

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКУЮ РАБОТУ

Мошкин Владимир Иванович,

заведующий кафедрой, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», Курган, e-mail: wimosh@mail.ru

Угаров Геннадий Григорьевич,

профессор, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, e-mail: epp@sstu.ru

INFLUENCE OF EXTENT OF RESTITUTION OF MAGNETIC ENERGY OF THE PULSE LINEAR ELECTROMAGNETIC ENGINE FOR ITS MECHANICAL WORK

Moshkin Vladimir Ivanovich,

Head of Department, Ph.D., Kurgan State University, Kurgan, e-mail: wimosh@mail.ru

Ugarov Gennady Grigorievich,

Professor, Dr. Sc., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, e-mail: epp@sstu.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние степени восстановления магнитной энергии рабочих зазоров импульсного линейного электромагнитного двигателя на механическую работу без учета насыщения его магнитной системы для нескольких энергетических режимов. Определены режимы такого двигателя с наибольшей механической работой.

Abstract. The article explores the influence of the degree of recovery of magnetic energy working clearances pulsed electromagnetic linear motor for mechanical work without considering his saturation magnetic system for multiple energy regimes. Such modes are defined by the engine with the highest mechanical work.

Ключевые слова. Линейный электромагнитный двигатель, механическая работа, энергетический режим, коэффициент восстановления.

Key words. Linear electromagnetic motor, mechanical work, energy mode, the coefficient of restitution.

Особенностью линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) является импульсный характер энергопреобразования за рабочий ход подвижного элемента – якоря при его ограниченном перемещении. Однако неэффективное энергопреобразование магнитной энергии рабочих зазоров в механическую работу обуславливает низкие значения энергии рабочего хода (энергии удара) на единицу массы (или объема активных материалов) двигателя. [1-5].

Исследование условий энергопреобразования и режимов работы таких двигателей позволило выявить семь элементарных магнитных циклов, которые представляют собой энергетические режимы 1...7 [2], с различными соотношениями магнитной W_m и механической A энергий (рис. 1). Эти режимы отличаются друг от друга коэффициентом восстановления магнитной энергии k_b при движении якоря ЛЭМД из положения, соответствующего начальному рабочему зазору $\delta = \delta_n$, в положение, соответствующее конечному рабочему зазору $\delta = 0$. Особенности режимов 1...7 в табл. 1 определены через коэффициент восстановления k_b , а также через начальные и конечные значения токов I_n, I_k , индуктивностей L_n, L_k , потокосцеплений Ψ_n, Ψ_k соответственно и их кратности k и m [2]:

$$k_m = \frac{dW_{\Sigma}}{dA} \approx \frac{\langle W_{\Sigma} \rangle}{\langle A \rangle}, \quad k = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}}, \quad m = \frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{к}}},$$

где $\Delta W_{\text{м.дв}}$ – изменение магнитной энергии, сконцентрированной в магнитной системе импульсного ЛЭМД при движении якоря, когда изменение механической работы ΔA считается положительным и происходит за счет электромагнитного тягового усилия при уменьшающемся рабочем воздушном зазоре ($\Delta \delta < 0$) [2]. Оценим влияние коэффициента $k_{\text{в}}$ на механическую работу импульсного ЛЭМД без учета насыщения его магнитной системы. Для режимов (1...7), показанных на рис.1 в виде линий и областей, обозначенных в кружочках, известным графическим способом получены расчетные выражения для критериев A (механическая работа) и $W_{\text{мо}}$ (остаточная магнитная энергия) и представлены в табл. 1.

Сравним энергетические режимы, изображенные на рис. 1, по предложенным критериям. Для этого из табл. 1 выразим в обобщенном виде механическую работу для любого из режимов 1...7 [2]:

$$A = 0,5 \cdot I_{\text{н}}^2 \cdot L_{\text{н}} (m-1) / k_{(\infty \times)},$$

в которой m является конструктивным параметром, определяемым начальным воздушным зазором двигателя, $I_{\text{н.реж}}$, $k_{\text{реж}}$ – начальный ток и режимный параметр ($k_{(\text{реж})} = I_{\text{н(реж)}} / I_{\text{к}}$), соответствующие выбранному энергетическому режиму двигателя с коэффициентом восстановления $k_{\text{в}}$.

