

В заключение отметим, что в рамках проведенных авторами компьютерных исследований на примере трехстепенного манипуляционного ро-

бота все обсуждаемые в статье вопросы получили положительное разрешение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Б. Р., Стоцкий А. А., Фрадков А. Л. Алгоритмы скоростного градиента в задачах управления и адаптации. Обзор // Автоматика и телемеханика. 1988. № 12. С. 3–39.

2. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.

3. Путов В. В. Развитие беспоисковых адаптивных методов и их приложения к задачам управления сложными механическими объектами // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 5. С. 3–8.

4. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959. 212 с.

V. V. Putov, V. N. Sheludko, T. L. Rusyaeva, T. T. Nguyen  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### ADAPTIVE CONTROL OF AN ELASTICALLY RIGID MULTI-DEGREE NONLINEAR ELECTROMECHANICAL OBJECT

*Deals with the construction and research of an adaptive control system for an elastically rigid multi-degree nonlinear electromechanical object. The mathematical model of the object is represented by two related systems of Lagrangian equations, one of which describes the multimass elastic subobjects in the form of chain models of material bodies connected by weightless elastic bonds, and the other is the «rigid skeleton» of a multi-degree electromechanical object obtained by replacing undeformed elastic bonds by rigid bonds. An adaptive control system is constructed in the form of two subsystems that provide suppression of elastic deformations. Trajectory control of the «rigid skeleton» of a multi-stage electromechanical object under conditions of its functional-parametric uncertainty and incomplete measurements of the efficiency study of the constructed adaptive system using the example of a non-linear computer model of a three-stage robot manipulator of a typical design with two-mass elastic servo motors of the degrees of mobility are manipulated.*

**Elastic-rigid multi-degree non-linear electromechanical object, parametric and function-parametric uncertainty, adaptive control system, state observer, suppression of elastic deformations, executive electric drives of the mobility degrees of the object, control of the interconnected motion of a rigid object, computer research, three-stage manipulation robot**

УДК 621.3.078.3

Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, В. С. Лавриновский  
Филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

А. В. Морозов, О. В. Мохова, Р. И. Галиуллин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

### Исследование влияния явления гистерезиса на качество работы генератора постоянного тока в импульсном режиме

*Рассматривается вопрос повышения качества работы импульсного источника тока большой мощности на основе электромеханических преобразователей энергии, представляющего собой трехмашинный агрегат из механически связанных разгонного асинхронного двигателя, приводного синхронного двигателя и генератора постоянного тока с независимым возбуждением. На выходе генератора формируется импульсная последовательность тока из разнополярных трапецидальных импульсов с заданными значениями параметров. Адаптирована математическая модель гистерезиса, предложенная Такаксом, для случая генератора постоянного тока с независимым возбуждением. В качестве системы управления используется релейная система управления, реализованная с помощью автономного инвертора напряжения. С целью улучшения точности воспроизведения заданного сигнала в систему управления генератором введены корректирующие устройства, а в его конструкцию добавлена дополнительная обмотка возбуждения.*

**Импульсный источник тока, генератор постоянного тока с независимым возбуждением, гистерезис**

Исследуются процессы, происходящие в импульсном источнике питания (ИИП) большой

мощности на основе электромеханических преобразователей энергии. В частности, рассматри-

вается импульсный источник тока (ИИТ), состоящий из механически связанных разгонного асинхронного двигателя (РАД), приводного синхронного двигателя (СД) и генератора постоянного тока с независимым возбуждением (ГПТ НВ). В ряде случаев требуется высокая точность воспроизведения импульсов тока в нагрузке. Поэтому здесь представляет интерес формирование импульсной последовательности тока на выходе системы из разнополярных трапецеидальных импульсов с заданными значениями длительностей фронта, вершины и среза, и законом убывания их амплитуды. В связи с этим встает вопрос о разработке системы управления ГПТ НВ с учетом нелинейной зависимости, описывающей процесс намагничивания, принимая при этом во внимание явление магнитного гистерезиса, которое оказывает существенное влияние на стабилизацию амплитуды импульсов.

