

УДК 621.318.3

СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЦИКЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В ЕГО ОБМОТКЕ

В.И. Мошкин

Курганский государственный университет

E-mail: wimosh@mail.ru

Для импульсного линейного электромагнитного двигателя, работающего по комбинированному магнитному циклу, образованному из двух элементарных циклов с постоянными током и потокоцеплением, с учетом потерь в обмотке двигателя получены выражения относительных значений механической работы, мощности потерь и КПД. Установлены зависимости энергетических показателей от конструктивных и режимных параметров, даны рекомендации по выбору режимных параметров циклов.

Ключевые слова:

Линейный электромагнитный двигатель, магнитный цикл, энергопреобразование.

Key words:

Linear electromagnetic engine, magnetic cycle, energy transformation.

Многочисленные технологические процессы в различных отраслях промышленности выполняются с помощью импульсных технологий, реализуемых машинами ударного действия с электроприводом. Применение для этих целей электромагнитного привода с импульсным линейным электромагнитным двигателем (ЛЭМД) обеспечивает интенсивное выполнение технологических операций.

Анализ условий рационального энергопреобразования в импульсных ЛЭМД [1, 2] позволил выявить способы повышения удельных энергетических показателей таких двигателей. Это многозазорность магнитных систем, увеличение уровня аккумулируемой в рабочих зазорах магнитной энергии, полнота электромеханического использования магнитного цикла [3]. Указанные способы связаны с концентрацией магнитной энергии в зазорах двигателя.

Импульсные линейные электромагнитные двигатели относятся к двухступенчатым электромеханическим преобразователям электромагнитного типа и циклического действия. Поэтому для повышения удельных силовых и энергетических показателей таких двигателей необходимо на каждой из ступеней эффективное энергопреобразование — преобразование электрической энергии в магнитную и магнитной — в механическую за цикл. В режиме двигателя в таком преобразователе возможны и обратные потоки, когда магнитная энергия преобразуется в электрическую, а механическая — в магнитную, в результате чего стирается резкая граница между двигательным и генераторным режимами [1]. Обратные потоки энергии в ЛЭМД, как правило, нежелательны.

В работе [2] на ступени преобразования магнитной энергии в механическую для исследуемого ЛЭМД в случае линейной магнитной цепи и без потерь в магнитопроводе предложены критерии оценки эффективности такого преобразования. Для установленных пяти элементарных магнитных циклов получены расчетные выражения этих критериев, по которым возможно сравнение импульс-

ных ЛЭМД, работающих по каждому из этих циклов. Вид цикла зависит от соотношения тягового и противодействующего усилий, приложенных к якору ЛЭМД, а также от массы якоря, и может быть сформирован устройством питания и управления.

Известно, что элементарный магнитный цикл с постоянным потокоцеплением ($\Psi = \text{const}$) обладает высокими магнитным КПД и механической работой [2]. На основе анализа энергопреобразования в импульсном ЛЭМД оценим эффективность электромеханического использования магнитной энергии рабочих зазоров для исследуемого комбинированного магнитного цикла. Покажем, что такой магнитный цикл, образованный из двух элементарных циклов ($I = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$), позволит иметь приемлемые электрические потери в обмотке при преобразовании электрической энергии в магнитную.

Для оценки эффективности сравним магнитные циклы, определяемые траекториями 0-2-4-0 (элементарный цикл $\Psi = \text{const}$) и 0-1-3-4-0 (комбинированный цикл) (рис. 1) и имеющие одинаковые конечные потокоцепления $\psi = \psi_m$. В качестве критериев сравнения примем относительные значения механической работы за рабочий ход (цикл) якоря импульсного ЛЭМД:

$$A_* = A_{\text{мех}} / A_{\text{макс}} \quad (1)$$

и мощности потерь в обмотке ЛЭМД при этих же условиях:

$$\Delta P_* = \Delta P / P_{\text{макс}},$$

где $A_{\text{макс}}$, $P_{\text{макс}}$ — максимальные значения механической работы и мощности потерь в обмотке, соответствующие режиму работы однообмоточного импульсного ЛЭМД по магнитному циклу $\Psi = \text{const}$. Представим выражение (1) через относительные значения тока $I = I / I_m$ и потокоцепления $\Psi = \Psi / \Psi_m$, здесь Ψ_m и I_m — их максимальные значения (рис. 1). Для цикла $\Psi = \text{const}$ справедливо соотношение $\Psi_m / I_m = \Psi_m' / I_m'$ [2], откуда следует:

$$\Psi_* = I_* \quad (2)$$

Механическую работу импульсного ЛЭМД, соответствующую его функционированию по комбинированному циклу (рис. 1), можно представить:

$$A_{\text{мех}} = A_{\text{макс}} - 0,5(I_M - I'_M)(\Psi_M - \Psi'). \quad (3)$$

