

В.В. Суханов

Электромагнит возвратно-поступательного движения

Исходные данные для расчёта

Максимальные габариты цилиндрического электромагнита: $R_{\max} = 95 \text{ мм}$, $L_{\max} = 150 \text{ мм}$.

Рабочий зазор: $\delta_{\max} = 5 \text{ мм}$. Полезная нагрузка: $m_{\text{п}} = 1 \text{ кг}$.

Система питания катушек электромагнита: последовательность импульсов постоянного тока.

Частота следования прямоугольных импульсов: $f = 25 \text{ Гц}$

Временные параметры импульсов: $t_{\text{движ}} = t_{\text{удерж}}$, $t_{\text{имп}} = 2 \cdot t_{\text{движ}} = 2 \cdot t_{\text{удерж}}$, $T_{\text{имп}} = 2 \cdot t_{\text{имп}}$.

Конструктивная схема и основные размеры электромагнита

Выбранная конструктивная схема электромагнита при нейтральном положении подвижного штока показана на рис. 1. Распределение магнитного поля в магнитной системе электромагнита таково, что при питании одной из катушек сквозь сечения $S_{\text{Т}}$, $S_{\text{шш}}$, $S_{\text{пшш}}$ и $S_{\text{нс}}$ (смотри рис. 1) проходит практически один и тот же магнитный поток Φ . Для того, чтобы среднее значение магнитной индукции B в этих сечениях было примерно одинаковым необходимо, чтобы

$$S_{\text{Т}} = S_{\text{шш}} = S_{\text{пшш}} = S_{\text{нс}}, \quad (1)$$

где

$$S_{\text{Т}} = \pi \cdot (R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2) = 2\pi R_{\text{ср}} h_{\text{Т}}, \quad R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{н}} + R_{\text{в}}}{2}, \quad h_{\text{Т}} = R_{\text{н}} - R_{\text{в}}$$

$$S_{\text{шш}} = 2\pi R_{\text{ш}} l_{\text{шш}}, \quad S_{\text{пшш}} = \pi R_{\text{ш}}^2, \quad S_{\text{нс}} = 2\pi R_{\text{ш}} l_{\text{нс}} \quad (2)$$

Равенства (1) с учётом выражений (2) принимают следующий вид:

$$h_{\text{Т}} \frac{R_{\text{ср}}}{R_{\text{ш}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{2} = l_{\text{шш}} = l_{\text{нс}} \quad (3)$$

Из первого соотношения (3) следует, что

$$R_{\text{ш}} = \sqrt{2h_{\text{Т}} R_{\text{ср}}} \quad (4)$$

Размеры $h_{\text{Т}}$ и $R_{\text{ср}}$ в (4) неизвестны, но взаимосвязаны между собой. В частности, при известном габаритном значении $R_{\text{н}}$ (смотри рис. 1) можно задаться толщиной

наружного сердечника h_T , значение которой сразу определяет радиус R_B , а следовательно и величину R_{cp} . После этого по (4) можно найти радиус $R_{ш}$ и далее по (3) осевые длины $l_{цш}$ и $l_{нс}$. Из рассмотрения рис. 1 видно, что выбор h_T однозначно определяет и высоту окна h_k , где должны размещаться катушки обмотки возбуждения. Эти размеры также взаимосвязаны. Это следует из двух основополагающих выражений для магнитной индукции B_δ в основном рабочем зазоре и силы F , действующей на шток:

$$B_\delta = \frac{\mu_o}{\delta} I_k w_k = \frac{\mu_o}{\delta} I_\Sigma = \frac{\mu_o}{\delta} j_{расч} S_k = \frac{\mu_o}{\delta} j_{расч} h_k l_k, \quad (5)$$

$$F = \frac{B_\delta^2}{2\mu_o} S_T = \frac{B_\delta^2}{2\mu_o} 2\pi R_{cp} h_T \quad (6)$$

Строго говоря, выражения (5) и (6) справедливы для однородного поля и для ненасыщенной магнитной системы. Тем не менее, при определенных допущениях их можно использовать для предварительных расчётов.

В выражении (5) $I_\Sigma = I_k \cdot w_k$ – полный ток или намагничивающая сила обмотки возбуждения, $j_{расч}$ – расчётная плотность тока при моделировании магнитного поля в реальной конструкции электромагнита.

Таким образом, размер h_T следует выбирать таким, чтобы осталось достаточно места для высоты окна (размер h_k), где размещаются катушки с током обмоток возбуждения.

При ограниченных габаритах (R_H и $L_{ш}$) и выборе радиальных размеров по (4) размеры окна под катушку h_k и l_k определяются автоматически. Затем по (5) и (6) следует оценить на какую индукцию в зазоре при допустимой плотности тока $j_{расч}$ можно рассчитывать и какое значение силы при этой индукции можно получить в начале движения штока, когда $\delta = 5$ мм.

Ниже приводится пример расчёта основных размеров электромагнита на основе вышеизложенного подхода.

Пусть $h_T = 20$ мм. Тогда $R_B = R_H - h_T = 95 - 20 = 75$ мм, $R_{cp} = 0,5(95+75) = 85$ мм.

При этом $R_{ш} = \sqrt{2 \cdot 85 \cdot 20} = 58,3 \approx 58$ мм, $l_{цш} = l_{нс} = 0,5 \cdot 58,3 = 29,15 \approx 29$ мм.

Высота окна $h_k = R_B - R_{ш} - \Delta = 75 - 58 - 0,5 = 16,5$ мм, где $\Delta = 0,5$ мм – зазор между наружным сердечником и штоком, необходимый для свободного перемещения штока в осевом направлении.

Длина окна

$l_k = 0,5 \cdot [L_{ш} - (l_{цш} + 2 \cdot l_{нс} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot l_B)] = 0,5 \cdot [150 - (29 + 2 \cdot 29 + 2 \cdot 2,5 + 2 \cdot 5)] = 24$ мм, где $l_B = 5$ мм – длина выступов штока, находящегося в нейтральном положении, относительно торцевых поверхностей наружных сердечников.

