

УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Хайруллин И.Х., Каримов Р.Д., Вавилов В.Е.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail:ruslan-k88@yandex.ru

Приведено техническое решение и описание основных элементов конструкции намагничивающей установки (НУ), используемой для создания высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B. Отличительная особенность предложенной конструкции состоит в том, что в ней используются дополнительные обмотки, задачей которых является усиление магнитного потока электромагнита. Приведена схема питания обмоток НУ. Представлен математический аппарат, позволяющий рассчитать основные параметры установки. При расчете рассматривалось 2 варианта конструктивного исполнения основных и дополнительных обмоток. Произведено моделирование НУ в программном комплексе AnsysMaxwell, в результате чего была представлена зависимость индуктивности обмотки от силы тока. Представлена модель намагничивающей установки, реализованная в математическом пакете Matlab, позволяющая производить моделирование динамических процессов, а также производить графическое отображение характеристик.

Ключевые слова: намагничивающая установка, постоянные магниты, Nd-Fe-B.

MATHEMATICAL MODEL OF INSTALLATIONS FOR PERMANENT MAGNETS MAGNETIZATION HIGH-COERCIVITY

Hairullin I.H., Karimov R.D., Vavilov V.E.

FSBEI HPE «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russia (450000, Ufa, K. Marx street, 12), e-mail: ruslan-k88@yandex.ru

The technical solution and the description of basic elements of a design of the magnetizing installation (MI) used for creation of high-energy permanent magnets of Nd-Fe-B is given. Distinctiveness of the offered design consists that in it the padding windings which task is strengthening of a magnetic flux of an electromagnet are used. The feed circuit of windings of MI is given. The mathematical apparatus, allowing to calculate key parameters of installation is presented. At calculation 2 options of a design of the main and padding windings were considered. MI model operation in the program Ansys Maxwell complex therefore dependence of inductance of a winding at most current was presented is made. The model of magnetizing installation realized in a mathematical Matlab package, allowing to make model operation of dynamic processes and as to make graphic display of characteristics is presented.

Keywords: Magnetizing setting, permanent magnets, Nd-Fe-B.

Введение

Перед производителями ставится задача – повысить энергетические характеристики постоянных магнитов (ПМ). Причем данная задача направлена не только на методы количественного поиска (повышение удельной энергии, остаточной индукции и коэрцитивной силы), результаты которого зависят от свойств намагничиваемого материала, но и на качественный, в частности, это повышение однородности магнитного поля ПМ, которая зависит от характеристик намагничивающей установки (НУ) для производства ПМ [2].

Для повышения однородности поля ПМ авторами разработана оригинальная конструкция НУ (заявка на выдачу патента на изобретение №2013101279), рисунок 1, которая содержит электромагнит, выполненный в виде n -полюсного сердечника 1 с обмотками 2,

соединенными электрически с источником импульсного тока 3, намагничиваемый элемент (НЭ) 4, установленный на сердечнике 5, на котором намотаны дополнительные обмотки 6. Представленная конструкция отличается от известных [1,4] введением дополнительных обмоток, задачей которых является усиление магнитного потока электромагнита.

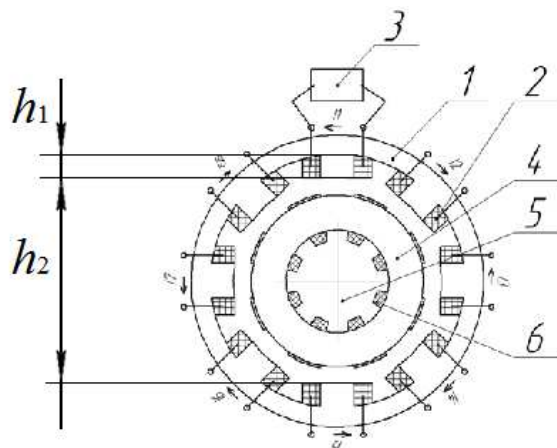


Рисунок 1. Расчетная схема предлагаемого технического решения НУ

Анализ данных моделирования, проведенный в [4], показал: при применении дополнительных обмоток намагничиваемый элемент промагничивается полностью и однородно, что подтверждает перспективность внедрения на практике предлагаемого технического решения, для чего необходимо разработать математическую модель НУ.