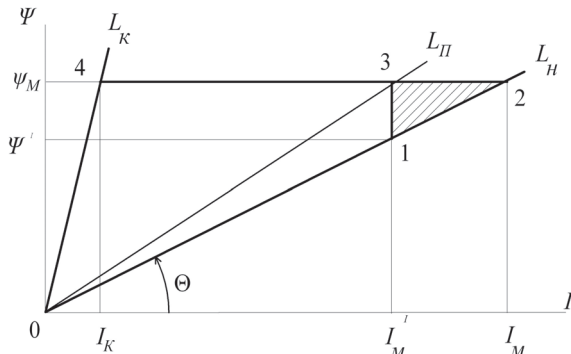


Рис. 1. Элементарный и комбинированный магнитные циклы при ненасыщенной магнитной цепи

Используя полученное в [2] соотношение (4) для механической работы

$$A_{\text{макс}} = 0,5\Psi_M(I_M - I_K), \quad (4)$$

выразим (1) с учетом (3) и получим

$$A_* = 1 - (1 - \Psi'_*) \cdot (1 - I'_*) / (1 - I_K / I_M). \quad (5)$$

Электромеханическое преобразование, происходящее в соответствии с магнитным циклом, сопровождается изменением по перемещению за цикл индуктивности преобразователя от начальной L_n до конечной L_k . В импульсных ЛЭМД конечная индуктивность, как правило, соответствует насыщенной магнитной цепи двигателя при минимальном рабочем зазоре, а начальная – ненасыщенной при начальном рабочем зазоре. Для рассматриваемых циклов без учета насыщения величина L_k принята одинаковой и соответствует минимальному зазору. Величина L_n и угол Θ , который в относительной форме характеризует эту индуктивность (рис. 1), определяется конструкцией магнитной системы двигателя, начальным рабочим зазором и величиной рабочего хода якоря. Магнитная система рассматриваемого в статье импульсного ЛЭМД имеет кратность изменения индуктивности $m = L_k / L_n = 8 \dots 12$ [2]. Она обусловлена двухзазорной конструкцией магнитной системы двигателя, в которой магнитный поток проходит последовательно через оба рабочих зазора, и выбранной величиной рабочего хода. Например, меньшие значения рабочего хода обуславливают меньшие значения m , и наоборот [2].

Так как в (5) $I_K \ll I_M$ (например, для кратности изменения индуктивности $m=10$ согласно [2] кратность изменения тока k также равна 10 и $I_K = I_M / k = 0,1 I_M$), то $1 - I_K / I_M \approx 1$. Следовательно, выражение (5) примет окончательный вид:

$$A_* = 1 - (1 - I'_*)^2. \quad (6)$$

Выразим в относительных единицах электрическую мощность потерь в обмотке ЛЭМД для комбинированного цикла, приняв за базу значение мощности потерь в обмотке $P_{\text{макс}} = RI_M^2$ для элементарного цикла $\Psi = \text{const}$, тогда

$$\Delta P_* = RI_*^2 / (RI_M^2) = I_*^2. \quad (7)$$

Зависимости относительных механической работы (6) и мощности потерь (7) при работе ЛЭМД по комбинированному циклу изображены на рис. 2. Для магнитного цикла $\Psi = \text{const}$ относительные величины работы и мощности потерь в обмотке неизменны и приняты за единицу.