Таким образом, площадь окна (площадь поперечного сечения катушки) $S_k = 16,5 \cdot 24 = 396$ мм², а отношение $k_k = l_k / h_k = 24 / 16,5 = 1,454$. Следует отметить, что рекомендуемые значения $k_k = 1,5 - 3$.

При естественном охлаждении реальное значение плотности тока $j_{реал}$ рекомендуется выбирать в пределах (3–5) А/мм² при значении коэффициента заполнения окна $k_3 = (0,72 - 0,81)$. Задаваясь средними значениями $j_{реал}$ и k_3 , будем иметь:

$$j_{реал} = 4 \text{ А/мм}^2, \quad k_3 = 0,765.$$

Если при этом учесть, что обмотки возбуждения запитываются импульсами постоянного тока со скважностью $\varepsilon = t_{имп} / T_{имп} = 0,5$, то реальное значение плотности тока $j_{реал}$ в импульсе можно удвоить, поскольку среднее за период $T_{имп}$ значение $j_{реал}$ будет попрежнему оставаться равным 4 А/мм². Таким образом, расчётное значение плотности тока можно записать в виде:

$$j_{расч} = (j_{реал} \cdot k_3) / \varepsilon = (4 \cdot 0,765) / 0,5 = 6,12 \text{ А/мм}^2 \quad (7)$$

Тогда индукция и сила согласно (5) и (6) определяются, как:

$$B_\delta = \frac{\mu_o}{\delta} \frac{j_{расч} k_3}{\varepsilon} S_k = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{0,005} \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 0,765}{0,5} \cdot 396 \cdot 10^{-6} = 0,609 \text{ Т} \quad (8)$$

$$F_{нач} = \frac{B_\delta^2}{\mu_o} \pi R_{ср} h_T = \frac{0,609^2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \pi \cdot 85 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 1576,2 \text{ Н} \quad (9)$$

Вместе с тем рекомендуемые значения индукции в зазоре находятся в пределах $B_\delta = (0,8 - 1,5)$ Т. При таких значениях B_δ предполагается, что индукции в ферромагнитных сердечниках должны определяться величинами порядка $B_{Fe} = (1,2 - 1,5)$ Т. Таким образом, полученный результат (8) показывает, что при заданных габаритных ограничениях ($R_H = 95$ мм и $L_{ш} = 150$ мм) данный электромагнит по

ферромагнитному материалу будет недоиспользован. Иначе можно сказать, что размеры R_H и $L_{ш}$ тоже должны быть согласованными. Покажем это на примере, когда нет ограничений по осевому размеру $L_{ш}$.

После того, как вышеуказанным способом определены радиальные и осевые размеры h_T , $R_{ш}$, h_k , $l_{цш}$ и $l_{нс}$ следует задаться значением \mathbf{B}_δ . Пусть $\mathbf{B}_\delta = 1 \text{ Т}$. Тогда, согласно (5), полный ток или намагничивающая сила катушки будет равна:

$$I_\Sigma = I_k W_k = \frac{\delta \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{0.005 \cdot 1}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 3978.9 \text{ А} \quad (10)$$

Площадь окна под катушку и осевая длина окна определяются, как

$$S_k = \frac{I_\Sigma}{j_{расч}} = \frac{3978.9}{6.12} = 650.15 \text{ мм}^2, \quad l_k = \frac{S_k}{h_k} = \frac{650.15}{16.5} = 39.4 \approx 40 \text{ мм} \quad (11)$$

При этом отношение $k_k = 40/16,5 = 2,424$, что укладывается в рекомендуемый диапазон.

Наконец, осевая длина штока будет равна:

$$L_{ш} = 2 \cdot (l_b + l_{нс} + l_k + \delta) + l_{цш} = 2 \cdot (5 + 29 + 40 + 2.5) + 29 = 182 \text{ мм} \quad (12)$$

Результат (12) следует рассматривать как оптимальное значение $L_{ш}$, соответствующее радиальному размеру $R_H = 95 \text{ мм}$.

Несмотря на вышеизложенное и следуя исходным данным, был выбран вариант расчёта по первому способу, когда есть ограничения как по R_H , так и по $L_{ш}$. Окончательные результаты расчёта основных размеров электромагнита приведены на рис. 1 и несколько отличаются от вышерассмотренного примера. Вызвано это было желанием пусть ненамного, но хотя бы чуть-чуть увеличить площадь окна S_k под катушки обмоток возбуждения, что было достигнуто за счет небольшого (на 3 мм) уменьшения радиуса $R_{ш}$. Кроме того были округлены до 30 мм размеры $l_{цш}$ и $l_{нс}$. В результате оказалось, что $S_k = 19,5 \cdot 22,5 = 438,75 \text{ мм}^2$ (в приведённом примере расчёта $S_k = 396 \text{ мм}^2$). Эти изменения, естественно, привели к незначительному нарушению условия (1), о чем можно судить по следующим значениям площадей:

$$S_T = 10681 \text{ мм}^2, \quad S_{цш} = 10367 \text{ мм}^2, \quad S_{пш} = 9503 \text{ мм}^2, \quad S_{нс} = 10462 \text{ мм}^2$$

Объём штока (подвижной части электромагнита) равен: $V_{ш} = V_{1ш} + V_{2ш}$, где

$$V_{1ш} = \pi R_{ш}^2 \cdot l_{ш} = \pi (55 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 1.425 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_{2ш} = \pi(R_n^2 - R_{ш}^2) \cdot l_{ш} = \pi[(95 \cdot 10^{-3})^2 - (55 \cdot 10^{-3})^2] \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0.566 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_{ш} = 1.425 \cdot 10^{-3} + 0.566 \cdot 10^{-3} = 1.991 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Принимаем, что материал штока – это Сталь 3 с удельным весом $\gamma = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Тогда масса штока будет равна: $m_{ш} = V_{ш} \cdot \gamma = 1,991 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 15,53 \text{ кг}$.