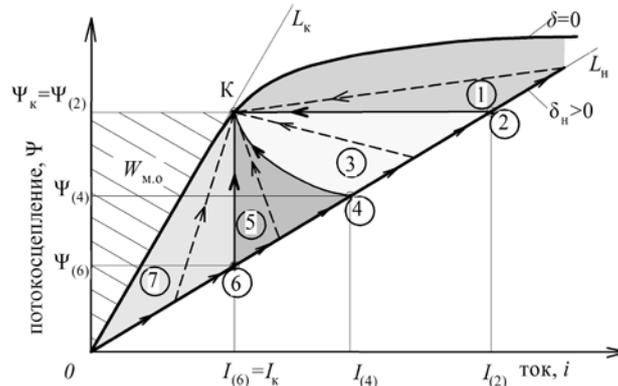


Рис.1. Энергетические режимы (1...7) импульсного ЛЭМД при $W_{\text{мо}} = \text{const}$

Примем за базу сравнения остаточную магнитную энергию $W_{\Sigma 0} = 0,5 \cdot L_{\text{н}} \cdot I_{(6)}^2 \cdot m$, одинаковую для всех режимов (на рис. 1 заштрихована). Получим выражения в относительной форме $A_* = \frac{A}{W_{\Sigma 0}}$, например, для режимов 6 ($I = \text{const}$), 4 ($W_{\text{м}} = \text{const}$), и 2 ($\Psi = \text{const}$):

$$A_{(6)*} = \frac{1}{m} (m-1); \quad A_{(4)*} = \frac{1}{\sqrt{m}} (m-1); \quad A_{(2)*} = m-1.$$

Определим влияние начальной $L_{\text{н}}$ и конечной $L_{\text{к}}$ индуктивностей на механическую работу A^* для исследуемых энергетических режимов двигателя. Сравним по модулю производные от механической работы по параметрам $L_{\text{н}}$ и $L_{\text{к}}$:

$$\left| \frac{\partial A_*}{\partial L_{\text{н}}} \right| = \frac{1}{m \cdot L_{\text{н}}} \quad \text{и} \quad \left| \frac{\partial A_*}{\partial L_{\text{к}}} \right| = \frac{1}{L_{\text{к}}}.$$

Так как $m > 1$, то $\left| \frac{\partial A_*}{\partial L_{\text{н}}} \right| > \left| \frac{\partial A_*}{\partial L_{\text{к}}} \right|$, то изменение $L_{\text{н}}$ двигателя влияет сильнее на

величину A^* , чем $L_{\text{к}}$. Следовательно, для повышения механической работы двигателя следует стремиться к росту числа рабочих зазоров и увеличивать кратность m за счет уменьшения начальной индуктивности.

Таблица 1. Характеристики режимов ЛЭМД при ненасыщенной магнитной цепи

Энергетический режим	Особенности режима	Механическая работа, А	Остаточная магнитная энергия, $W_{\text{мо}}$
1	$I_{\text{H}} > I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} > \Psi_{\text{K}}; k_{(1)} > m > 1; k_{\text{B}} < -1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)}{k_{(1)}}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(1)}^2}$
2	$I_{\text{H}} > I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} = \Psi_{\text{K}} = \Psi; m = k_{(2)} > 1; k_{\text{B}} = -1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(2)}^2}$
3	$I_{\text{H}} > I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} < \Psi_{\text{K}}; m > k_{(3)} > \sqrt{m} > 1; -1 < k_{\text{B}} < 0$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)}{k_{(3)}}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(3)}^2}$
4	$I_{\text{H}} > I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} < \Psi_{\text{K}}; k_{(4)} = \sqrt{m} > 1; k_{\text{B}} = 0$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)}{k_{(4)}}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(4)}^2}$
5	$I_{\text{H}} > I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} < \Psi_{\text{K}}; \sqrt{m} > k_{(5)} > 1; 0 < k_{\text{B}} < 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)}{k_{(5)}}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(5)}^2}$
6	$I_{\text{H}} = I_{\text{K}} = I, \Psi_{\text{H}} < \Psi_{\text{K}}; m > k_{(6)} = 1; k_{\text{B}} = +1$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)$	$0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m$
7	$I_{\text{H}} < I_{\text{K}}, \Psi_{\text{H}} < \Psi_{\text{K}}; m > 1 > k_{(7)} > 0; k_{\text{B}} > 1$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} (m-1)}{k_{(7)}}$	$\frac{0,5 \cdot I^2 \cdot L_{\text{H}} \cdot m}{k_{(7)}^2}$

Для конкретной конструкции двигателя необходимо в полном объеме использовать рабочий ход якоря за счет уменьшения конечного рабочего зазора до нуля и увеличения начального рабочего зазора до величины, обусловленной длиной обмотки.