На данный момент существует несколько основных математических моделей, например Красносельского [1], Джилс-Артетона [2], Прейсаха [3], описывающих поведение ферромагнитного образца, который подвергают воздействию магнитного поля. Как правило, большинство из них опираются на данные, полученные в ходе эксперимента, поэтому ввиду отсутствия априорной опытной информации о протекании магнитных процессов в генераторе и свойств материалов, из которых он изготовлен, в рассматриваемом случае внимание было остановлено на модифицированном математическом описании, предложенном Такаком [4].

Известны различные варианты исполнения ИИТ, к числу которых, помимо электромеханических преобразователей энергии [5], относятся электромагнитные [6], [7], взрывные [8], [9] и полупроводниковые [10]–[12] устройства. ИИТ большой мощности позволяют осуществлять питание обмоток с током, катушек (соленоидов), электромагнитов для создания сильного импульсного магнитного поля. Поля такого рода находят широкое применение во многих областях науки и техники и позволяют решать ряд задач, например таких, как устранение девиации магнитного компаса и магнитных сигнатур кораблей в судостроении, повышение антифрикционности в триботехнике, детектирование сложных взрывчатых веществ в физике, определение положения геомагнитных полюсов в палеомагнетизме, высокую точность изме-

рений магнитных параметров электро- и радиооборудования, увеличение долговечности прокатных валков в металлургии, уменьшение «магнитного» дутья при сварке и т. д.

**Требования к параметрам импульса.** Для идеального перемагничивания требуется прямоугольная форма импульсов тока. Однако в реальных условиях за счет наличия катушек индуктивности она трансформируется в трапецеидальную (рис. 1).

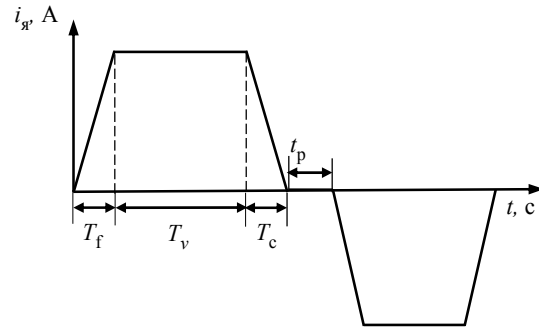


Рис. 1

К параметрам импульса тока якоря  $i_{я}$  на выходе ГПТ НВ предъявляются следующие требования:

- 1) абсолютная амплитуда пар разнополярных импульсов должна быть одинаковой, а их максимальная амплитуда  $A_i$  убывать от  $A_{max}$  до  $A_{min}$  по экспоненциальному закону;
- 2) время нарастания и спада фронта импульса должны быть равны  $T_f$  и  $T_c$  соответственно, время поддержания вершины импульса –  $T_v$ , пауза между импульсами –  $t_p$ ;
- 3) максимальная ошибка между заданным и фактическим значением сигнала не должна превышать  $\Delta_i = A_{i_{max}} \cdot 0.25\%$ .

Для дальнейшего исследования используется характеристика холостого хода (ХХХ), полученная экспериментально для генератора мощностью 5 МВт, параметры которой приведены в табл. 1.

В табл. 1 введены следующие обозначения:  $i_{OB}$ ,  $E_{я}$  – ток обмотки возбуждения (ОВ) и ЭДС якоря ГПТ НВ соответственно.

Для представления ХХХ в виде непрерывной функции с помощью метода наименьших квадратов произведена аппроксимация ХХХ полиномом вида

Таблица 1

$i_{OB}$ , о. е.	0	0.289	0.384	0.48	0.576	0.777	0.895	0.968	0.998
$E_{я}$ , о. е.	0	0.247	0.329	0.412	0.494	0.676	0.814	0.94	0.996

$$E_{я} = f_{XXX}(i_{ОВ}) = a_9 i_{ОВ}^9 + a_7 i_{ОВ}^7 + a_5 i_{ОВ}^5 + a_3 i_{ОВ}^3 + a_1 i_{ОВ}, \quad (1)$$

которая графически представлена на рис. 2.