Поскольку масса полезной нагрузки $m_n = 1 \text{ кг}$, то общая масса m будет равна:

$$m = m_{ш} + m_n = 15,53 + 1 = 16,53 \text{ кг}$$

Методика исследований и расчётов

Методика исследований и расчётов состоит из двух этапов. На первом этапе решается электромагнитная задача. Это осесимметричная задача нелинейной магнитостатики. Решается она с помощью конечно-элементного программного комплекса «ELCUT». Расчёт магнитостатического поля ведётся через векторный магнитный потенциал A , который удовлетворяет уравнению Пуассона. В цилиндрической системе координат r, z оно имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial(rA)}{r \partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j_{\text{расч}} \quad (13)$$

где μ – магнитная проницаемость наружного сердечника и штока (внутреннего сердечника).

Нелинейные ферромагнитные свойства сердечников задаются кривой намагничивания $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ для Стали 3 с помощью кубического сплайна.

Решение уравнения (13) осуществляется для различных положений штока относительно неподвижных наружных сердечников электромагнита. Для каждого положения штока с помощью интегрального калькулятора, встроенного в пакет «ELCUT», определяется суммарная магнитостатическая сила, действующая на ферромагнитный шток. Таким образом, определяется зависимость движущей силы $F_{\text{дв}}$ от расстояния S (пройденного пути) в процессе перемещения штока по зазору δ . При этом, если зазор δ изменяется от δ_{max} до нуля, то расстояние S изменяется от нуля до δ_{max} . На этом первый этап расчётов заканчивается.

В задачу второго этапа расчётов входит определение графика пути или зависимости расстояния S от времени t . Это необходимо для того, чтобы знать и быть

уверенным, что шток достигает своего крайнего положения за отведенное ему время движения $t_{\text{дв}}$. Эта задача решается следующим образом.

Уравнение баланса сил имеет вид:

$$F_{\text{дв}}(S) = F_c + F_{\text{и}} = m \cdot g + m \cdot a \quad (14)$$

где F_c - сила сопротивления, а $F_{\text{и}}$ - инерционная сила.

Разрешая уравнение (14) относительно ускорения « а » и учитывая, что $a = \partial^2 S / \partial t^2$, можно записать следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = \frac{1}{m} F_{\text{дв}}(S) - g \quad (15)$$

Это нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка. С помощью подстановки $\partial S / \partial t = V$, где V – скорость, уравнение (15) можно свести к системе двух уравнений, но уже первого порядка. Полученная система выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{m} F_{\text{дв}}(S) - g \quad , \quad \frac{\partial S}{\partial t} = V \quad (16)$$

Решение системы (16) даёт сразу как график пути $S(t)$, так и график скорости $V(t)$, но само решение может быть получено только численным методом. Для численного интегрирования системы (16) был выбран метод Эйлера, который практически реализован в вычислительном пакете «Mathcad 2001i». Для осуществления процесса решения по методу Эйлера таблично заданная функция $F_{\text{дв}}(S)$, полученная из решения полевой задачи [уравнение (13), пакет «ELCUT»], сначала аппроксимируется кубическим сплайном с помощью стандартной программы в пакете «Mathcad 2001i», после чего используется непосредственно для решения системы (16). Интегрирование системы (16) производится от момента времени $t = 0$ до момента времени $t = t_{\text{дв}}$. На этом заканчивается второй этап расчётов.

По результатам расчётов второго этапа определяется выполняется ли условие $S(t_{\text{дв}}) = \delta_{\text{max}}$ или нет. Если условие $S(t_{\text{дв}}) = \delta_{\text{max}}$ не выполняется, то приходится возвращаться к первому этапу, вновь решая уравнение (13) при новом значении $j_{\text{расч}}$, чтобы получить новую зависимость $F_{\text{дв}}(S)$. И так далее, пока не выполнится условие $S(t_{\text{дв}}) = \delta_{\text{max}}$. Таким образом, процесс расчётов по обоим этапам носит итерационный

характер. Тем не менее, при наличии определенного опыта расчётов количество таких итераций может быть сведено к минимуму.

Основные результаты исследований и расчётов

Основные результаты исследований и расчётов для случая, когда запитана правая катушка обмотки возбуждения, неравномерно ускоренное движение штока осуществляется слева направо (движущая сила $F_{дв}$ – положительна), частота следования прямоугольных импульсов $f = 25 \text{ Гц}$ (время движения штока $t_{дв} = 0,01 \text{ сек}$) и площадь окна под катушку $S_k = 438,75 \text{ мм}^2$, представлены в таблице 1 и на рис. 2-4.

Расчёт катушки обмотки возбуждения

Выбираем провод марки ПЭТВП. Это провод прямоугольного сечения, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости (ГОСТ 17708-72).

Класс изоляции F. Рабочая температура $\theta_{раб} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная температура $\theta_{max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Размеры неизолированного провода: $a = 1 \text{ мм}$ (высота), $b = 2 \text{ мм}$ (ширина).

Сечение неизолированного провода $S_{пр} = 1,785 \text{ мм}^2$.

Двусторонняя толщина изоляции $0,12 \text{ мм}$.

Размеры изолированного провода: $A = 1,12 \text{ мм}$ (высота), $B = 2,12 \text{ мм}$ (ширина).

Число слоёв по высоте катушки при коэффициенте плотности намотки $\kappa_H = 0,85 - 0,9$:

$$n_{сл} = \frac{h \cdot \kappa_H}{A} = \frac{19,5 \cdot (0,85 \div 0,9)}{1,12} = 14,8 \div 15,7$$

Принимаем $n_{сл} = 15$.

