

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ

Восила Абдусатторовна Туляганова

К.т.н., доцент кафедры электроника и радиотехника (Э и Р) Ташкентского
университета информационных технологий имени аль-Хорезми (ТУИТ)

vtulyaganova@icloud.com

АННОТАЦИЯ

При рассмотрении простейших задач предполагалось, что эти величины не зависят от проходящей через эти элементы электромагнитной энергии. И мы с большим удовольствием манипулировали так называемыми линейными элементами и даже подбирали подходящие «линейные» компоненты.

Они могут иметь только приблизительно линейные параметры в определенном диапазоне тока и напряжения. Любое вещество, подвергающееся воздействию электромагнитных полей, тем или иным образом меняет свою структуру и, соответственно, физические свойства, т. е. сопротивление, диэлектрическую и магнитную проводимость и даже геометрическую форму. В статье рассматривается взаимодействие нелинейных элементов и их влияние на режимы работы генератора электромагнитных колебаний. Разработанная математическая модель ЭМВИ исследуется с учетом влияния колебаний якоря на основной магнитный поток и ток обмотки.

Ключевые слова: Электромагнитный вибровозбудитель, однофазный параллельный инвертор, нелинейная цепь, контур, колебание, резонансный режим, коммутация, фильтр, полупроводник, электромагнит.

ABSTRACT

The article considers the issues of mutual influences of nonlinearities of elements and their influence on the modes of operation of an electromagnetic vibration exciter. Taking into account the influence of armature vibration on the main magnetic flux and winding current the research developed mathematical model of an electromagnetic vibration exciter

Keywords: Electromagnetic vibration exciter, monophase parallel inverter, nonlinear circuit, circuit, oscillation, resonant mode, commutation, filter, semi-conductor, electromagnet.

ВВЕДЕНИЕ

Повышения качества современных технологических процессов можно добиться путем использования вибровоздействий с широким диапазоном частот и амплитуд колебаний. Электромагнитные вибровозбудители зачастую являются эффективным источником вибраций.

Вибрационные машины относятся к группе резонансных машин, в резонансной зоне: многократно увеличиваются амплитуда вибрации - перемещения, скорости и ускорения р.о., полезная механическая мощность и производительность; значительно уменьшаются удельные потери мощности. В технологических процессах с частыми изменениями массы вибрируемого изделия и р.о., изменяющие частоту свободных колебаний, появляется острая необходимость в настройке в резонансный режим изменением частоты вынужденных колебаний с помощью однофазного преобразователя частоты (ОПИ). Обеспечение гармонической формы токов и напряжений в элементах системы, позволяет получить энергосберегающий режим работы ЭМВВ с ОПИ, реактивные элементы которых образуют множество взаимосвязанных колебательных контуров с нелинейными элементами. Вопросы изучения взаимного влияния нелинейных характеристик элементов и путей устранения или уменьшения их негативных влияний на режимы работы ЭМВВ с ОПИ являются актуальными.

ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ

Для решения этих вопросов проведены исследования по разработке методов расчета, составляющих основного магнитного потока ЭМВВ, обосновывается выбор методов аппроксимации характеристик намагничивания; влияния колебаний якоря на основной магнитный поток и ток обмотки с использованием аппроксимации характеристик ЭМВВ; разработки методики расчета проводимости магнитного потока выпучивания и рассеяния.

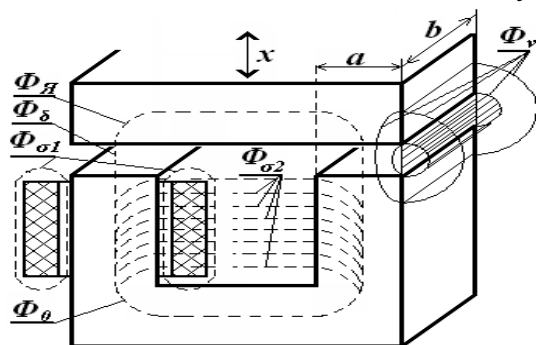


Рис.1 Распределение составляющих магнитного потока в частях магнитопровода

Распределение составляющих магнитного потока в частях магнитопровода приведена на рис.1. В анализируемых исследованиях составе формулы Максвелла, определяющей тяговое усилие в правой части уравнения (1) для расчета ЭМВВ используется