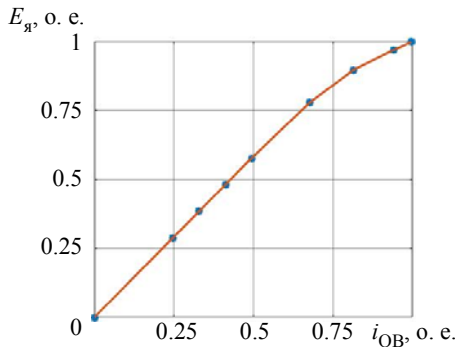


Рис. 2

Согласно [13], [14], ЭДС якоря ГПТ НВ определяется выражением, описывающим процессы в якорной цепи:

$$E_{я} = c_e n \Phi = (r_{я} + r_{н}) i_{я} + (L_{я} + L_{н}) \frac{di_{я}}{dt}, \quad (2)$$

где  $c_e$  – конструктивная постоянная ЭДС;  $L_{я}$  – индуктивность, Гн;  $r_{я}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;  $L_{н}$  – индуктивность, Гн,  $r_{н}$  – активное сопротивление нагрузки, Ом;  $n$  – частота вращения системы, об/мин;  $\Phi$  – основной магнитный поток, создаваемый генератором, Вб.

Электромагнитные процессы в контуре возбуждения генератора могут быть представлены в виде уравнения

$$u_{ОВ} + e_{м} = r_{ОВ} i_{ОВ} + L_{ОВ} \frac{di_{ОВ}}{dt}, \quad (3)$$

где  $u_{ОВ}$  – напряжение питания обмотки возбуждения (ОВ), В;  $r_{ОВ}$  – активное сопротивление ОВ, Ом;  $L_{ОВ}$  – индуктивность ОВ, Гн.

При этом ЭДС, наводимая в ОВ при изменении главного магнитного потока с числом витков в ОВ  $w_{ОВ}$ , равна

$$e_{м} = -w_{ОВ} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Поток был выражен через нелинейную зависимость от намагничивающей силы генератора  $F_{М}$ , т. е. через кривую намагничивания (КН)  $f_{КН}(i_{ОВ})$ :

$$\Phi = \Lambda(F_{М}) = \Lambda(w_{ОВ} i_{ОВ}) = w_{ОВ} f_{КН}(i_{ОВ}). \quad (5)$$

КН можно определить через XXX:

$$f_{КН}(i_{ОВО}) = \frac{f_{XXX}(i_{ОВ})}{w_{ОВ} c_e n} = \frac{p_{Г}}{30 c_e} \frac{1}{w_{ОВ}} \frac{1}{\omega} \times f_{XXX}(i_{ОВ}) = k_{ОВ} \frac{1}{w_{ОВ}} \frac{1}{\omega} f_{XXX}(i_{ОВ}), \quad (6)$$

где  $i_{ОВО}$  – ток обмотки обычного возбуждения;  $p_{Г}$  – число пар полюсов ГПТ НВ;  $k_{ОВ} = p_{Г}/30 c_e$ .

Тогда математическая модель генератора может быть представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{di_{ОВ}}{dt} &= \frac{1}{L_{ОВ}} (u_{ОВ} - k_{ОВ} \omega f_{XXX}(i_{ОВ}) - r_{ОВ} i_{ОВ}); \\ \frac{di_{я}}{dt} &= \frac{1}{(L_{я} + L_{н})} [f_{XXX}(i_{ОВ}) - (r_{я} + r_{н}) i_{я}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Из-за большой мощности ГПТ НВ ток возбуждения в абсолютном исчислении имеет высокие значения, поэтому для управления обмоткой возбуждения применяются дискретные устройства и используется релейная система управления. Реализация релейной системы управления ОВ ГПТ НВ произведена с использованием полупроводникового коммутирующего устройства, выполненного по однофазной мостовой схеме и представляющего собой автономный инвертор напряжения (АИН). Подача напряжения питания на ОВ осуществляется по принципу работы трехпозиционного реле: в зависимости от знака и значения на входе ошибки между фактическим и заданным значением тока якоря формируется напряжение, которое принимает одно из трех значений ( $-U_{ОВ \max}$ ,  $0$ ,  $+U_{ОВ \max}$ ).