Число витков в слое при коэффициенте плотности намотки $\kappa_H = 0,85 - 0,9$:

$$w_{сл} = \frac{l_k \cdot \kappa_H}{B} = \frac{22,5 \cdot (0,85 \div 0,9)}{2,12} = 9,02 \div 9,55$$

Принимаем $w_{сл} = 9$.

Общее число витков в катушке: $w_k = n_{сл} \cdot w_{сл} = 15 \cdot 9 = 135 \text{ витков}$.

Ток в катушке обмотки возбуждения:

$$I_k = \frac{I_{\Sigma}}{w_k} = \frac{2474,55}{135} = 18,33 \text{ А}$$

Реальная плотность тока в катушке обмотки возбуждения (в импульсе):

$$j_{\text{реал}} = \frac{I_{\text{к}}}{S_{\text{пр}}} = \frac{18,33}{1,785} = 10,27 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Средняя за период $T_{\text{имп}}$ плотность тока в катушке обмотки возбуждения:

$$J_{\text{ср}} = j_{\text{реал}} \cdot \varepsilon = 10,27 \cdot 0,5 = 5,135 \text{ А/мм}^2,$$

что допустимо для провода с изоляцией класса F.

Средняя длина витка:

$$l_{\text{w}} = 2\pi R_{\text{ср}}^{(\text{w})} = 2\pi \left(R_{\text{в}} - \frac{h_{\text{к}}}{2} \right) = 2\pi \cdot \left(75 - \frac{19,5}{2} \right) = 410 \text{ мм}$$

Длина провода: $L_{\text{п}} = l_{\text{w}} \cdot w_{\text{к}} = 410 \cdot 135 = 55350 \text{ мм} = 55,35 \text{ м}$.

Сопротивление обмотки возбуждения при комнатной температуре ($\theta_{\text{ком}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$R_{20^\circ\text{C}}^{(\text{обм})} = \frac{L_{\text{п}} (\text{м})}{57 \cdot S_{\text{пр}} (\text{мм})} = \frac{55,35}{57 \cdot 1,785} = 0,544 \text{ Ом}$$

Сопротивление обмотки возбуждения при рабочей температуре ($\theta_{\text{раб}} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$R_{115^\circ\text{C}}^{(\text{обм})} = k_{t,115} \cdot R_{20^\circ\text{C}}^{(\text{обм})} = 1,38 \cdot 0,544 = 0,751 \text{ Ом},$$

где $k_{t,115} = 1,38$ – температурный коэффициент увеличения сопротивления обмотки для класса изоляции F (перегрев $95 \text{ }^\circ\text{C}$).

Напряжение питания катушки обмотки возбуждения:

$$U_{\text{к}} = I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}} = 18,33 \cdot 0,751 = 13,766 \text{ В}$$

Мощность в импульсе, потребляемая обмоткой возбуждения:

$$P_{\text{имп}} = U_{\text{к}} \cdot I_{\text{к}} = 13,766 \cdot 18,33 = 252,33 \text{ Вт}.$$

Теперь, когда известны число витков катушки $w_{\text{к}}$ и ток катушки $I_{\text{к}}$, можно определить её индуктивность $L_{\text{к}}$, которая в свою очередь будет зависеть от величины зазора δ в процессе перемещения штока. Расчёт $L_{\text{к}}$ ведётся на основе полевых решений с помощью «Мастера индуктивностей» программного комплекса «ELCUT». Результаты расчёта $L_{\text{к}}$ приводятся в нижеследующей таблице для тех же условий по δ и S , что и в таблице 1 (последняя итерация).

Зазор δ	мм	5	4	3	2	1	0,05
Расстояние S	мм	0	1	2	3	4	4,95
Индуктивность $L_{\text{к}}$	Гн	0,06885	0,07793	0,09104	0,1099	0,1285	0,1429

Выводы

1. Разработана и апробирована инженерная методика расчёта электромагнита возвратно-поступательного движения, основанная на использовании современных вычислительных пакетов «ELCUT» и Mathcad.
2. Для конкретных условий расчёта приведены результаты исследований и вычислений, не противоречащие общепринятым теоретическим представлениям и физическим процессам, протекающим в электромагнитных устройствах предложенной конструкции.

