + \operatorname{sign}(x_{\max}) \dfrac{x_1^6}{x_{1\max}^7} \left(-\dfrac{41}{40}a_0\right) + \dfrac{x_1^7}{x_{1\max}^8} \left(\dfrac{41}{320}\right)\right] \\ (t > ((i-1)T + T_ф)) \wedge (t \le (i-1)T + T_ф). \end{cases} \quad (13)$$

При составлении эталонной модели ГПТ НВ допускается, что XXX $f_{\text{XXX}}(x_1)$, ввиду малости коэффициентов полинома (1) при старших степенях, может быть сведена к равенству

$$f_{\text{XXX}}(x_1) = a_1 x_1, \tag{14}$$

где a_1 – коэффициент $f_{\text{XXX}}(x_1)$ при x_1 в первой степени.

Матричная форма записи эталонной модели ГПТ НВ на основании (8) и (14) примет вид

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}_э = \mathbf{A}_э\mathbf{x}_э + \mathbf{B}_э u_a(t), \tag{15}$$

где матрицы динамики $\mathbf{A}_э$ и входов $\mathbf{B}_э$ выглядят следующим образом:

$$\mathbf{A}_э = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 \\ c_{21}a_1 & -a_{22} \end{bmatrix}, \ \mathbf{B}_э = \begin{bmatrix} c_{12} \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Цель управления, как указано в [3], может быть задана через положительно определенную квадратичную форму, характеризующую сближение решений эталонной модели (15) и объекта (8):

$$\lim_{t\to\infty} Q(t) = \lim_{t\to\infty} \left(0,5\mathbf{e}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{e}\right) = 0, \tag{17}$$

где $\mathbf{e}$ – вектор рассогласования фактических $\mathbf{x}$ и эталонных $\mathbf{x}_э$ значений переменных состояния; $\mathbf{P}$ – постоянная положительно определенная матрица, являющаяся единственным решением уравнения Ляпунова

$$\mathbf{A}_э^{\mathrm{T}}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_э = -\mathbf{G}, \tag{18}$$

где $\mathbf{G}$ – симметричная положительно определенная матрица.

Таким образом, выполнение предельного соотношения (17) означает обеспечение асимптотической устойчивости тривиального решения $\mathbf{e}(t)\equiv\mathbf{0}$ системы (8).

Далее используется понятие функций роста [4], представляющих собой скалярные функции $f_{qr}^{\theta}(\mathbf{x})$, ранжированные по первому индексу по степеням роста:

$$\lim_{|x_r|\to\infty} \frac{\left|f_{q+1,r}^{\theta}\right|}{\left|f_{qr}^{\theta}\right|} = +\infty, \ q = \overline{0,p}, \ r = \overline{1,n}, \tag{19}$$

где ($n\times n$) – размерность матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ (9); p – наибольшая степень роста $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ по аргументу $\mathbf{x}$, равная количеству функции по элементу x_r.

Необходимо отметить, что при нулевой степени роста скалярные функции принимают постоянное значение и равны единице:

$$\left|f_{0r}^{\theta}(x_r)\right| \equiv 1, \ r = \overline{1,n}. \tag{20}$$

После введения понятия функций роста элементы матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ (9) $a_{ij}(\mathbf{x},t)$ могут быть представлены через функции в следующем виде:

$$a_{ij}(\mathbf{x},t) = \left\{\sum_{q=0}^{p}\left[\sum_{r=1}^{n} a_{qr}(\mathbf{x},t) f_{qr}^{\theta}(x_r)\right]\right\}_{ij}, \ i,j = \overline{1,n}, \tag{21}$$

где $a_{qr}(\mathbf{x},t)$ – глобально ограниченные функции.

Объединив разложения (21) по всем индексам ij, можно получить разложение $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x},t) = \sum_{q=0}^{p}\left[\sum_{r=1}^{n} A_{qr}(\mathbf{x},t) f_{qr}^{\theta}(x_r)\right], \quad q = \overline{0,p}, \ r = \overline{1,n}, \tag{22}$$

где $\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x},t) = \left\{a_{qr}^{ij}(\mathbf{x},t)\right\}, \ i,j = \overline{1,n}, \tag{23}$

при этом $\mathbf{A}_{0r}(\mathbf{x},t) = \mathbf{A}_0(\mathbf{x},t), \ r = \overline{1,n}. \tag{24}$

В связи с тем, что не все элементы матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ могут иметь максимальную степень роста, равную p, а также не обязательно содержать в своих разложениях (21) функции роста $f_{qr}^{\theta}(\mathbf{x})$ со всеми степенями роста, некоторые или многие элементы матриц $\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x},t)$ (23) могут оказаться равными нулю; также некоторые или многие матрицы $\mathbf{A}_{qr}(\mathbf{x},t)$ могут вовсе отсутствовать.

Схема прямого адаптивного управления ГПТ НВ с функциями роста представлена на рис. 2.

