

Методы повышения точности импульсных следящих систем большой мощности

Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина))
brborvas@list.ru , dobrnicke@gmail.com

В. С. Лавриновский, Р. И. Галиуллин, О. В. Мохова
Филиал ЦНИИ СЭТ
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
linwega.g@gmail.com, felixxx_89@mail.ru ,
o.kurdyayeva@gmail.com

Аннотация. Рассматривается вопрос построения системы управления, обеспечивающей высокую точность отработки программно заданной импульсной последовательности тока при устойчивой работе электромеханического варианта импульсного источника тока большой мощности, предназначенного для формирования сильного импульсного магнитного поля. В связи с широким диапазоном изменения параметров задающего воздействия и с учётом присущих объекту естественных нелинейностей для достижения поставленной цели предлагаются алгоритмы настройки контура тока согласно принципам подчиненного регулирования и нелинейного адаптивного регулятора с использованием эталонной модели и функций роста. Работоспособность разработанных систем управления подтверждается моделированием в САПР *Matlab/Simulink*.

Ключевые слова: импульсный источник тока; гистерезис; адаптивное управление; подчиненное регулирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Импульсные системы большой мощности используются в широком спектре технологических процессов и могут быть реализованы на основе источников и накопителей энергии различного рода. В частности, импульсный источник тока (ИИТ) большой мощности, рассматриваемый в данной работе, представляет собой трехмашинный агрегат 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) и предназначен для формирования сильного импульсного знакопеременного магнитного поля. Такая система может выступать, например, как техническое средство электромагнитной обработки объектов морской техники, развитие которых сопровождается ужесточением требований к качеству питающего устройства. В отличие от существующих аналогов электромеханических ИИТ большой мощности [1] порядок периода импульса вырос от микросекунд до секунд, при этом точность отработки программно заданной импульсной последовательности тока возросла от нескольких единиц до долей процента от амплитуды текущего импульса. Таким образом, направление исследования и вопрос повышения точности

воспроизведения входного сигнала в следящих системах такого рода является актуальным.

В силу наличия присущих ИИТ большой мощности естественных нелинейностей, например, таких как явление магнитного гистерезиса, математическое описание объекта носит существенно нелинейный характер. Также должен быть принят во внимание широкий диапазон изменения параметров выходной импульсной последовательности тока. С целью обеспечения высокоточной отработки программно заданного сигнала, в соответствии с поставленными требованиями к его качеству, предложены два варианта системы управления ГПТ НВ. Первый подразумевает использование принципов адаптивного управления с нелинейным адаптивным законом с алгоритмами сигнальной настройки и с функциями роста [2], второй - подчиненного регулирования [3],[4] и релейного управления, реализованного, в свою очередь, за счет полупроводникового переключающего устройства, выполненного по однофазной мостовой схеме.

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИИТ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Исследование процессов в электромеханическом варианте ИИТ большой мощности включает в себя два этапа: разгон системы от неподвижного состояния до значения частоты вращения, равной синхронной частоте вращения СД, и формирование выходной импульсной последовательности тока. В рамках данной работы интерес представляет второй этап, поэтому допускается, что система с помощью РАД приведена во вращение и разогнана до подсинхронной скорости при условии работы СД в генераторном режиме и с применением синхронизирующего устройства произведена синхронизация СД с сетью и его вхождение в синхронизм. Таким образом, можно считать, что ИИТ большой мощности вращается со стабилизированной, по значению соответствующей синхронной частоте вращения, скоростью ω_c .

После подачи питания на ОВ ГПТ НВ происходит намагничивание обмотки якоря, которое протекает по начальной, или основной, кривой намагничивания (КН). В импульсном режиме работы генератора должна быть

сформирована выходная импульсная последовательность тока из пар разнополярных трапецеидальных импульсов с затухающей амплитудой A с точностью $\Delta=0.0025A$, длительностями нарастания T_ϕ и спада фронтов T_c , поддержания вершины T_b импульса и паузами между импульсами $t_{\text{п}}$, которая в рамках процесса намагничивания характеризуется переходом к семейству соответствующих гистерезисных петель.