$A, \Delta P, \eta$

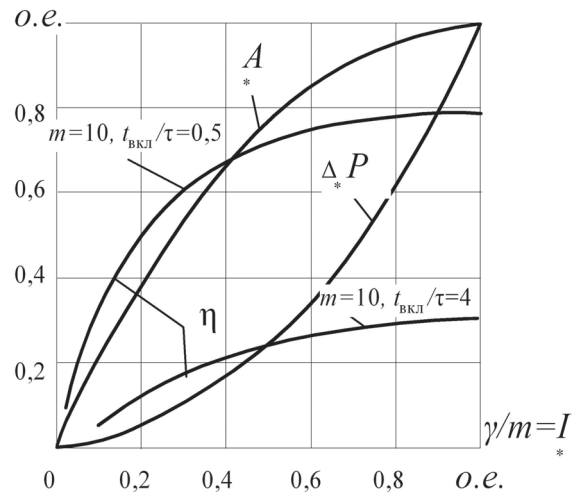


Рис. 2. Зависимости КПД и механической работы, мощности потерь от тока для элементарного и комбинированного магнитных циклов

Анализ этих зависимостей показывает, что в диапазоне изменения относительного тока $0,5 < I_* < 1$ относительная работа меняется в диапазоне $0,75 < A_* < 1$, тогда как относительная мощность потерь – в диапазоне $0,25 < \Delta P_* < 1$. При работе двигателя по комбинированному циклу с током трогания I'_M (рис. 1), сниженным, например, на 30 % по сравнению с максимальным током I_M , относительная механическая работа снижается всего на 8 %, в то время как мощность потерь в обмотке – на 51 %.

Таким образом, функционирование ЛЭМД по комбинированному магнитному циклу (рис. 1), составленному из двух элементарных циклов $I = \text{const}$ и $\Psi = \text{const}$, дает возможность двигателю обеспечить незначительное снижение механической работы при значительном снижении мощности потерь в обмотке по сравнению с элементарным магнитным циклом $\Psi = \text{const}$. Из анализа (6) следует, что при повышении тока трогания возрастает концентрация магнитной энергии, аккумулируемой в рабочих зазорах импульсного ЛЭМД, и при этом реализуются магнитные циклы, позволяющие получить большую механическую работу за цикл.

С целью дальнейшего сравнения эффективности преобразования электрической энергии в механическую работу учтем потери в обмотке импульсного ЛЭМД, работающего как по комбинированному, так и по элементарному магнитным циклам (рис. 1), получим для них расчетные значения КПД двигателя в виде

$$\eta = \frac{1}{1 + Q / A_{\text{мех}}}, \quad (8)$$

где $Q = R \int_0^{t_{\text{вкл}}} i^2 dt$ – потери энергии в обмотке за цикл.

Для комбинированного цикла соотношение (8) с учетом выражения, связывающего коэффициент эффективности цикла $\eta_{\text{ц}}$, механическую работу $A_{\text{мех}}$ и ее предельное значение $A_{\text{п}}$ [4], примет вид:

$$\eta = 1 / \left(1 + \frac{R(I'_m)^2 t_{\text{вкл}}}{k_a^2 \eta_{\text{ц}} I'_m \Psi_m} \right), \quad (9)$$

где $t_{\text{вкл}}$ – время включения двигателя; k_a – коэффициент амплитуды импульса тока обмотки; I'_m – амплитудное значение импульса тока. Отношение Ψ_m / I'_m в (9) представляет собой статическую индуктивность $L_{\text{п}}$ (рис. 1), которая соответствует положению якоря в момент переключения с цикла $I = \text{const}$ на цикл $\Psi = \text{const}$. Из (9), выражая индуктивность $L_{\text{п}}$ через конструктивный $m = L_{\text{к}} / L_{\text{н}}$, режимный $\gamma = L_{\text{к}} / L_{\text{п}}$ параметры, начальную $L_{\text{н}}$ и конечную $L_{\text{к}}$ индуктивности двигателя, получим:

$$\eta = 1 / \left(1 + \frac{\gamma t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}}{k_a^2 \eta_{\text{ц}} m} \right), \quad (10)$$

где $\tau_{\text{н}} = L_{\text{н}} / R$ – электромагнитная постоянная времени двигателя на этапе трогания.

Используя полученное в [4] соотношение для коэффициента эффективности $\eta_{\text{ц}}$ данного комбинированного цикла, представим выражение (10) для КПД в виде:

$$\eta = 1 / \left(1 + \frac{t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}}{k_a^2 (m / \gamma - 0,5 m / \gamma^2 - 0,5)} \right). \quad (11)$$

Для рассматриваемого базисного магнитного цикла $\Psi = \text{const}$ с учетом его особенностей ($L_{\text{п}} L_{\text{н}}, \gamma_g = m$) и полученного в [2] выражения коэффициента $\eta_{\text{ц}}$, равного $\eta_{\text{ц}} = 0,5(1 - 1/m)$, КПД двигателя будет:

$$\eta = 1 / \left(1 + \frac{2 t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}}{k_a^2 (1 - 1/m)} \right). \quad (12)$$