В качестве результатов моделирования в САПР Matlab/Simulink на рис. 3 приведены графики тока якоря (а), ошибки по выходному току (б), а на рис. 4 – КН генератора при формировании трех пар импульсов тока.

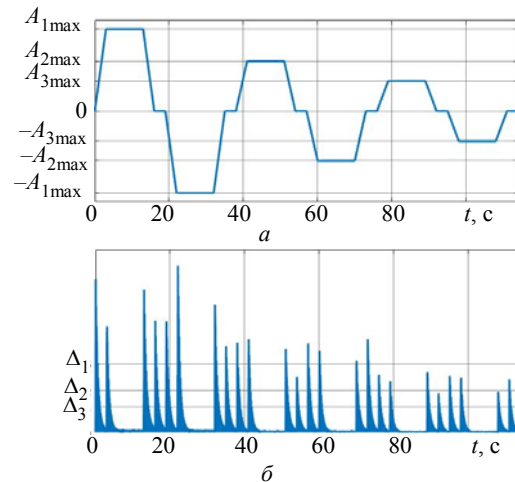


Рис. 3

Полученную импульсную последовательность тока на выходе генератора можно охарактеризовать следующим образом: в соответствии с рис. 3, *a* воспроизведены требуемые форма и экспоненциальный закон их убывания ( $A_{1max} > A_{2max} > A_{3max}$ ), но при этом максимальные значения ошибки по току, согласно рис. 3, *б*, превышают допустимый уровень ( $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ ) для всех трех пар импульсов. Это обусловлено тем, что в моменты смены знака производной тока якоря функция испытывает разрыв первого рода.

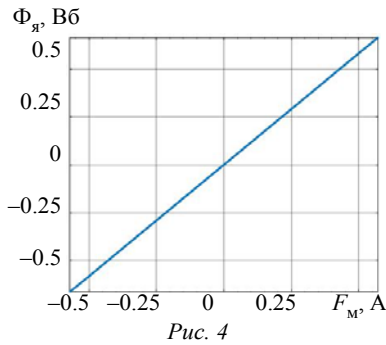


Рис. 4

Зависимость между потоком и намагничивающей силой (рис. 4) до момента насыщения практически линейна.

Для повышения точности формируемой последовательности добавлена обратная связь по производной тока якоря и фильтр нижних частот (ФНЧ) с малой постоянной времени на выходе задающего сигнала. Использование ФНЧ позволяет вычислить производную выходного тока генератора на всем временном промежутке, т. е. импульсная последовательность тока непрерывна и непрерывно дифференцируема для всех  $t > 0$ . Как подтверждение удовлетворяющей всем требованиям работы генератора, на рис. 5 приведены графики тока якоря (*a*) и ошибки по току (*б*).

В соответствии с [15], процесс электромагнитной обработки основан на приложении магнитного поля, заставляющего образец проходить ряд незамкнутых гистерезисных циклов с убывающим до нуля значением напряженности магнитного поля. Согласно [4], кривая петли гистерезиса может быть описана тригонометрической функцией, а именно гиперболическим тангенсом.

Исходя из числа смены знака производной тока якоря условно разобьем период выходного сигнала на три части: первый участок будет определяться основной кривой намагничивания, второй – ниспадающей кривой петли гистерезиса, а третий – восходящей кривой петли гистерезиса.

Для вывода математического описания второго и третьего участков воспользуемся указанными далее заменами:

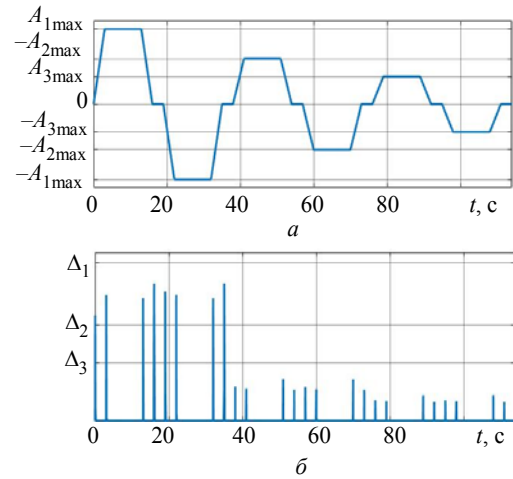


Рис. 5

$$x_s = \frac{i_{OB}(t)}{i_{OB\ max}}; \quad x_{max0} = A; \quad x_{max} = -A;$$

$$b = \frac{x_{max} - x_s}{x_{max0} - x_{max}} \text{sign}(x_{max}) \times$$

$$\times \left\{ \frac{f_{XXX}(i_{OB}(t))}{E_{я\ max}} - \tanh[x_{max0} - \text{sign}(x_{max})a_0] \right\} +$$