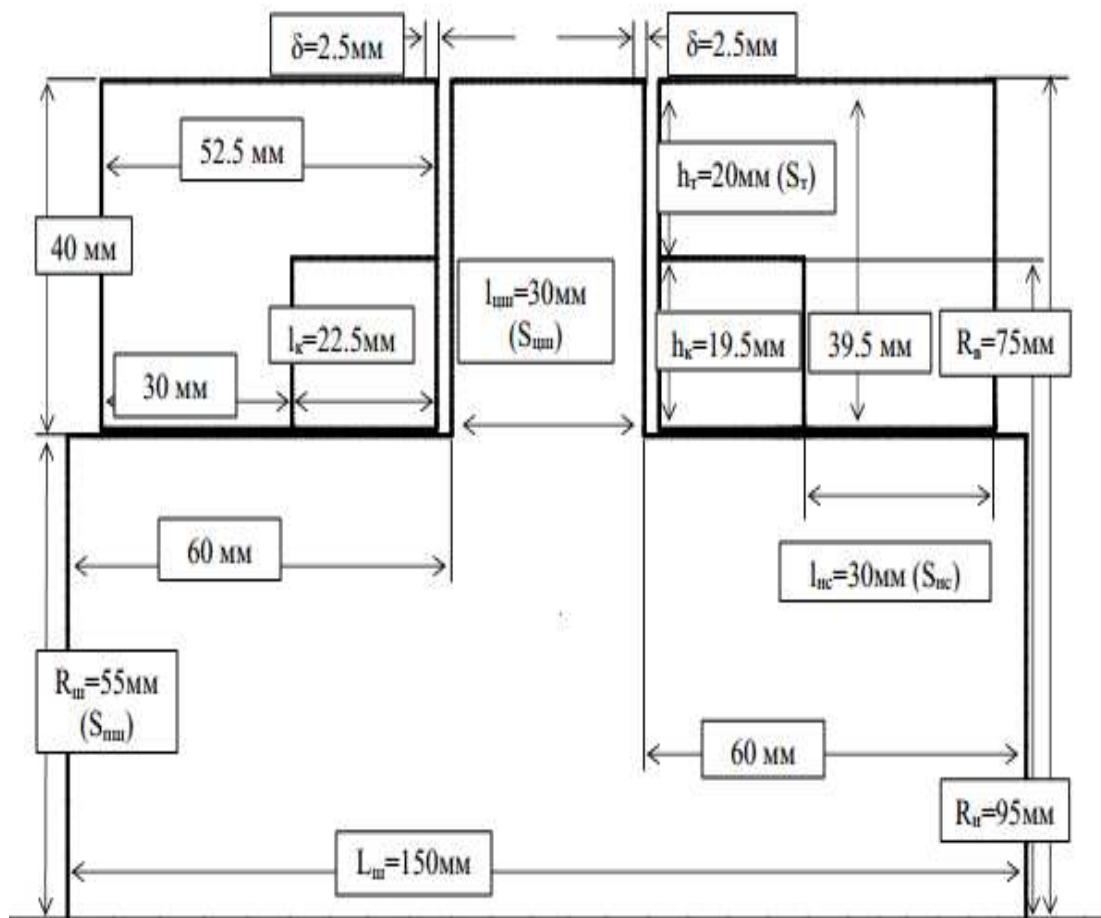


Рис. 1. $h_{т}$ - толщина наружного сердечника в области основного зазора, $S_{т}$ - площадь торцевой поверхности наружного сердечника в области основного зазора, $l_{ис}$ -осевая длина наружного сердечника в концевой части штока, $S_{ис}$ -площадь цилиндрической поверхности наружного сердечника в концевой части штока, $l_{шт}$ -осевая длина центральной части штока, $S_{шт}$ -площадь цилиндрической поверхности центральной части штока, $R_{шт}$ -радиус концевой части штока, $S_{шт}$ - площадь поперечного сечения концевой части штока.

Таблица 1. Результаты расчёта (первая и последняя итерации) Неравномерно ускоренное движение штока слева направо. Запитана правая катушка. Частота следования прямоугольных импульсов $f = 25 \text{ Гц}$. $t_{\text{дв}} = 0.01 \text{ сек}$. Площадь окна под катушку $S_k = 438.75 \text{ мм}^2$.

		Первая итерация					
Зазор δ	<i>мм</i>	5	4	3	2	1	0.05
Расстояние S	<i>м</i>	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,00495
Плотность тока $j_{\text{расч}}$	<i>А/мм2</i>	4	4	4	4	4	4
Сила $F_{\text{дв}}$ из расчёта поля	<i>Н</i>	662	946	1487	2702	5927	11765
Результат $S(t_{\text{дв}})$ из графика пути $S(t)$	<i>м, мм</i>	$1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1.7 \text{ мм}$					
		Последняя итерация					
Зазор δ	<i>мм</i>	5	4	3	2	1	0,05
Расстояние S	<i>м</i>	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,00495
Плотность тока $j_{\text{расч}}$	<i>А/мм2</i>	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
Сила $F_{\text{дв}}$ из расчёта поля	<i>Н</i>	1319 (-1312)	1876 (-1875)	2894 (-2912)	4895 (-4870)	8124 (-8122)	13406 (-13331)
Результат $S(t_{\text{дв}})$ из графика пути $S(t)$	<i>м, мм</i>	$5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}$					
Магнитный поток в зазоре Φ_{δ}	<i>Вб</i>	0,00537	0,00651	0,00824	0,01092	0,01437	0,01878
Средняя индукция в зазоре $B_{\text{ср}}$	<i>Т</i>	0,502	0,61	0,771	1,022	1,345	1,758
Средняя индукция $B_{\text{ср}}$ в сечении $S_{\text{пш}}$	<i>Т</i>	0,838	0,939	1,111	1,357	1,596	1,766
Средняя индукция $B_{\text{ср}}$ в сечении $S_{\text{пш}}$	<i>Т</i>	0,991	1,122	1,309	1,576	1,835	2,024
Средняя индукция $B_{\text{ср}}$ в сечении $S_{\text{нс}}$	<i>Т</i>	0,836	0,942	1,095	1,315	1,526	1,676
Намагничивающая сила (Н.С.) катушки $I_{\Sigma} = I_k \cdot w_k = j \cdot S_k = 5,64 \cdot 438,75 = 2474,55 \text{ А}$							

*) В строке для $F_{\text{дв}}$ в скобках указаны значения движущей силы, когда запитана левая катушка, а движение штока осуществляется справа налево, о чём свидетельствует знак минус у $F_{\text{дв}}$.