Однако пользоваться непосредственно выражениями (11) и (12) для сравнения циклов по величине КПД двигателя нельзя, так как в них при одинаковой кратности изменения индуктивности $m = \text{const}$ предполагается равенство коэффициентов амплитуды k_a импульса тока обмотки. В действительности при изменении параметра γ в (11) меняется и амплитудное значение тока I'_m , следовательно, и коэффициент k_a , пропорциональный этому

току I'_m . Для учета изменения k_a отметим особенно-сти сравниваемых циклов. Для комбинированного цикла имеем $\gamma = k = I'_m / I_{\text{к}}$, откуда

$$I'_m = \gamma I_{\text{к}}. \quad (13)$$

Аналогично для элементарного цикла $\Psi = \text{const}$ имеем $k = m$, откуда

$$I_{\text{к}} = I'_m / m. \quad (14)$$

Тогда выражение (13) с учетом (14) примет вид:

$$I'_m = (\gamma / m) I_{\text{к}}. \quad (15)$$

Отношение γ / m в (15) применительно к комбинированному циклу будет учитывать изменение k_a при изменении момента переключения $\gamma = \text{var}$. Например, для крайних значений момента переключения $\gamma = m$ и $\gamma = 1$ получим из выражения (15) соотношение $I'_m = I_{\text{к}}$, что соответствует циклу $\Psi = \text{const}$, и соотношение $I'_m = I_{\text{к}} / m$, что соответствует циклу $I = \text{const}$. Промежуточные значения параметра γ соответствуют исследуемому комбинированному циклу, и выражение для КПД (11) станет:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}}{k_a^2 (\gamma / m - 0,5 / m - 0,5 \gamma^2 / m^2)}}. \quad (16)$$

Полученные выражения (12) и (16) используем для сравнения рассматриваемых циклов по величине КПД. На рис. 3 приведены зависимости КПД импульсного ЛЭМД от параметров $\gamma = k$ и относительного времени включения $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}$ обмотки для параметров $m = 10$ и $k_a = 2$ при работе ЛЭМД как по комбинированному, так и по элементарному магнитным циклам.

Значения КПД импульсного ЛЭМД для элементарного цикла $\Psi = \text{const}$ максимальны и на рис. 3 соответствуют значениям $\gamma = k = 10$ и $k_a = 2$ (линия пересечения поверхности с правой вертикальной плоскостью). Из анализа зависимостей (16) следует, что КПД двигателя, функционирующего по комбинированному циклу, с ростом режимного параметра γ также растет и при этом монотонно приближается к своему пределу, определяемому значениями $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}$ и ограниченному соотношением $\gamma = m$, соответствующими циклу $\Psi = \text{const}$ (рис. 3). Причем для $\gamma > 4 \dots 5$ рост КПД в большей степени определяется режимным параметром $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}}$. С его уменьшением КПД растет, приближаясь к единице (рис. 3), что подтверждается исследованиями в работе [5].

При $t_{\text{вкл}} < (2 \dots 3) \tau_{\text{н}}$ интенсивность роста КПД повышается. Это объясняется тем, что с увеличением времени включения коэффициент преобразования электрической энергии в магнитную $\lambda = W_{\text{маг}} / W_{\text{эл}}$ падает из-за роста потерь в обмотке ЛЭМД, что подтверждается результатами исследований в работах [6, 7]. Относительное время выбирают исходя из компромисса между уровнями преобразованной λ и запасаемой магнитной энергии. Например, согласно [6] рекомендуется относительное время выбирать в диапазоне $0,8 \dots 1,5$. При значениях $t_{\text{вкл}} / \tau_{\text{н}} > 1,1$ энергия электрических потерь в обмотке двигателя начинает превышать запасаемую в его

рабочих зазорах магнитную энергию, и КПД становится ниже 50 %. Однако реализация магнитных циклов с малым временем включения (форсировка) затруднительна из-за возрастания потерь от вихревых токов в массивном магнитопроводе и необходимости ограничения амплитуды напряжения питающего импульса ниже значения 1000 В.