При решении данной задачи рассматривается расчетная схема НУ, рисунок 1.

При этом ввиду сложности расчетов используются обычные при решении такого класса задач допущения:

1. Радиусы кривизны магнитопровода значительно больше зазора.

2. Магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума μ_0 , магнитная проницаемость стали сердечника равна бесконечности $\mu_r = \infty$.

В качестве источника питания обмоток НУ используется блок конденсаторов, рисунок 2, тогда ток основной и дополнительной обмотки можно представить в виде [5]:

$$i = \frac{Ue^{-bt}}{w'L} \sin(w't) \quad (1)$$

где U – напряжение сети; t – минимальная продолжительность намагничивающего импульса; L – общая индуктивность контура; w' – угловая частота колебаний; $b=R/2L$; R – полное активное сопротивление цепи.

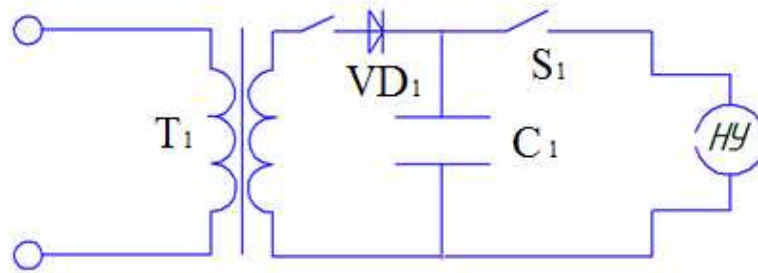


Рисунок 2. Схема питания обмоток НУ

Общая индуктивность контура может быть представлена суммой индуктивностей обмоток (НУ). В виду нелинейности материалов, применяемых в НУ, аналитический расчет индуктивности является затруднительным, в связи с чем представляется целесообразным определить индуктивности основной и дополнительной обмотки численными методами.

Для этого в работе используется метод конечных элементов, реализуемый в программном комплексе *AnsysMaxwell*. При этом решается двумерная задача анализа электромагнитного поля, на конечно-элементной модели разработанной по расчетной схеме, рисунок 1.

Определим магнитный поток НУ:

$$\Phi = \frac{F}{R_M} \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\psi}{w} \quad (3)$$

где Φ – магнитный поток; R_M – полное магнитное сопротивление цепи. В то же время МДС:

$$F = Iw \quad (4)$$

где F – магнитодвижущая сила; i – максимальный ток; w – число витков на полюс.

Для определения магнитного сопротивления НУ разбивается на участки: магнитопровод, воздушный зазор, намагничиваемый элемент.

$$R_M = R_\delta + R_{M1} + R_{M2} + R_{Mn} + R_{N1} + R_{N2} + R_{Nk} \quad (5)$$

где R_δ – общее магнитное сопротивление зазора; R_N – магнитное сопротивление намагничивающего элемента; R_M – магнитное сопротивление магнитопровода; n, k – количество участков в магнитопроводе и намагничивающем элементе, соответственно.

Потокоцепление обмоток НУ:

$$\psi = Li \quad (6)$$

С учетом (2), (3) и (4), (6) индуктивность основной обмотки определяется выражением:

$$L = \frac{w^2}{R_M} \quad (7)$$

При компьютерном моделировании определялась индуктивность основной обмотки. С учетом выражений (2–7) и данных моделирования, на рисунке 3 представлена зависимость

индуктивности основной обмотки от тока.

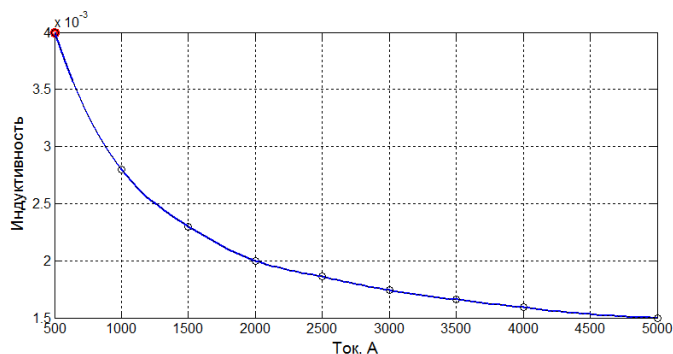


Рисунок 3. Зависимость индуктивности основной обмотки от силы тока

Из анализа рисунка 3 видно, что с увеличением тока в 3 раза индуктивность в основной обмотке уменьшается на 39,28 %, а при увеличении тока в 5 раз уменьшается на 46,42 %.