$$F(t, x) = \frac{\Phi_{\text{я}}^2(t, x)}{2\mu_0 S} \quad (1)$$

только потоки в воздушном зазоре Φ_{δ} , который считается равным основному потоку Φ_0 , потоки рассеяния Φ_{σ} и выпучивания Φ_{ν} не принимаются во внимание. Магнитный поток в якоре электромагнита образуется из суммы двух потоков

$$\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\nu}, \quad (2)$$

следовательно, в создании тягового усилия (2) участвует не только Φ_{δ} , протекающий по площади $S_{\delta} = a \cdot b$, образованной торцом стержня и якорем электромагнита, но еще и магнитные потоки выпучивания Φ_{ν} .

В результате взаимодействия этого усилия с силами упругих элементов якорь начинает совершать колебательное движение. Возникающие из-за насыщения высшие гармонические тока обмотки ЭМВВ при его питании от ОПИ приводят к срыву коммутации управляемых элементов, следовательно, к нестабильной работе системы ЭМВВ-ОПИ.

Учет влияния насыщения магнитопровода в современных ЭМВВ с улучшенными весогабаритными показателями ($\delta_0 < 2$ мм) будем осуществлять, используя кусочно-линейную аппроксимацию характеристики намагничивания. В современных ЭМВВ с улучшенными весогабаритными показателями ($\delta_0 < 2$ мм) используется горячекатаная электротехническая сталь типа 1413. Снятая на постоянном токе кривая намагничивания будет выглядеть в форме петли гистерезиса. Не принимаем во внимание потери на перемагничивание. Тогда учет влияния насыщения будем осуществлять, используя метод кусочно-линейной аппроксимации характеристики намагничивания

$$\Phi_0 = f(i_{\mu}), \quad (3)$$

где опытная нелинейная зависимость заменяется отрезками N-го количества прямых линий:

$$\left. \begin{aligned} i_{\mu} &= k_1 \Phi \quad \text{при } 0 \leq \Phi < \Phi_1; \\ i_{\mu} &= k_2 \Phi; \quad \text{при } \Phi_1 \leq \Phi < \Phi_2; \\ i_{\mu} &= k_3 \Phi; \quad \text{при } \Phi_2 \leq \Phi < \Phi_3; \end{aligned} \right\} \begin{matrix} \rho_1; \\ \rho_2; \\ \rho_3; \end{matrix} \quad (4)$$

.....

$$i_{\mu} = k_N \Phi \quad \text{при } \Phi_{N-1} \leq \Phi < \Phi_N.$$



В зависимости от того рассматривается ЭМВВ с подмагничиванием или реактивный ЭМВВ аппроксимированная функция (4) определяется в 1- или 1, 3-квadrантах.

Расчеты ЭМВВ с помощью ЭВМ при учете насыщения магнитопровода с использованием выведенных аналитических кривых намагничивания показали, что насыщение магнитопровода приводит к появлению высших гармонических в составе реактивного составляющего намагничивающего тока ЭМВВ даже при синусоидальной форме магнитного потока.

В реактивном ЭМВВ для определения Φ_0 запишем уравнение равновесия э.д.с. обмотки:

$$U_m \sin \omega t = \frac{d\Psi}{dt} + i(x, t) \cdot r, \quad (5)$$

где Ψ и r - потокосцепление и активное сопротивление обмотки ЭМВВ.

Заменив в (5) потокосцепление выражением

$$\psi = L(x) \cdot i(x, t) = W \cdot \Phi_0(x, t) \quad (6)$$

получим

$$\frac{U_m}{W} \sin \omega t = \frac{d\Phi_0(x, t)}{dt} + \frac{r}{L(x)} \Phi_0(x, t), \quad (7)$$

где W - число витков обмотки ЭМВВ.