В соответствии с (9) и с учетом (24) матрицы (23) для системы (8) будут иметь вид

$$\mathbf{A}_{01} = \mathbf{A}_{02} = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 \\ 0 & -a_{22} \end{bmatrix};$$
$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} -c_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ c_{21} & 0 \end{bmatrix}; \tag{25}$$
$$\mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

При этом функции роста могут быть заданы следующим образом:

$$f_{01}^{\theta}(x_1) = f_{02}^{\theta}(x_2) = 1;\ f_{11}^{\theta}(x_1) = f_{г2}(x_1);$$
$$f_{21}^{\theta}(x_1) = f_{г1}(x_1);\ f_{12}^{\theta}(x_1) = 0;\ f_{22}^{\theta}(x_1) = 0. \quad (26)$$

Структура адаптивного закона для случая параметрической настройки, согласно [4], определяется уравнением

$$u_{\text{а}}(t) = \mathbf{K_A}\mathbf{x} + \mathbf{K_B}u_{\text{ОВ}}, \quad (27)$$

где m – размерность вектора **u** (8); $\mathbf{K_A}$, $\mathbf{K_B}$ – матрицы настраиваемых параметров размерностью $(m\times n)$ и $(m\times m)$ соответственно.

Вид закона (27) определен условиями инвариантности к эталонной модели, получаемыми при приравнивании правых частей объекта (8) и эталонной модели (15):

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K_A})\mathbf{x} + (\mathbf{B} + \mathbf{B}\mathbf{K_B})u_{\text{ОВ}} = \mathbf{A}_э\mathbf{x} + \mathbf{B}_э u_{\text{ОВ}}. \quad (28)$$

Требование асимптотической устойчивости системы (8) будет характеризоваться выполнением условий адаптируемости:

$$\operatorname{rank}\{\mathbf{B}, \mathbf{B}_э - \mathbf{B}\} = \operatorname{rank}\{\mathbf{B}, \mathbf{A}_э - \mathbf{A}\} = \operatorname{rank}\mathbf{B}. \quad (29)$$

Закон адаптивного управления с сигнальной, или релейной, настройкой, в соответствии с [4] может быть представлен алгебраическим уравнением

$$u_{\text{а}}(t) = -h\operatorname{sign}\left[\mathbf{B}^{\text{T}}\mathbf{P}\mathbf{e}\right], \quad (30)$$

где h – постоянный положительный коэффициент усиления, который характеризует амплитуду (ограничение) релейного управления; знаковая функция sign от векторной величины, например f=[f_1,…, f_n], вычисляется покомпонентно:

$$\operatorname{sign} f = [\operatorname{sign} f_1, ..., \operatorname{sign} f_n]. \quad (31)$$

При наличии в разложении матрицы $\mathbf{A}(\mathbf{x},t)$ функций роста закон управления (30) приобретет нелинейный характер и преобразуется к системе алгебраических уравнений:

$$u_{\text{а}}(t) = \left\{\sum_{q=0}^{p}\left[\sum_{r=1}^{n} h_{qr}(\mathbf{x},t) f_{qr}^{\theta}(x_r)\right]\right\}\operatorname{sign}\left[\mathbf{B}^{\text{T}}\mathbf{P}\mathbf{e}\right]. \quad (32)$$

По аналогии с (24) справедливы равенства

$$h_{0r} = h_0\ r = \overline{1,n}. \quad (33)$$

Для математической модели генератора постоянного тока (8) выбраны следующие коэффициенты усиления:

$$h_0 = 0{,}214 I_{a1\max};\ h_{11} = 0{,}023 I_{a1\max};$$
$$h_{21} = 0{,}039 I_{a1\max};\ h_{12} = 0;\ h_{22} = 0. \quad (34)$$

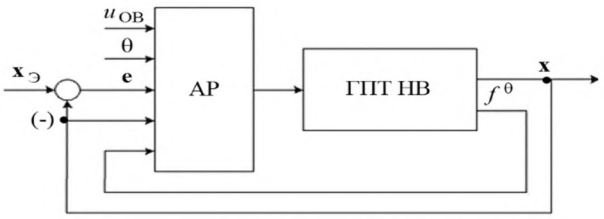


Рис. 2. Функциональная схема адаптивного управления ГПТ НВ с эталонной моделью с функциями роста

Fig. 2. Functional layout of adaptive control for separately excited DC generator featuring reference model with growth functions.

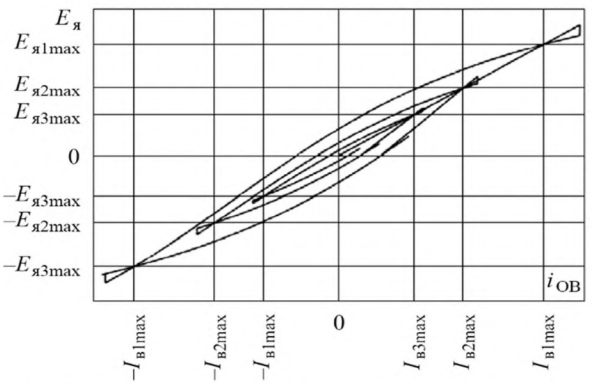


Рис. 3. Кривая намагничивания генератора постоянного тока с независимым возбуждением