Аналогичным образом определяется индуктивность дополнительной обмотки.

Расчётная величина b , представленная в выражении (8), зависит от способа соединения обмоток, поэтому рассматривается 2 варианта соединения основной и дополнительной обмотки.

При последовательном соединении обмоток, b определяется в виде:

$$b = \frac{r_1 + r_2}{2(L_1 + L_2)} \quad (8)$$

где L_1 и L_2 – индуктивности основной и дополнительной обмоток НУ соответственно; r_1 и r_2 – активное сопротивление обмоток.

При параллельном соединении b будет представлена в виде:

$$b = \frac{(r_1 + r_2) \cdot (L_1 + L_2)}{2 \cdot (r_1 + r_2) L_1 L_2} \quad (9)$$

Исходя из результатов моделирования, закон полного тока для рассматриваемой конструкционной схемы представляется в виде:

$$i w_1 + i w_2 = H_{em} l_{em} + H_{\delta} \delta + H_{pm} d_1 + H_{ser} (d - d_1) + H_{dop} d \quad (10)$$

где i – сила тока в основной и дополнительной обмотке; w_1, w_2 – число витков основной и дополнительной обмотки; H_{em} – напряженность в магнитопроводе намагничивающей установки; H_{δ} – напряженность в воздушном зазоре; H_{pm} – напряженность в намагничиваемом элементе; H_{ser} – напряженность в сердечнике, на котором установлен намагничиваемый элемент; H_{dop} – напряженность магнитного поля создаваемого дополнительной обмоткой; δ – величина воздушного зазора; d_1 – толщина НЭ; d –

максимальная глубина проникновения магнитного поля в магнитную систему НУ; l_{em} – осевая длина магнитопровода НУ.

При этом глубина проникновения магнитного поля в магнитную систему НУ:

$$d = \sqrt{\frac{2H_m}{\gamma B_0}}, \quad (11)$$

где H_m – необходимая напряженность на данной глубине; γ – удельная проводимость материала магнита; B_0 – плотность магнитного потока на данной глубине в теле НЭ.

Представляя напряженность и остаточную индукцию как функции магнитной проницаемости НЭ (11), максимальная глубина проникновения определяется в виде:

$$d = \sqrt{\frac{2\mu\mu_0}{\gamma}}, \quad (12)$$

С учетом (12):

$$iw_1 + iw_2 = H_{em} l_{em} + H_\delta \delta + H_{pm} d_1 + H_{ser} \left(\sqrt{\frac{2\mu\mu_0}{\gamma}} - d_1 \right) + H_{dop} \sqrt{\frac{2\mu\mu_0}{\gamma}}, \quad (13)$$

Таким образом, выражение (13) является выражением, описывающим процесс намагничивания постоянного магнита.

Основным элементом НУ является электромагнит, уравнение принимается в виде:

$$uidt = id\psi + Ri^2 dt, \quad (14)$$

При разработке математического аппарата, позволяющего проектирование НУ, необходимо ввести ряд ограничений, вызванных природой физических процессов, протекающих в ней. К таким ограничениям относятся тепловые и электромагнитные.

Тепловые ограничения определяются тем, что для намагничивания высокоэнергетических постоянных магнитов необходим значительный по величине импульс тока. В связи с этим время действия данного импульса ограничено теплостойкостью обмоток, а также точкой Кюри изготавливаемого постоянного магнита:

$$\frac{r_1 i^2 dt}{c_1 m_1} < T_{об1}, \quad (15)$$

$$\frac{r_2 i^2 dt}{c_1 m_2} < T_{об2}, \quad (16)$$

$$\frac{r_2 i_2^2 dt}{c_2 m_3} < T_k, \quad (17)$$

$$\frac{k_x r_1 i_1^2 dt}{c_2 m_3} < T_k, \quad (18)$$

где c_1, c_2 – удельная теплоемкость материалов обмотки и НЭ, соответственно; m_1, m_2 – масса основной и дополнительной обмотки, m_3 – масса НЭ; k_x – эмпирический коэффициент.