$$+ \left( 1 - \frac{x_{max} - x_s}{x_{max0} - x_{max}} \right) \text{sign}(x_{max}) \times$$

$$\times \left\{ \frac{f_{XXX}(i_{OB}(t))}{E_{я\ max}} - \tanh[x_{max} - \text{sign}(x_{max})a_0] \right\}, \quad (8)$$

где  $i_{OB\ max}, E_{я\ max}$  – номинальные значения тока возбуждения, А, и ЭДС, В, генератора соответственно;  $x_s$  – нормированное значение тока возбуждения;  $x_{max}$  – значение конечной вершины петли гистерезиса;  $x_{max0}$  – значение исходной вершины петли гистерезиса, которая в зависимости от знака производной тока якоря принимает либо положительное значение амплитуды текущей пары импульсов (нисходящая кривая петли гистерезиса), либо отрицательное (восходящая кривая петли гистерезиса);  $b$  – значение смещения относительно начала координат по оси ординат (определяет остаточную намагниченность);  $a_0$  – значение коэффициента смещения относительно начала координат по оси абсцисс, равный в данном случае 0.5 (определяет коэрцитивную силу).

Первый участок начиная со второй пары импульсов задается линейным законом изменения кривой гистерезиса, в результате чего ЭДС генератора достигает требуемого значения XXX для текущей пары импульсов.

Тогда ЭДС ГПТ НВ может быть описана системой уравнений

$$E_{я}(t) = f(i_{OB}(t)) = \begin{cases} f_{XXX}(i_{OB}(t)), & (t < T_f) \wedge (i = 1); \\ f_{XXX}(x_{\max 0} i_{OB \max}) \times \\ \times \frac{(x_s + x_n)}{(x_{\max 0} + x_n)}, & \\ (t \leq [(i-1)T + T_f]) \wedge (i > 1); \\ \\ f_{II} = E_{я.\max} [\tanh(x_s + a_0) - b], \\ \{t > [(i-1)T + T_\phi]\} \wedge [t \leq (i-1)T + 0.5T + T_\phi]; \\ f_{III} = E_{я.\max} [\tanh(x_s - a_0) + b], \\ [t > (i-1)T + 0.5T + T_\phi] \wedge [t \leq (i-1)T + T], \end{cases}$$

где  $x_n$  – нормированное значение точки пересечения нисходящей кривой оси абсцисс текущей пары импульсов;  $i$  – номер текущей пары импульсов.

В результате моделирования получены графики тока якоря (рис. 6, а), ошибки по выходному току генератора (рис. 6, б), КН генератора (рис. 7).

Требование к точности формируемой последовательности при наличии явления гистерезиса не соблюдается, что видно из рис. 6, б, а рис. 7 подтверждает то, что процесс намагничивания в генераторе происходит по закону изменения гистерезисного цикла.

Чтобы повысить качество стабилизации выходного тока генератора, необходимо добавить дополнительную обмотку возбуждения (ОВД). Напряжение ОВД, как и для основной ОВ, регулируется с помощью АИН и принимает одно из трех значений  $(-U_{ОВД \max}, 0, +U_{ОВД \max})$ . В данном случае на вход полупроводникового коммутирующего устройства поступает не ошибка по току якоря, а знак производной тока якоря.