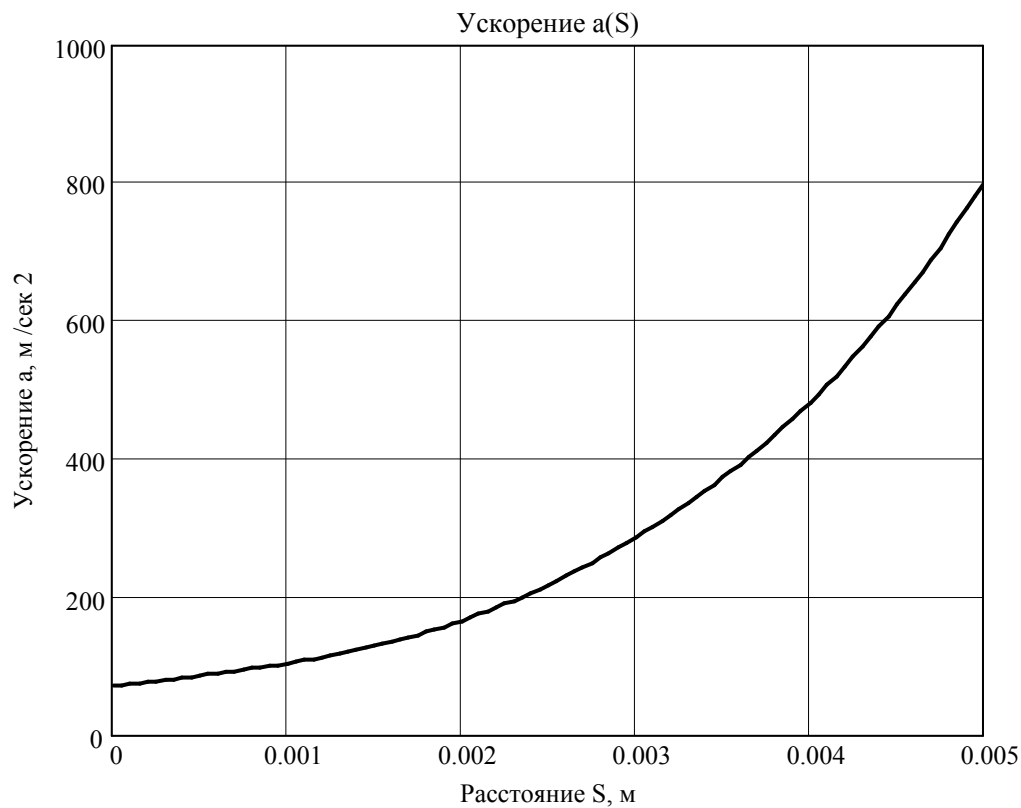
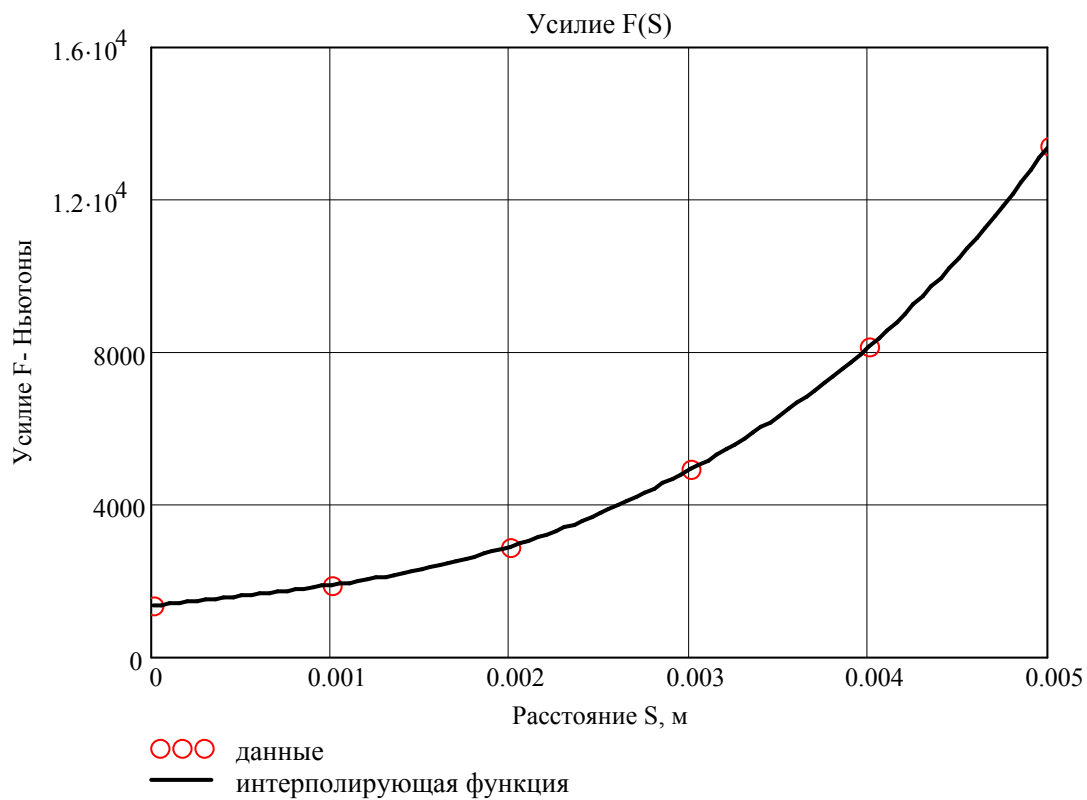


Рис. 2. Неравномерно ускоренное движение штока слева направо. Работает правая катушка. Намагничивающая сила $I_k \cdot w_k = 2474,55 \text{ A} = \text{const}$. Площадь окна под катушку $S_k = l_k \cdot h_k = 22,5 \cdot 19,5 = 438,75 \text{ мм}^2$. Расчётная плотность тока $J_{\text{расч}} = I_k \cdot w_k / S_k = 5,64 \text{ A/мм}^2 = \text{const}$. Частота $f = 25 \text{ Гц}$.