Характеристики на рис. 2 соответствуют различным значениям кратности изменения индуктивности m , характерных для одно- ($m=3$), двух- ($m=5$) и трехзазорной ($m=7$) магнитных систем.

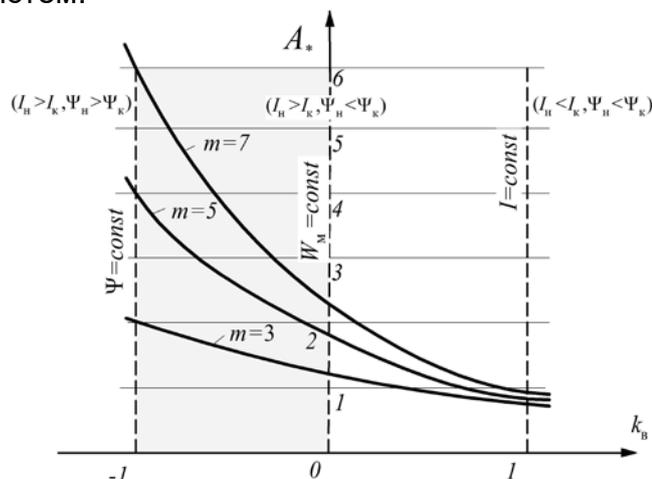


Рис. 2. Влияние коэффициента восстановления на механическую работу импульсного ЛЭМД при $W_{\text{мо}} = \text{const}$

Из графиков следует, что лучшими энергетическими режимами, по которым функционируют импульсные ЛЭМД, будут режимы, при которых коэффициент восстановления находится в диапазоне $-1 \leq k_B \leq 0$. Ими являются режимы при неизменном потокосцеплении, либо при незначительном росте последнего при движении якоря и снижении тока обмотки двигателя.

Режимы соответствуют энергопреобразованию, происходящему преимущественно за счет предварительно накопленной магнитной энергии и при минимуме потребляемой в процессе движения якоря электрической энергии от источника. Идея предварительного накопления магнитной энергии на этапе трогания была впервые высказана в [1] и далее развита в последующих работах [3-6]. Величина механической энергии, накапливаемой в рабочих зазорах, включенных в магнитную цепь дви-

гателя последовательно, растет с увеличением числа зазоров.

По сравнению, например с режимом $I=\text{const}$ (рис. 2) функционирование импульсного ЛЭМД по лучшему из режимов (режим $\Psi=\text{const}$) позволяет практически в 6 раз повысить механическую работу двигателя применительно к трехзазорной магнитной схеме, в 4 раза – для двухзазорной и в 2 раза – для однозазорной.

Хотя механическую работу заданной величины возможно получить при любом из энергетических режимов 1...7 вне зависимости от способа их организации, эффективность электромеханического преобразования энергии будет выше для режимов 1...4. Однако с режимом 1 связаны дополнительные потери на рекуперацию в источник и сложности в его реализации с помощью устройства питания и управления (УПУ). Поэтому режим 1 не будет энергоэффективным. Следовательно, по критерию механической работы энергетические режимы 2...4 рекомендуются для организации энергопреобразования.

Полученные результаты целесообразно учитывать при создании энергоэффективных электромагнитных приводов как при проектировании импульсных ЛЭМД, так и при выборе их режима, осуществляемого УПУ.

Список использованных источников

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.

2. Мошкин В.И. Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016). – Пермь-Москва: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 344-348.

3. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров // Монография. – Курган: Изд-во КГУ, 2010. – 220 с.

4. Певчев В.П. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей / В.П. Певчев, В.В. Ивагин // Монография. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.

5. Усанов К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Монография. – Курган: Изд-во КГУ, 2006. – 284 с.

6. Караваев В.Т. Импульсные электрические машины магнитного сопротивления / В.Т. Караваев, С.Н. Запольских // Вестник УГТУ – УПИ. Вопросы совершенствования электротехнического оборудования и электротехнологий. – Екатеринбург, 2000, №8. – С.235-258.