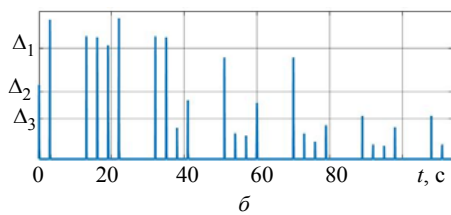
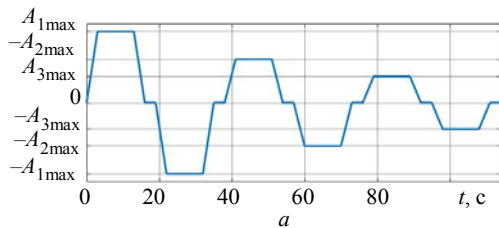


Рис. 6

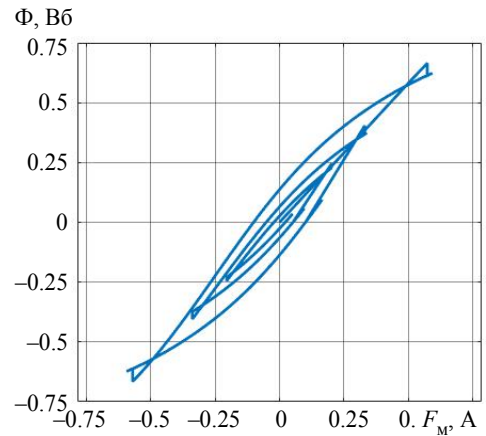


Рис. 7

Следовательно, необходимо внести изменения в уравнения, описывающие магнитные процессы ОВ в генераторе (3):

$$\begin{aligned} u_{ОВО} - w_{ОВО} \frac{d\Phi}{dt} &= r_{ОВО} i_{ОВ} + L_{ОВО} \frac{di_{ОВ}}{dt}; \\ u_{ОВД} - w_{ОВД} \frac{d\Phi}{dt} &= r_{ОВД} i_{ОВ} + L_{ОВД} \frac{di_{ОВ}}{dt}; \\ F_M &= F_{ОВО} + k_{тр} F_{ОВД}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \Lambda(F_M) = \Lambda(w_{ОВО} i_{ОВ}) + k_{тр} \Lambda(w_{ОВД} i_{ОВ}) = \\ &= (w_{ОВ} + k_{тр} w_{ОВД}) f_{кн}(i_{ОВ}), \end{aligned}$$

где  $k_{тр}$  – коэффициент трансформации, учитывающий соотношение числа витков основной (ОВО) и дополнительной (ОВД) ОВ.

Результаты моделирования в виде графиков выходного тока и ошибки по току изображены на рис. 8, а и б.

В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод, что ГПТ НВ в данном исполнении отвечает всем поставленным требованиям относительно формы, амплитуды и точности создаваемой импульсной последовательности тока.

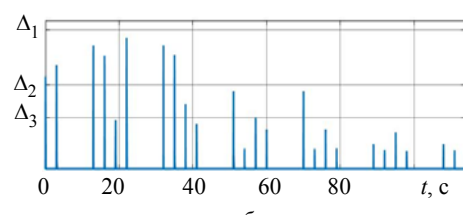
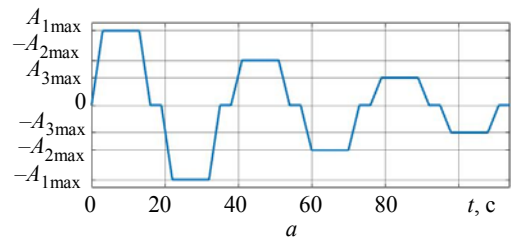


Рис. 8

Таблица 2

Требуемое максимальное значение ошибки для каждой пары импульсов	Фактическое значение максимальной ошибки для каждой пары импульсов			
	Первый этап	Второй этап	Третий этап	Четвертый этап
$\Delta_1$	$1.97\Delta_1$	$0.87\Delta_1$	$1.27\Delta_1$	$0.94\Delta_1$
$\Delta_2$	$2.24\Delta_2$	$0.41\Delta_2$	$1.5\Delta_2$	$0.92\Delta_2$
$\Delta_3$	$2.34\Delta_3$	$0.42\Delta_3$	$1.04\Delta_3$	$0.72\Delta_3$

Проведенное исследование процессов в ГПТ НВ условно разделено на четыре этапа, а данные о полученной ошибке на каждом этапе сведены в табл. 2.