Параметры КН выведены через значения аппроксимированной полиномом экспериментально полученной характеристики холостого хода (XXX) f_{XXX} . Математическое описание явления магнитного гистерезиса ГПТ НВ на основании модели, предложенной Такачем [5], произведено в соответствии с количеством смены знака производной тока якоря, условно разбивающим период сигнала на три части. Таким образом, электродвижущая сила (ЭДС) $E_{\text{я}}$ относительно тока возбуждения $i_{\text{ОВ}}$ будет представлять собой нечетно-симметричную кусочно заданную неоднозначную гистерезисную характеристику:

$$f_{\Gamma} = E_{\text{яmax}} \begin{cases} f_{\text{XXX}}(x_s), & (t \leq T_\phi) \wedge (j=1); \\ f_{\text{XXX}}(x_{\text{max}} i_{\text{ОВ max}}) \frac{(x_s + x_n)}{(x_{\text{max}} + x_n)}, & (t \leq ((j-1)T + T_\phi)) \wedge (j > 1); \\ \tanh(x_s + a_0) - b, & (t > ((j-1)T + T_\phi)) \wedge (t \leq (j-1)T + 0.5T + T_\phi); \\ \tanh(x_s - a_0) + b, & (t > ((j-1)T + 0.5T + T_\phi)) \wedge (t \leq (j-1)T + T) \end{cases}$$

$$f_{\text{XXX}} = a_1 i_{\text{ОВ}} + a_3 i_{\text{ОВ}}^3 + a_5 i_{\text{ОВ}}^5 + a_7 i_{\text{ОВ}}^7 + a_9 i_{\text{ОВ}}^9$$

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

$$b = \frac{x_{\text{max}} - x_s}{x_{\text{max}0} - x_{\text{max}}} \cdot \text{sign}(x_{\text{max}}) \left(\frac{f_{\text{XXX}}(i_{\text{ОВ}}(t))}{E_{\text{яmax}}} - \tanh(x_{\text{max}0} - \text{sign}(x_{\text{max}}) a_0) \right) +$$

$$+ (1 - \frac{x_{\text{max}} - x_s}{x_{\text{max}0} - x_{\text{max}}}) \text{sign}(x_{\text{max}}) \left(\frac{f_{\text{XXX}}(i_{\text{ОВ}}(t))}{E_{\text{яmax}}} - \tanh(x_{\text{max}} - \text{sign}(x_{\text{max}}) a_0) \right),$$

где t – время; $i_{\text{ОВ max}}$, $E_{\text{я max}}$ – номинальные значения тока возбуждения и ЭДС генератора соответственно; x_s , $x_{\text{max}0}$, x_{max} , x_n – нормированные значения тока возбуждения, исходной (предыдущей) вершины петли гистерезиса, конечной (текущей) вершины петли гистерезиса и точки пересечения нисходящей кривой оси абсцисс соответственно; a_0 , b – значение коэффициентов смещения относительно начала координат по осям абсцисс и ординат, характеризующие коэрцитивную силу и остаточную намагниченность соответственно; T – период

импульса; j – номер текущей пары импульсов. Более подробную информацию и результаты можно найти в [6].

Конструкция ГПТ НВ подразумевает наличие двух ОВ: основной ОВ и дополнительной ОВ (ОВД), которые предназначены для обеспечения амплитуды и точности отработки программно заданной импульсной последовательности соответственно. Таким образом, электромагнитные процессы в ГПТ НВ [7] с двумя ОВ с учетом явления магнитного гистерезиса (1) относительно токов возбуждения $i_{\text{ОВ}}$ и якоря $i_{\text{я}}$ могут быть описаны следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= c_{12}u - c_{11}f_{\Gamma}'(x_1) - a_{11}x_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= c_{21}f_{\Gamma}(x_1) - a_{22}x_2; \\ x_1 &= i_{\text{ОВ}}; x_2 = i_{\text{я}}; u = u_{\text{ОВ}} + u_{\text{ОВД}}; \\ a_{11} &= \frac{r_{\text{ОВ}} + r_{\text{ОВД}}}{(L_{\text{ОВ}} + L_{\text{ОВД}})}; c_{11} = \frac{p_{\Gamma}}{30c_3\omega_c} \frac{(w_{\text{ОВ}} + k_{\text{тр}}w_{\text{ОВД}})}{(L_{\text{ОВ}} + L_{\text{ОВД}})}; \\ c_{12} &= \frac{1}{(L_{\text{ОВ}} + L_{\text{ОВД}})}; a_{22} = \frac{r_{\text{я}} + r_{\text{н}}}{L_{\text{я}} + L_{\text{н}}}; c_{21} = \frac{1}{L_{\text{я}} + L_{\text{н}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $r_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$, $L_{\text{н}}$, $r_{\text{н}}$ – активные сопротивления и индуктивности обмотки якоря и нагрузки соответственно; $u_{\text{ОВ}}$, $u_{\text{ОВД}}$, $r_{\text{ОВ}}$, $r_{\text{ОВД}}$, $L_{\text{ОВ}}$, $L_{\text{ОВД}}$, $w_{\text{ОВ}}$, $w_{\text{ОВД}}$ – напряжение, активные сопротивления, индуктивности, количество витков в основной ОВ и ОВД соответственно; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации, учитывающий соотношение числа витков основной ОВ и ОВД; p_{Γ} – число пар полюсов; c_3 – конструктивная постоянная ЭДС.

III. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГПТ НВ С АЛГОРИТМОМ СИГНАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ И ФУНКЦИЯМИ РОСТА

Для удобства работы с математическим описанием ИИТ, в частности ГПТ НВ (2), осуществлен переход к его матричной форме записи:

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

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} -a_{11} - c_{11}f_{\Gamma}'(x_1) & 0 \\ c_{21}f_{\Gamma}(x_1) & -a_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} c_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

где \mathbf{x} – вектор переменных состояния; $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ – матрицы динамики и управления системы (3) соответственно; $f_{\Gamma}(x_1)$ и $f_{\Gamma}'(x_1)$ получаются за счет вынесения x_1 из $f_{\Gamma}(x_1)$ и $f_{\Gamma}'(x_1)$ соответственно, что обуславливает наличие в них тригонометрических функций в виде гиперболического тангенса $\tanh(x)$ и косеканса $\text{sech}^2(x)$, поэтому допускается использование разложений последних в степенной ряд Тейлора.

При составлении эталонной модели считается, что XXX ГПТ НВ $f_{XXX}(x_1)$ (1), ввиду малости коэффициентов полинома при старших степенях, может быть записана в виде уравнения прямой, наклон которой равен a_1 . Тогда матричная форма записи эталонной модели генератора примет вид:

$$\frac{dx_3}{dt} = A_3 x_3 + B_3 u \quad (4)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 \\ c_{21}a_1 & -a_{22} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} c_{12} \\ 0 \end{bmatrix}$$

где A_3, B_3 – эталонные матрицы динамики и управления соответственно.

Цель управления, как указано в [2], согласно методу функции Ляпунова может быть задана через положительно определённую квадратичную форму, характеризующую сближение решений эталонной модели (4) и объекта (3):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (0.5 e^T P e) = 0 \quad (5)$$

$$A_3^T P + P A_3 = -G$$

где e – вектор рассогласования фактических x и эталонных x_3 значений переменных состояния; P – постоянная положительно определённая матрица, являющаяся единственным решением уравнения Ляпунова при задании симметричной положительно определённой матрицы G . Выполнение предельного соотношения (5) означает обеспечение асимптотической устойчивости тривиального решения $e(t) \equiv 0$.

Далее используется понятие функций роста [2], представляющих собой скалярные функции $f_{qr}^\theta(x)$, получаемые при разложении матрицы динамики $A(x,t)$ (3) и ранжированные по первому индексу по степеням роста:

$$\begin{aligned} f_{01}^\theta(x_1) &= f_{02}^\theta(x_2) = 1; \\ f_{11}^\theta(x_1) &= f_{11}'(x_1); f_{21}^\theta(x_1) = f_{11}(x_1); \\ f_{12}^\theta(x_1) &= 0; f_{22}^\theta(x_1) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Нелинейный закон адаптивного управления ГПТ НВ с сигнальной, или релейной, настройкой, в соответствии с [2], с функциями роста (6) может быть представлен системой алгебраических уравнений:

$$u = \left\{ \sum_{q=0}^p \left[\sum_{r=1}^n h_{qr}(x,t) f_{qr}^\theta(x_r) \right] \right\} \text{sign}[B^T P e]; \quad (7)$$

$$h_{0r} = h_0 \quad r = \overline{1, n}$$

при выборе следующих коэффициентов усиления:

$$\begin{aligned} h_0 &= 0.214 I_{я1 \max}; h_{11} = 0.023 I_{я1 \max}; \\ h_{21} &= 0.039 I_{я1 \max}; h_{12} = 0; h_{22} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, математическое описание генератора (2) претерпевает изменения и с учетом эталонной модели (4) и нелинейного адаптивного закона управления (7) представляет собой систему нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений.