Во избежание усложнения решения уравнения (6) функции двух переменных $\psi = L(x) \cdot i(x, t)$ аналитическая зависимость индуктивности ЭМВВ принимается в виде аппроксимированной функции

$$L(x) = L_0 / [1 - \beta(x/\delta_0)] \quad (8)$$

где L_0 - индуктивность при неподвижном якоре с воздушным зазором δ_0 ;

$$\beta = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (9)$$

β - коэффициент модуляции индуктивности ЭМВВ. Различные авторы величину коэффициента β предлагают принимать в пределах $0,5 \div 0,65$. Проведенные исследования показали, что в зависимости от режима работы ЭМВВ β изменяется в значительно больших пределах.

Для более точного выражения (7) и решения (9) необходимо решить дифференциальное уравнение с частным производным.

Вместо этого, в настоящей работе предлагается следующее. При различных постоянных значениях $\delta_0 = 0 \div 4,0$ мм с интервалом $0,1$ мм, снимается семейство опытных характеристик $\psi = f(i)$. Предварительно считая вторую составляющую правой части уравнения (4) равной нулю, определяется приближенное значение Φ_0 , используя аналитические выражения, приведенные в последующих

разделах, находится значение Φ_{δ} , решается уравнение (3), определяются значения x и по семейству характеристик $\psi = f(i, \beta)$ и $L(x)$ определяется $i(x, t)$.

Для более точного решения этой задачи, уточнение значения $L(x)$ повторяется с использованием метода последовательных приближений.

Данная методика учета нелинейной функции $L(x)$ с помощью аппроксимации функции $\psi = f(i, x)$ и метода последовательных приближений, совместно с другими уравнениями математической модели ЭМВВ позволяет получить наиболее точное решение нелинейного дифференциального уравнения (7).

Решение нелинейных уравнений ЭМВВ показали, что учет влияния $L(x)$ приводит к появлению высших гармонических в составе тока i_n в обмотке электромагнита.

Исследования показали, что при изменении частоты колебаний 3-я и 5-я гармонические составляющие тока достигают максимального значения при резонансной частоте $\omega \approx \omega_0$. Здесь они составляют 12-16%, и 3-5%, соответственно, от основной гармонической составляющей.

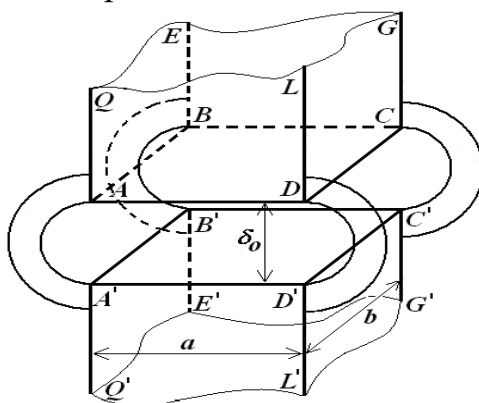


Рис.2 Картина магнитного потока выпучивания в рабочем воздушном зазоре

При частоте $\omega \approx \omega_0$ 3-я гармоническая составляющая по отношению к основной гармонической будет сдвинута на угол $\varphi = -\pi$. С удалением от резонансной частоты, значения φ изменяются.

Для расчета потоков выпучивания предлагается в место постоянных значений воздушного зазора δ и магнитной проводимости G в аналитическом выражении использовать периодическую функцию движения якоря (2.6) и периодически пульсирующую функцию $G(t) = \mu_0 S_{\delta} / (\delta_0 - x)$, (10)

где δ_0 - статический воздушный зазор между якорем и магнитопроводом электромагнита при остановленном якоре ЭМВВ.