На основании данных таблицы можно сделать вывод о том, что введенные в систему управления корректирующие устройства позволяют достичь желаемых результатов, значительно повышая качество отработки заданного сигнала. При сравнении параметров, полученных при намагничивании без учета явления гистерезиса (второго этапа) и с его учетом (третьего этапа), видно, что показатели значения ошибки увеличиваются и не соответствуют максимально допустимым, на остальные характеристики формируемой последовательности остаточная намагниченность не влияет. Для повышения качества воспроизведения заданного сигнала в конструкции ГПТ НВ добавлена ОВД, позволяющая в моменты смены знака производной тока якоря дополнительно регулировать ток возбуждения.

Исследование процессов, протекающих в ГПТ НВ, получением уточненного математического описания и моделирования в Matlab/Simulink показало, что наличие явления гистерезиса при намагничивании отрицательно сказывается на точности стабилизации импульсов тока. Для повышения качества формирования выходной импульсной последовательности введены корректирующие устройства в виде обратной связи по производной тока якоря и ФНЧ на выходе задающего сигнала, а в конструкцию генератора добавлена ОВД.

Таким образом, синтезированная система управления ГПТ НВ с учетом явления магнитного гистерезиса позволяет обеспечить формирование импульсной последовательности тока в соответствии с поставленными требованиями к форме и параметрам импульсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красносельский М. А., Покровский А. В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1983. 272 с.
2. Jiles D. C., Atherton D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis // J. of magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 91. P. 48–60.
3. Preisach P. Über die magnetische Nachwirkung // Zeitschrift für Physik. 1994. № 5. S. 277–302.
4. Takács J. Mathematics of hysteresis phenomena. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 175 p.
5. Карасик В. Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964. 340 с.
6. Snare E. C. Magnetic flux compression by magnetically imploded metallic foils // J. Appl. Phys. 1966. Vol. 31. P. 3812–3816.
7. Herlach F. High magnetic fields // Science and technology. Vol. 2. Singapore: World scientific, 2003. 280 p.
8. Сахаров А. Д. Взрывомагнитные генераторы // УФН. 1966. Т. 88, вып. 4. С. 725–734.
9. Fowler C. M. Production and use of high magnetic fields by implosion // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. P. 588–594.
10. Foner S., Kholm H. H. Coil for pulsed megagauss fields // Rev. Sci. Instr. 1956. Vol. 27. 547 p.
11. Knoepfe H. Pulsed high magnetic fields. London: North-Holland publishing company Amsterdam-London, 1970. 392 p.
12. Особенности применения молекулярных накопителей энергии в импульсных источниках питания / Б. В. Бруслиновский, Н. В. Голодный, И. В. Карманов, А. Ю. Крыжановский, К. И. Матус, Р. Ф. Мисников // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2015. № 89 (373). С. 267–279.
13. Пиотровский Л. М. Электрические машины. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1950. 232 с.
14. Вольдек А. И. Электрические машины. СПб.: Энергия, 1978. 832 с.
15. Богачева Н. Д. Применение размагничивания в технике. СПб.: КГНЦ, 2010. 262 с.

B. V. Bruslinovskiy, N. A. Dobroskok, V. S. Lavrinovskiy  
*Ship Electric Engineering and Technology Institute (KSRC Branch)*

A. V. Morozov, O. V. Mokhova, R. I. Galiullin  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

## INVESTIGATION OF HYSTERESIS PHENOMENON IMPACTING ON THE OPERATING QUALITY OF DC GENERATOR DURING PULSE MODE

*The problem of the operation quality increasing of high power pulse current supply based on electromechanical energy converter is considered. Pulse current supply consists of a mechanically coupled bust induction machine, driven synchronous motor and separately excited DC generator. The current pulse series of the bipolar trapezoidal pulses with specified parameter values is formed at the generator output. The mathematical model of hysteresis proposed by Takacs is adapted to the case of separately excited DC generator. To improve the accuracy of reference signal reproduction some compensators are introduced to generator control system and the generator design is supplemented with an additional excitation winding.*

**Pulse current supply, separately excited DC generator, hysteresis**

---