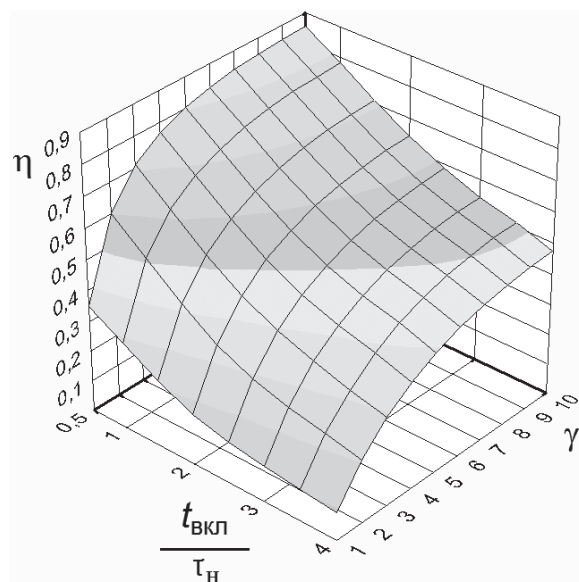


Рис. 3. Зависимости КПД двигателя от режимных параметров γ , k и относительного времени включения $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{н}}$ обмотки для $m=10$ при работе по комбинированному циклу и элементарному циклу $\Psi=\text{const}$ (для $\gamma=k=10$, $k_a=2$)

Воздействие на режимные параметры осуществляется с помощью различных УПУ. Простые УПУ представлены в [6] и обеспечивают изменение таких режимных параметров, как амплитуда, форма, частота и длительность питающего обмотку импульса напряжения за счет изменения угла управления регулируемого преобразователя на основе тиристорного выпрямителя. Однако такие УПУ не обеспечивают возможность увеличения тока трогания. Более сложные УПУ позволяют увеличивать ток трогания (максимальный ток на рис. 1) и осуществлять концентрацию магнитной энергии

рабочих зазоров на этапе трогания якоря [2]. Установлено, что рост тока трогания повышает механическую работу и КПД импульсного ЛЭМД, например, типа ПЭМ-0,8, в 2...2,4 раза [2, 6].

Из сопоставления выражений (15) и (2) следует:

$$I^* = \gamma/m.$$

Тогда КПД импульсного ЛЭМД, работающего по исследуемому комбинированному циклу, выразим через относительный ток и получим

$$\eta = 1 / \left[1 + \frac{t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{н}}}{k_a^2 (I^* - 0,5 / m - 0,5 \cdot I^{*2})} \right].$$

Зависимости КПД импульсного ЛЭМД от относительного тока I^* при $m=10$ и относительном времени включения $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{н}}=0,5$ и $t_{\text{вкл}}/\tau_{\text{н}}=4$ представлены на рис. 2 совместно с механической работой A комбинированного цикла и мощностью потерь ΔP в обмотке. Причем кривые $\eta(I^*)$ аналогичны кривым $\eta(\gamma)$. Предельное значение КПД соответствует значению тока $I^*=1$ и магнитному циклу $\Psi=\text{const}$.

Рассмотренные комбинированные магнитные циклы наиболее близки к реальным магнитным циклам, по которым работают импульсные ЛЭМД в приводе, например, прессового оборудования [6, 7].

Выводы

Использование магнитной системы линейного электромагнитного двигателя с двумя рабочими зазорами обеспечивает рациональные значения кратности изменения индуктивности исследуемого магнитного цикла даже при небольших рабочих ходах. Анализ расчетных выражений механической работы и КПД импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке на примере комбинированного цикла, образованного элементарными магнитными циклами с постоянным током и постоянным потокоцеплением, показал, что при повышении тока трогания возрастают аккумулируемая в рабочих зазорах магнитная энергия и КПД. При этом реализуются магнитные циклы с большей механической работой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М. Об энергопреобразовании в электромагните // Известия Томского политехнического института. – 1965. – Т. 129. – С. 173–178.
2. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с регулируемыми выходными параметрами: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 177 с.
3. Угаров Г.Г. Принципы повышения удельных силовых и энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей / под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 43–50.
4. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа / под общ. ред. Н.П. Ряшенцева // Импульсный электромагнитный привод: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 38–44.
5. Ряшенцев Н.П., Ковалев Ю.З. Динамика электромагнитных импульсных систем. – Новосибирск: Наука, 1974. – 188 с.
6. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
7. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели. – Курган: Изд-во КГУ, 2010. – 220 с.

Поступила 17.04.2012 г.