В предлагаемой математической модели ЭМВВ, мгновенное значение рассматриваемого пространства

воздушного зазора разбивается на участки, для которых с максимальным приближением удаётся определить их проводимости, т.е. сложная картинка выпучивания магнитных силовых линий воздушного зазора разбивается на элементы, по возможности, на наиболее простые геометрические тела. Для каждого из таких путей проводимость определяется как частное от деления средней величины поперечного сечения S_{cp} на пути потока по рассматриваемому элементу на длину средней линии индукции ℓ_{cp}

$$G_{эл}(t) = \mu_0 S_{эл} / \ell_{эл}. \quad (11)$$

$$G_{эл}(t) = \mu_0 V_{эл} / \ell_{эл}^2, \quad (12)$$

где $V_{эл}$ – объем фигуры, образованный элементарным путем.

$$G_2(t) = 2,57\mu_0 \cdot \ell_{\delta} \quad (13)$$

где $\ell_{\delta} = a$ (рис.2), для ребер AB и A'B'; CD и C'D', а также $\ell_{\delta} = b$ для ребер BC и B'C'; DA и D'A';

$$G_3(t) = 2\mu_0 \cdot \ell_{\delta} / [\delta/k + 1], \quad (14)$$

где $\ell_{\delta} = a$ (рис.2), для граней ADLQ и CFEB, а также $\ell_{\delta} = b$ для граней ABEQ и DCFL;

$$G_4(t) = 0,077\mu_0 \cdot \delta \quad (15)$$

$$G_5(t) = 0,25\mu_0 \cdot h \quad (16)$$

Полную проводимость воздушного зазора находим суммированием полученных элементарных проводимостей

$$G(t, x) = \sum G'_i \quad (17)$$

где G'_i - сумма проводимостей одноименных геометрических фигур ($i = 1, 2, 3, \dots$), с учётом их количества на одной паре полюсов и количества пар полюсов.

Данный метод прост, но в случае принятия допущения о постоянстве воздушного зазора δ он может привести к погрешности в десятки процентов. Поэтому для периодически изменяющегося воздушного зазора, используя возможности современных вычислительных средств, принимаем для каждого мгновенного значения периодически изменяющегося воздушного зазора $\delta(t)$ новые значения геометрических размеров фигур и, следовательно, новые значения $G(x)$.

Наряду с магнитным потоком рабочего воздушного зазора Φ_{δ} , существуют магнитные поля и сцепляющиеся только с одной обмоткой ЭМВВ; они носят название полей рассеяния. Следует отметить, что в общем случае выделение из магнитного поля, сцепляющегося с обмоткой ЭМВВ, полей рассеяния носит в известной мере условный характер, поскольку конфигурация поля, строго говоря,



изменяется в зависимости от соотношения токов в обмотках, величин рабочего и «паразитных» воздушных зазоров и геометрических размеров электромагнита.

Достаточно сложную картину магнитного поля упростим следующим образом.

1. Принимается, что характер поля в плоскости магнитопровода не меняется в зависимости от соотношения мгновенных значений тока в обмотке. При сильной магнитной связи обмоток и якоря — это допущение достаточно оправдано. На рис. 1 схематически показан характер магнитного поля электромагнита ЭМВВ. Оно разделено на поле якоря, трубки которого замыкаются по якорю и образуют поток рабочего воздушного зазора Φ_{δ} , полей рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, сцепляющиеся с каждой обмоткой в отдельности и $\Phi_{\sigma 2}$, сцепляющиеся между двумя стержнями электромагнита.

2. Считается, что поля рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ основной и вспомогательной (подмагничивания) обмоток имеют одинаковый вид в любой плоскости, совмещенной с осью стержня магнитопровода. При таком представлении магнитных полей ЭМВВ необходимо определить характер полей рассеяния.

Определим аналитическую зависимость для магнитного потока в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta} \approx \Phi_0 - \Phi_{\sigma} = \Phi_0 / \sigma, \quad (18)$$

где Φ_{σ} - мгновенные значения магнитного потока рассеяния

$$\Phi_{\sigma} \approx \Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2}; \quad (19)$$

Φ_0 - полного магнитного потока в ярме электромагнита, созданного обмотками ЭМВВ.