Fig. 3. Magnetization curve of separately excited DC generator

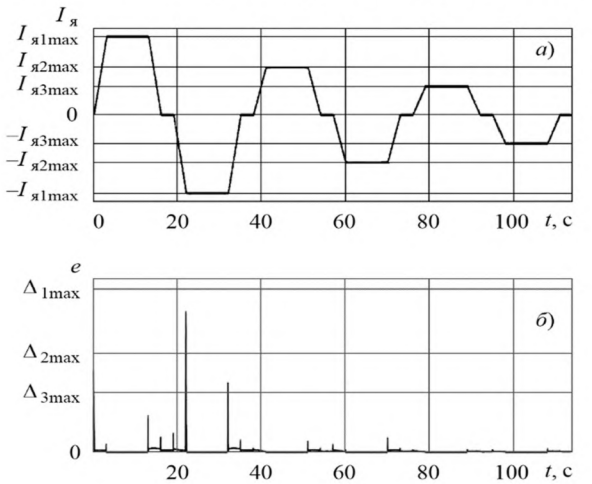


Рис. 4. Ток якоря (*а*) и модуль ошибки по току якоря (*б*) генератора постоянного тока с независимым возбуждением при использовании адаптивного закона управления с алгоритмами сигнальной настройки с функциями роста

Fig. 4. Armature current (a) and its error modulus (b) for separately excited DC generator governed by adaptive control law featuring signal tuning algorithms with growth functions.

В качестве доказательства работоспособности исследуемого объекта приведены результаты моделирования системы (8) с прямой беспоисковой адаптивной системой автоматического управления с нелинейным адаптивным законом управления с алгоритмом сигнальной настройки (30) с коэффициентами усиления (34) и с известными функциями роста (26) с эталонной моделью (15) в виде графиков КН, тока якоря и модуля ошибки по току якоря на рис. 3 и 4 соответственно.

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод, что прямая беспоисковая адаптивная система управления с функциями роста с эталонной моделью с алгоритмами сигнальной настройки позволяет получить рассогласование заданного и фактического сигналов в установленных пределах (рис. 4б) и удовлетворяет требованиям относительно формы и параметров импульса и закона убывания их амплитуды (рис. 4а).

Заключение
Conclusion

В рамках данной работы с целью повышения точности отработки программно заданной импульсной последовательности тока в нагрузке ИИТ большой мощности, предназначенного для электромагнитной обработки судов, синтезирована прямая беспоисковая адаптивная система управления ГПТ НВ с нелинейным адаптивным законом управления с эталонной моделью с известными функциями роста с алгоритмом сигнальной настройки. Результаты проведенных в САПР Matlab/Simulink иссле-дований показали, что указанная система автоматического управления позволяет обеспечить выполнение требований относительно формы, закона убывания амплитуды, значений параметров импульсной последовательности тока, поэтому она может быть использована для высокопрецизионного создания сильного импульсного магнитного поля с учетом особенностей структуры ИИТ большой мощности.

Библиографический список

1. *Вольдек А.И.* Электрические машины. СПб.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. *Takács J.* Mathematics of hysteresis phenomena. Weinhem: WILEY-VCH Verkag GmbH&Co. KGaA, 2003. – 175 p.
3. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М: Физматлит, 2004. – 464 с.
4. *Путов В.В., Шелудько В.Н.* Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: ООО «Техномедиа» / Изд-во «Элмор», 2007. – 244 с.

References

1. *A. Voldek.* Electric machines. St. Petersburg, Energiya, 1978, 832 pp. (*in Russian*).
2. *Takács J.* Mathematics of hysteresis phenomena. Weinhem: WILEY-VCH Verkag GmbH&Co. KGaA, 2003. – 175 pp.
3. *D. Kim.* Automatic control theory. Vol. 2: multi-dimensional, non-linear, optimal and adaptive systems. Moscow, Fizmatlit, 2004, 464 pp. (*in Russian*).
4. *V. Putov, V. Sheludko.* Adaptive and modal control systems for multi-mass non-linear elastic mechanical objects. St. Petersburg, JSC Technomedia / Elmor Publishing House, 2007, 244 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Доброскок Никита Александрович, к.т.н., начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 906 247-04-26. E-mail: n_dobroskok@ksrc.ru.

Мохова Ольга Васильевна, инженер 1 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 921 412-27-85. E-mail: o.kurdyaeva@gmail.com.

About the authors

Dobroskok, Nikita A., Cand. Sci. (Eng), Head of Sector – Deputy Head of Department, SET Branch of KSRC, address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel.: +7 906 247-04-26. E-mail: n_dobroskok@ksrc.ru.

Mokhova, Olga V., 1st category Engineer, SET Branch of KSRC, address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128, tel.: +7 921 412-27-85. E-mail: o.kurdyaeva@gmail.com.

Поступила / Received: 20.06.19
Принята в печать / Accepted: 30.08.19
© Доброскок Н.А., Мохова О.В., 2019