IV. ПОДЧИНЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА ЯКОРЯ ПРИ РЕЛЕЙНОМ УПРАВЛЕНИИ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ГПТ НВ

В данном варианте системы управления в качестве регулятора тока (РТ) возбуждения обеих ОВ ГПТ НВ используется однофазный автономный инвертор напряжения (АИН), реализующий принцип работы двухпозиционного реле. В случае основной ОВ ошибка по току якоря e поступает на вход контурного РТ якоря, а, в зависимости от знака результата сравнения выхода РТ $u_{РТ}$ и пилообразного сигнала $u_{пил}$, $u_{зад}$ на выходе АИН формируется либо положительное, либо отрицательное значение напряжения $u_{ОВ}$. На вход АИН ОВД приходит знак производной программно заданного сигнала $i_{я \text{ зад}}$. Следовательно, напряжения основной ОВ и ОВД могут быть представлены в виде следующих нечетно-симметричных кусочно постоянных функций:

$$\begin{aligned} u_{ОВ} &= u_{ОВ \max} \begin{cases} +1, u_{зад} < 0; \\ -1, u_{зад} > 0; \end{cases} \\ u_{ОВД} &= u_{ОВД \max} \begin{cases} +1, di_{я \text{ зад}} / dt > 0; \\ -1, di_{я \text{ зад}} / dt < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

где $u_{ОВ \max}, u_{ОВД \max}$ – номинальные напряжения основной ОВ и ОВД соответственно.

АИН, согласно [3], характеризуется коэффициентом передачи по напряжению k_u и чистым запаздыванием на время, соответствующее периоду широтно-импульсной модуляции (ШИМ) $T_{ШИМ}$. За счет эквивалентности на частоте, равной, либо меньшей частоте ШИМ, фазовых частотных характеристик звеньев чистого запаздывания и апериодического, можно допустить аналогичность их передаточных функций (ПФ).

В математическую модель ГПТ НВ (3) входят нелинейные составляющие, а так как из изложенного материала в [2] следует, что контурные регуляторы, параметры которых рассчитаны по линеаризованному описанию системы, позволяют обеспечить желаемую динамику, поэтому для синтеза РТ необходимо линеаризовать (3). С этой целью допускается, что КН генератора формируется по закону изменения линеаризованной основной КН, поэтому можно принять $f_r(x_1) = a_1, f_r'(x_1) = 0$. Тогда ПФ линеаризованной системы (3),

записанной через оператор дифференцирования $p=d/dt$, будет выглядеть следующим образом:

$$W_{\text{гл}}(p) = \frac{k_{\Gamma}}{(T_{\text{ГВ}}p + 1)(T_{\text{ГЯ}}p + 1)}. \quad (10)$$

$$k_{\Gamma} = \frac{c_{12}u_{\text{ОВ max}}c_{21}a_1}{a_{11}a_{22}}; T_{\text{ГВ}} = \frac{1}{a_{11}}; T_{\text{ГЯ}} = \frac{1}{a_{22}}$$

Таким образом, РТ, согласно принципу подчинённого регулирования с настройкой его параметров на оптимум по модулю [3], [4], будет представлять собой ПИД-регулятор вида:

$$u_{\text{РТ}}(p) = k_{\text{п}}e + k_{\text{и}} \frac{1}{p}e + k_{\text{д}}pe \quad (11)$$

$$k_{\text{п}} = \frac{(T_{\text{ГВ}} + T_{\text{ГЯ}})}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\Gamma}k_u}; k_{\text{и}} = \frac{1}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\Gamma}k_u}; k_{\text{д}} = \frac{T_{\text{ГВ}}T_{\text{ГЯ}}}{2T_{\text{ШИМ}}k_{\Gamma}k_u}.$$

Тогда математическая модель ГПТ НВ (3) с учетом синтезированного ПИД-регулятора (11) преобразуется к системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_1}{dt} = c_{12}(u_{\text{ОВ}} + u_{\text{ОВД}}) - c_{11}f_{\Gamma}'(x_1) - a_{11}x_1;$$

$$\frac{dx_2}{dt} = c_{21}f_{\Gamma}(x_1) - a_{22}x_2;$$

$$\frac{du_{\text{РТ}}}{dt} = k_{\text{зад}} + a_{31}c_{21}f_{\Gamma}(x_1) - c_{21}f_{\Gamma}'(x_1) + a_{32}x_2; \quad (12)$$

$$x_{2\text{зад}} = i_{2\text{зад}};$$

$$a_{31} = a_{22}k_{\text{д}} - k_{\text{п}}; a_{32} = a_{22}k_{\text{п}} - k_{\text{и}} - a_{22}^2k_{\text{д}};$$

$$k_{\text{зад}} = k_{\text{д}}d^2x_{2\text{зад}}/dt^2 + k_{\text{п}}dx_{2\text{зад}}/dt + k_{\text{и}}x_{2\text{зад}}.$$

Таким образом, математическая модель генератора (12) описывается системой дифференциальных уравнений, порядок которой, по сравнению с (2), на единицу выше.