Электромагнитные ограничения определяются кривой намагничивания магнитопровода:

$$H_{em} < H_{em\max}, \quad (19)$$

где H_{em} – напряженность в сердечнике электромагнита НУ; $H_{em\max}$ – максимально-допустимое значение напряженности, ограниченное температурой Кюри.

Воспользуемся известным выражением для определения времени действия импульса [6]:

$$t = 8\gamma \frac{B_r}{H_c} D^2 \cdot 10^{-9}, \quad (20)$$

где t – минимальная продолжительность намагничивающего импульса; D – эффективный диаметр ПМ; γ – удельная проводимость НЭ; H_c – напряженность намагничивающего поля.

С учетом принятых допущений и определенных выше физических ограничений определяется математическая модель намагничиваемой установки:

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{Ue^{-bt}}{w'L} \sin(w't) \\ i_1 w_1 + i_2 w_2 = H_{em} l_{em} + H_\delta \delta + H_{pm} d_1 + H_{ser} \left(\sqrt{\frac{2\mu\mu_0}{\gamma}} - d_1 \right) + H_{dop} \sqrt{\frac{2\mu\mu_0}{\gamma}} \\ uidt = id\psi + Ri^2 dt \\ \frac{r_2 i_2^2 dt}{cm_2} < T_{об2}; \frac{r_1 i_1^2 dt}{cm_1} < T_{об1}; \frac{r_2 i_2^2 dt}{c_2 m_3} < T_k; \frac{k_x r_1 i_1^2 dt}{c_2 m_3} < T_k \\ H_{em} < H_{em\max}; t = 8\gamma \frac{B_r}{H_c} D^2 \cdot 10^{-9} \end{array} \right. \quad (21)$$

Решение системы (21) аналитическими способами является весьма затруднительной задачей. В связи с этим для анализа динамических и статических процессов в НУ целесообразно применение имитационного моделирования в пакете *MatlabSimulink*.

При математическом моделировании, с учетом принятых допущений, кривая намагничивания стали сердечника и магнитопровода НУ описывается уравнением [2]:

$$H_1 = B_1 \cdot \left[\zeta - \theta \cdot \left[(v \cdot B_1)^\beta + 1 \right]^{-\frac{1}{\beta}} \right]. \quad (22)$$

где ζ, θ, v, β – эмпирические коэффициенты.

Имитационная модель, рисунок 4, представляет собой реализацию уравнения закона полного тока. Каждая отдельная ветвь представляет собой напряженность определенного участка магнитной цепи НУ. Верхняя ветвь представляет собой напряженность магнитного поля основной обмотки.