В уравнении знак приближенного равенства указывает на то, что в работе не учитываются те магнитные потоки рассеяния и выпучивания, для которых не существуют упрощенные аналитические выражения, которые являются малыми величинами, по сравнению с магнитными потоками в рабочем воздушном зазоре и рассеяния между соседними стержнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магнитный поток в рабочем воздушном зазоре будем выражать через переменный коэффициент рассеяния, зависящий только от геометрических размеров электромагнита, статического воздушного зазора и колебаний якоря с рабочим органом вибромашины

$$\sigma = 1 + N(\delta_0 - x), \quad (20)$$

(где N - постоянная, зависящая от геометрических размеров нерабочих воздушных зазоров между стержнями электромагнита и самих стержней), и через полный магнитный поток Φ_0 в ярме электромагнита, определяемый приложенным напряжением, токами в обмотках ЭМВД и колебаниями якоря. Анализ физических процессов влияния нелинейных элементов электрической цепи ЭМВВ на электромагнитные величины и выведенные аналитические выражения этих нелинейностей позволяют определить гармонический состав тока обмотки ЭМВВ, характер изменения этих составляющих и их зависимости от режимов работы вибровозбудителя.

Разработанная математическая модель электромагнита ЭМВВ с нелинейными элементами позволяет определить степень влияния магнитного потока выпучивания в рабочем воздушном зазоре на величины вибровозбуждающего усилия ЭМВВ - тягового усилия, с которым якорь притягивается к электромагниту и выходные показатели вибромашины.

REFERENCES

1. O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PF-4947- son farmoni. Toshkent, 2017 yil 7 fevral. (On the strategy of action for the further development of the Republic of Uzbekistan. Presidential Decree No. P-4947 of the President of the Republic of Uzbekistan Tashkent, February 7, 2017).
2. Alimhodjaev K.T. CHastotno-upravlyaemye vibrodvigateli peremennogo toka. Diis. na soisk. uch. step. dokt. tehn. nauk.- Tashkent: 2004. -392 s.
3. Burmistrov A.A., Lavrov B.P. Dinamika elektromexanicheskix sistem vibracionnyh ustanovok. M.: «Elektrichestvo». 2000, N 1. 31-36 s.
4. Alimxodjaev K.T. Vzaimnoe vliyanie elektromagnitnx i mexanicheskix perexodnx protsessov v vibrodvigatelyax // Elektrotexnika. –M. 2003, №8. 20-24 s.
5. Aripov A.X., Abdullaev A.M, Alimova N.B. Elektronika. O'quv qo'llanma. - Tashkent: TATU, 2009. - 137 s.
6. Golubeva N. S., Mitroxin V. N. Osnovy radioelektroniki sverxvsokix chastot. Uchebnoe posobie. 2-e izd. - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. - 488 s.
7. Yevdokimov G.A., Titenkov S.S. Yavleniya perexodnogo rezonansa v dvuxchastotnom rezonansnom konture. Energetika. -Moskva, 2002. №1. –s. 91-99.
8. Ibodullaev M., Tovboev A.N., Nuraliev A.K. Subgarmonicheskiy rezonans v elektromagnitnx tsepyax i sistemax. //Vestnik TashGTU.–T., 2001. -№ 2. –s. 71-75.



9. Karimov A.S., Shoymatov B.X. Optimizatsiya protsessa preobrazovaniya elektroenergii v ferrezonansnykh tsepyax. //Vestnik FerPI. –Fergana, 2000. -№ 3. –s. 83-86.
10. Kozlov V.A. Matematicheskoe modelirovanie elektro-mexanicheskix sistem s gisterezisom. //Elektrichestvo. -M. 2002,-№4. –s. 52
11. Gorelov S.A., Belov M.P., Novikov V. A. Komp'yuternye issledovaniya promyshlennykh elektromexanicheskikh kompleksov. SPb.: Izvestiya SPb. TETU. «LETI», N 1, 2002. S.15-19.