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХМАШИННОГО АГРЕГАТА

С целью верификации предложенных алгоритмов управления проведено моделирование переходных процессов второго этапа работы ИИТ большой мощности в САПР *Matlab/Simulink*.

На рисунке представлены графики выходной импульсной последовательности тока трехмашинного агрегата (а) и точность отработки программно заданного сигнала для случая адаптивного управления (б) с нелинейным адаптивным законом (7) с эталонной моделью (5) и функциями роста (6) и для подчиненного регулирования тока якоря (11) с релейным управлением тока возбуждения (9) (в).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что разработанная прямая беспоисковая адаптивная система управления ИИТ большой мощности и рассчитанный контурный РТ якоря ГПТ НВ при релейном управлении обеих ОВ позволяют обеспечить выполнение требований относительно формы, параметров и точности воспроизведения программно заданной импульсной последовательности.

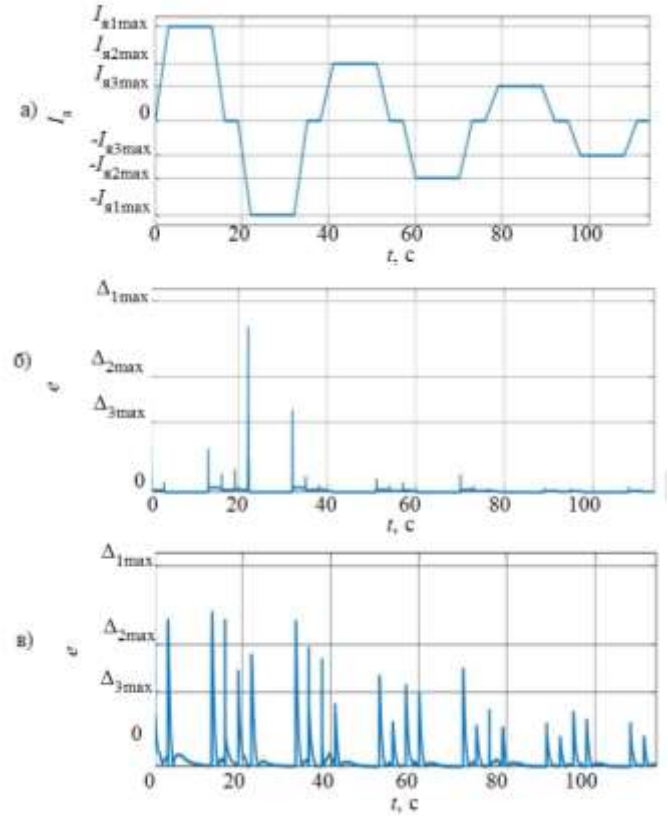


Рис. 1. Ток якоря ГПТ НВ (а), ошибка по току якоря для случая адаптивного управления (б) и подчиненного регулирования (в)

При этом необходимо отметить, что при использовании адаптивного регулятора источника питания должен быть рассчитан на десятикратное номинальное напряжение возбуждения.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование электромагнитных процессов в электромеханическом варианте импульсной следящей системы большой мощности показало, что использование релейной системы управления, параметры которой могут быть настроены при применении принципов подчиненного регулирования и адаптивного управления позволяет обеспечить высокоточную отработку программно заданной импульсной последовательности в соответствии с поставленными требованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: «Наука», 1964. 340 с.
- [2] 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.
- [3] Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Екатеринбург: изд-во ГОУ ВПО «Рос.гос.проф.пед.ун-т», 2008. 279 с.
- [4] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: «Академия», 2006. 265 с.
- [5] Takács J. Mathematics of hysteresis phenomena. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 175 p.
- [6] Mokhova O.V., Dobroskok N.A. and others, The investigation of hysteresis phenomenon impact on the operating quality of DC generator with independent excitation during pulse mode, SPb: Proceedings ElConRus, 2018, pp. 947-952.
- [7] Мирошников А.Н. Румянцев С.Н. Моделирование систем управления технических средств транспорта. Уч. изд. ГЭТУ-СПб «Элмор». 1999. 224 с.