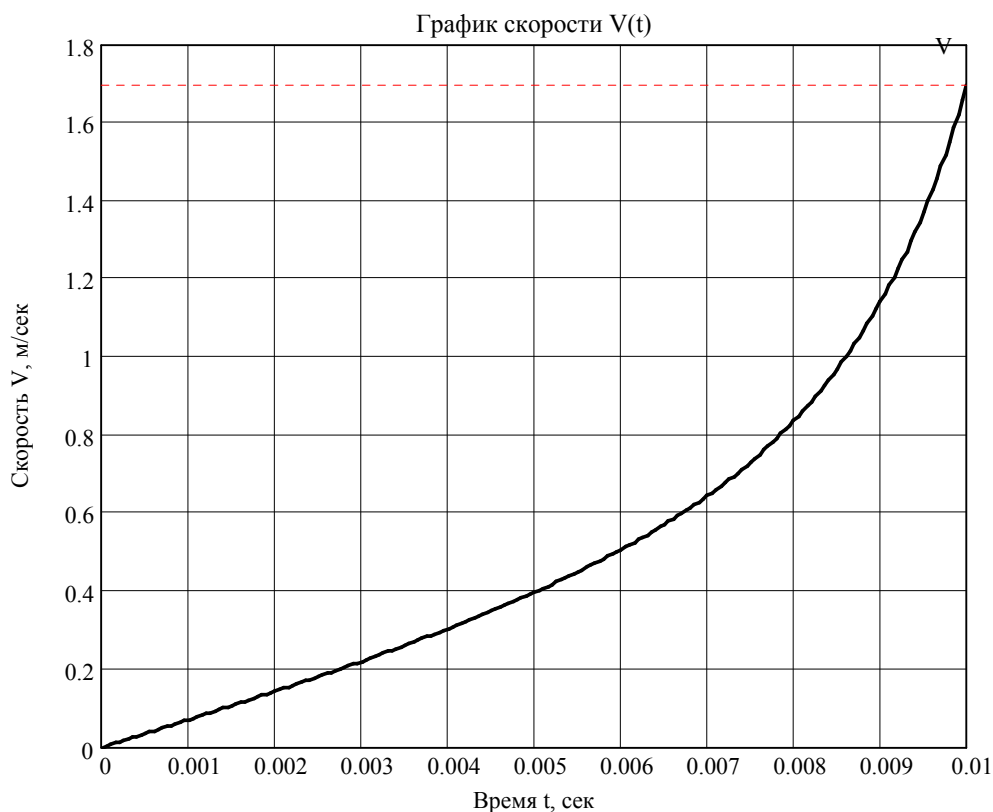
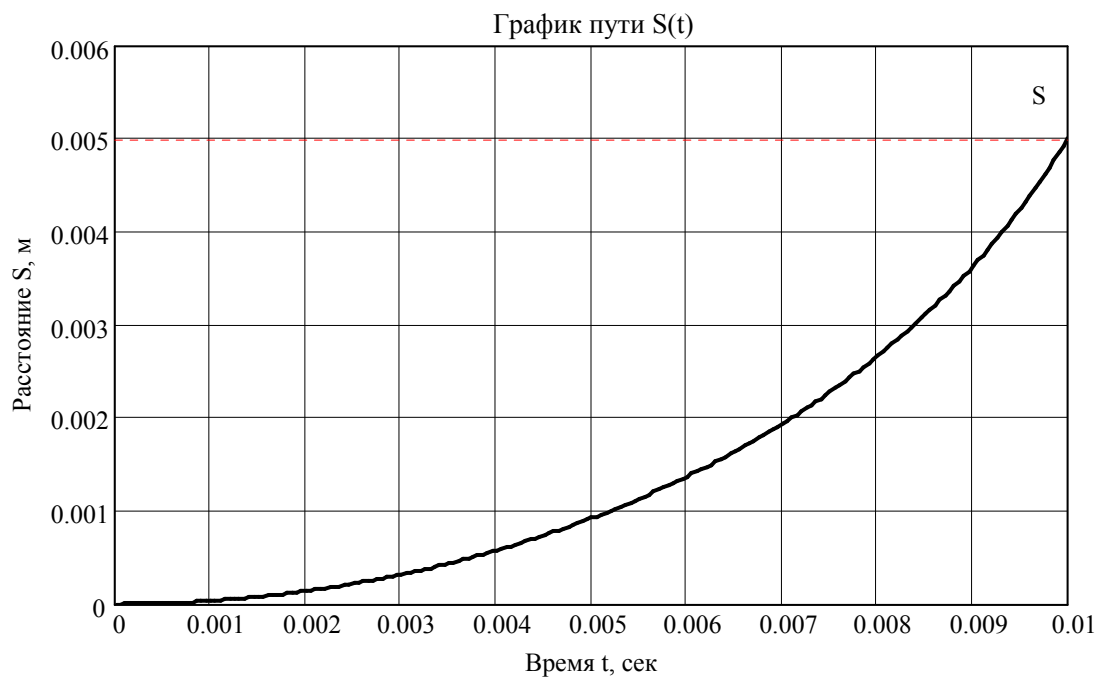
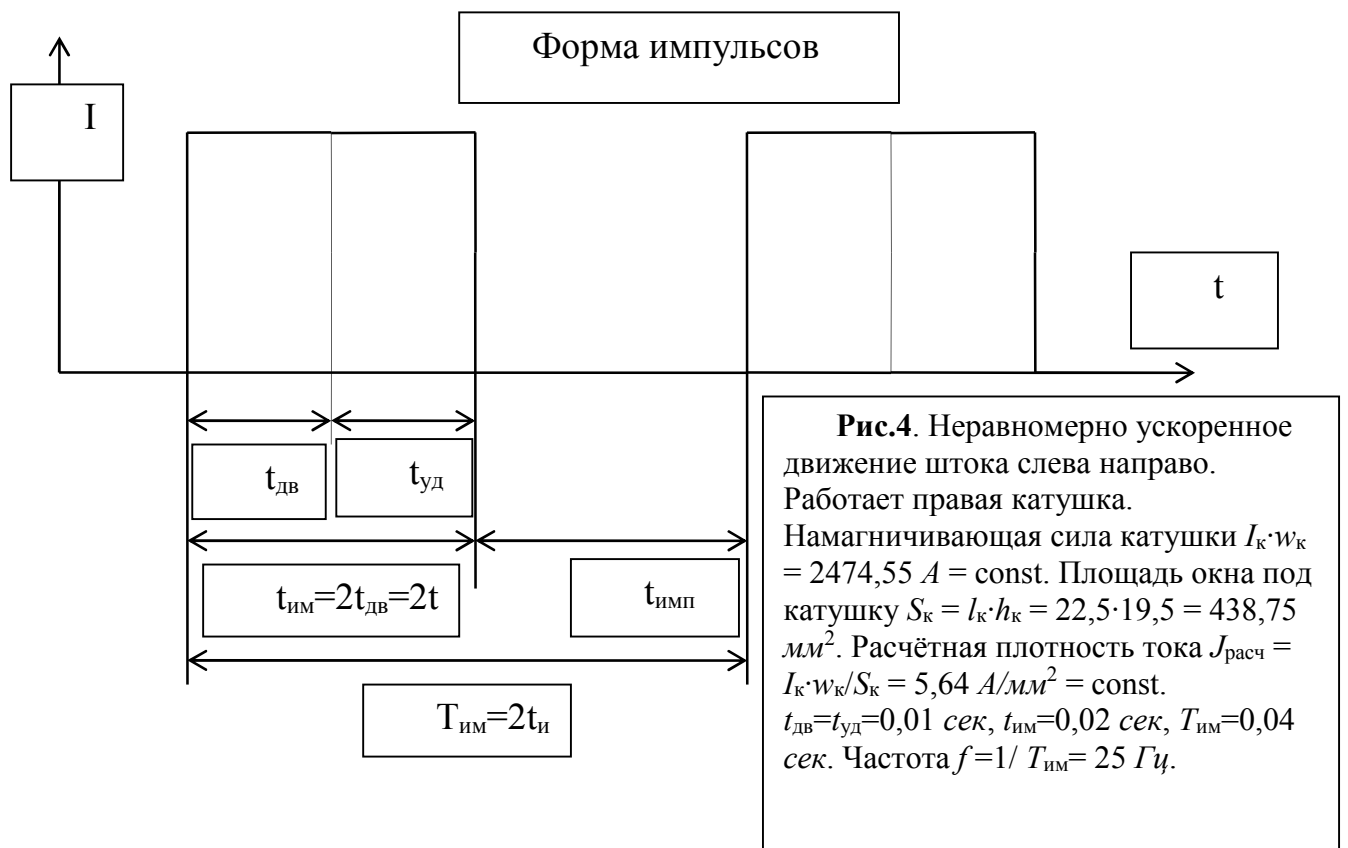
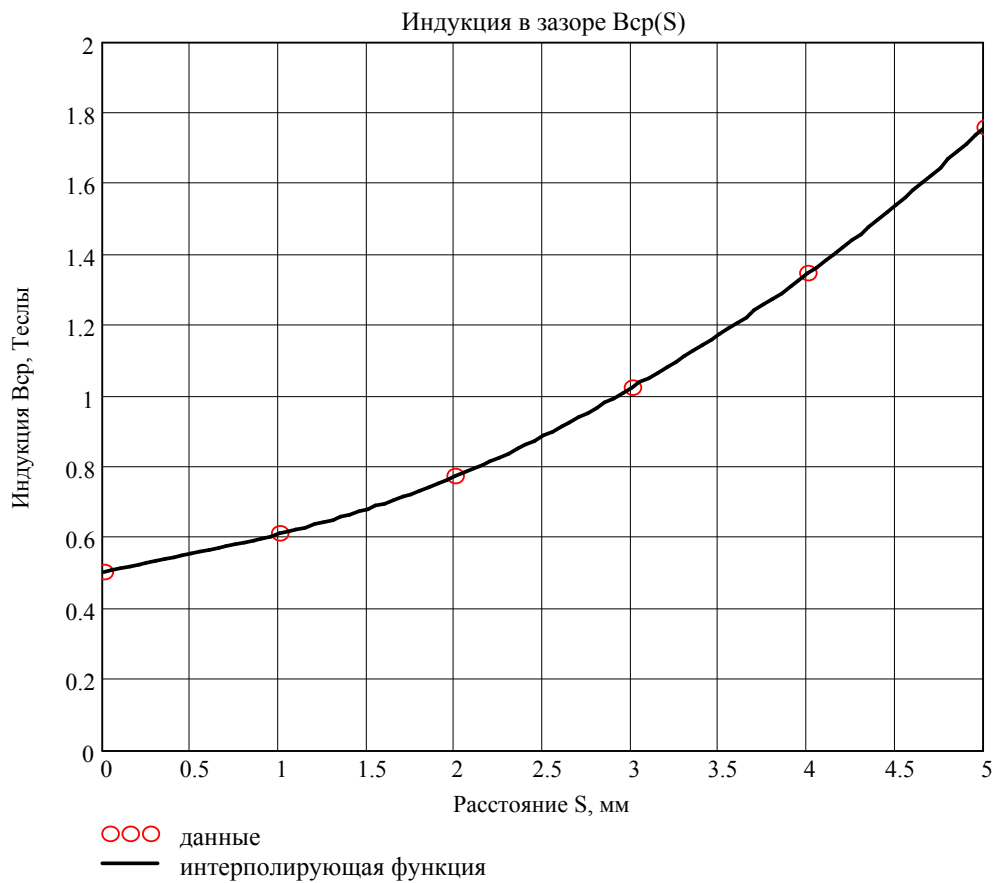


Рис. 3. Неравномерно ускоренное движение штока слева направо. Работает правая катушка. Намагничивающая сила $I_k \cdot w_k = 2474,55 \text{ A} = \text{const}$. Площадь окна под катушку $S_k = l_k \cdot h_k = 22,5 \cdot 19,5 = 438,75 \text{ мм}^2$. Расчётная плотность тока $J_{\text{расч}} = I_k \cdot w_k / S_k = 5,64 \text{ A/мм}^2 = \text{const}$. Частота $f = 25 \text{ Гц}$.



Об авторе

Суханов Виктор Васильевич, Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет, кафедра «Электрические машины»