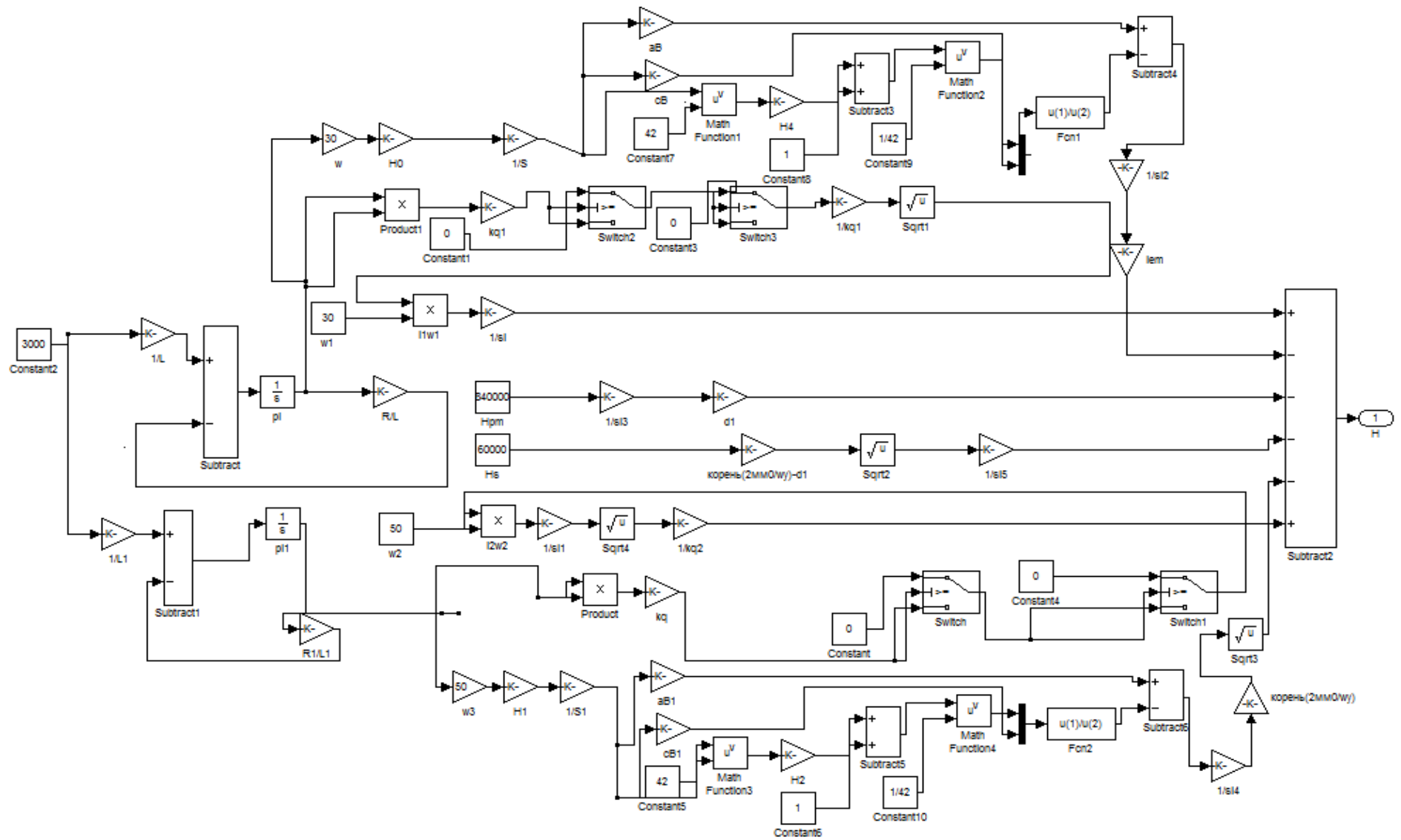


Рисунок 4. Модель намагничивающей установки

С помощью данной модели можно изучать статические и динамические режимы работы намагничивающей установки. Анализ результатов моделирования показал их соответствие реальным физическим процессам.

Полученный результат может быть использован на практике при проектировании намагничивающих установок.

Список литературы

1. Власов В.Г., Воскресенский Д.Л., Корнилов И.М., и др. Патент РФ № 2222843 С2, H01F13/00, 20.07.2003
2. Дмитриев М.В., Карпов А.С., Шескин Е.Б., Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы. – Родная Ладога, 2013. – 280 с.
3. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Каримов Р.Д., Вавилов В.Е. Математическая модель намагничивающей установки // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – Печ. № 4 (57).
4. Попов В. М., Иванов А. В., Мурзин В. С., и др. Патент РФ №2328788 С1, H01F13/00, 10.07.2008.
5. Преображенский А.А., Биширд Е.Г., Магнитные материалы и элементы. – М., 1986.
6. Преображенский А.А., Магнитные материалы. – М.: Высшая школа, 1965. – 235 с.
7. Хайруллин И.Х., Каримов Р.Д. Намагничивающая установка // Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: Межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2013. С. 266-270.

Рецензенты:

Ураксеев М.А., д.т.н., профессор кафедры информационно-измерительных систем ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Демин А.Ю., д.т.н., профессор кафедры электроники и биомедицинских технологий ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.