

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разомкнутость магнитопровода и насыщение стали обуславливают появление пульсирующих составляющих магнитного поля в ярме и воздушном зазоре линейного двигателя. Последние затрудняют аналитическое определение параметров проектируемой машины. Вместе с тем зачастую имеется уже готовый двигатель (модель), физически полностью или приближенно подобный первому (оригиналу). В этом случае параметры оригинала (значок «О») определяются простым пересчетом данных, полученных на модели (значок «М»).

Наиболее удобно рассматривать двигатель в характерных режимах, например при холостом ходе (х. х.) и при коротком замыкании. В данной работе предлагается методика физического моделирования устройства с разомкнутым магнитопроводом в режиме х. х. В основу положены следующие условия:

- 1) элементы конструкции модели и оригинала выполнены из одинаковых материалов ($k_\mu = k_\nu = 1$);
- 2) потери в стали пренебрежимо малы;
- 3) обмотки модели и оригинала имеют одинаковое конструктивное исполнение;
- 4) числа пар полюсов равны ($p^O = p^M$).

В этом случае для полного физического подобия электромагнитных полей в магнитопроводах модели и оригинала требуется выполнить их геометрическое подобие и подобие кривых намагничивающих сил индукторов. Тогда для э. д. с. E и тока I модели (оригинала) можно ввести критериальные зависимости вида [1, 2]

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \text{idem}; \\ \dot{I} &= \text{idem}. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом базисные величины связаны масштабами подобия

$$k_E = \frac{E_\delta^M}{E_\delta^O} = k_d^2 k_f; \quad k_I = \frac{I_\delta^M}{I_\delta^O} = k_d; \quad k_d = \frac{\tau^M}{\tau^O} \quad (2)$$

В случае аффинного подобия выражения (2) изменятся

$$k_d \neq k_l = \frac{l^M}{l^O}; \quad (2a)$$

$$k_E = k_d k_l k_f.$$

Масштаб по частоте k_f выбирается в соответствии с критерием гомохронности [1].

При малых потерях в стали и слабо выраженном эффекте вытеснения, когда ставится задача моделирования магнитного поля оригинала в установившемся режиме, соотношение (2a) может быть нарушено без ущерба для точности. На рис. 1 приведены х. х. х. линейного двигателя, полученные экспериментально и при помощи модели с $k_d = 0,5$.

Практически более важными являются случаи приближенного подобия. В первую очередь возможен вариант, когда геометрическое подобие выполняется, но нарушена одинаковость исполнения обмоток модели и оригинала. Погрешности здесь проявляются при экспериментальном определении характеристик модели, когда переход от измеряемых приборами величин к используемым для пересчета на оригинал связан с учетом первичных параметров. В этом случае масштабы по э. д. с. и по напряжению связаны приближенной зависимостью:

$$k_E = \frac{k_{\mathcal{E}}}{k_1}, \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{\dot{\sigma}_1^M}{\dot{\sigma}_1^O}$ [3].

Коэффициент k_1 может быть найден довольно точно предварительным расчетом и корректировка результатов с учетом этого коэффициента практически исключает указанный источник погрешностей. В некоторой степени различается лишь соотношение обратной и прямой последовательностей в токах (или напряжениях) модели и оригинала.

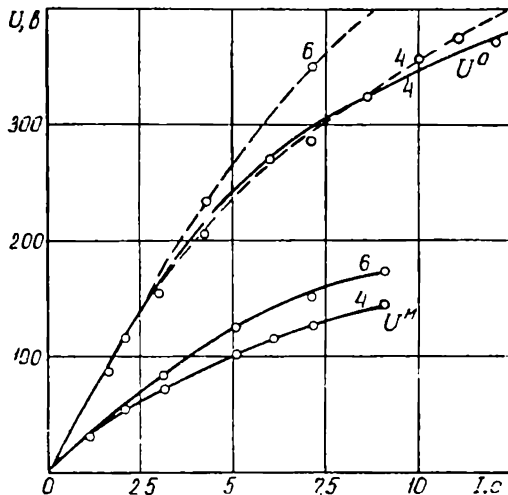


Рис. 1. Х. х. х., полученные экспериментально и пересчетом с модели (пунктир), для вариантов 4 и 6 таблицы.

Если выполняются условия

$$q^O \neq q^M;$$

$$k_d = \frac{\tau^M}{\tau^O} = \frac{q^M b_2^M}{q^O b_2^O}, \quad (4)$$

то при компенсации пульсирующих полей масштаб по э. д. с. записывается

$$k_E = k_f k_d k_l k_2, \quad (5)$$

где, согласно [3],

$$k_2 = \frac{\sqrt{1 + \sum (k_{Bv}^M k_v^M)^2}}{\sqrt{1 + \sum (k_{Bv}^O k_v^O)^2}}.$$

Коэффициент k_2 может быть найден по известной (рассчитанной или измеренной) кривой поля в воздушном зазоре модели.

При различных числах витков модели и оригинала имеем:

$$k_v = k_1 k_2 k_f k_d k_l k_w;$$

$$k_f = \frac{k_d}{k_w}; \quad (6)$$

$$k_w = \frac{(\omega^M k_{\omega 1}^M)}{(\omega^O k_{\omega 1}^O)}.$$

При расчетном определении характеристик холостого хода, согласно [4], частичные потоки в модели и оригинале находятся при помощи одних и тех же уравнений, записанных в безразмерной форме

$$\sum_{m=n-1}^{n+1} \dot{R}_{nm} \dot{\Phi}_{nm} = \dot{F}_{nn} \quad (7)$$

при $n=1, 2, 3, \dots, k$.

Базисные величины связаны масштабами

$$R_{nmБ}^M = k_R R_{nmБ}^O;$$

$$\Phi_{nmБ}^M = k_\Phi \Phi_{nmБ}^O; \quad (8)$$

$$F_{nnБ}^M = k_F F_{nnБ}^O,$$

где

$$k_R = \frac{1}{k_l};$$

$$k_\Phi = k_l k_d;$$

$$k_F = k_d.$$

Рассмотрим случаи приближенного моделирования, когда нарушено геометрическое подобие модели и оригинала:

$$\begin{aligned}
 k_l &\neq k_d; \\
 k_\delta &= \frac{\delta^M}{\delta^O} \neq k_d; \\
 k_{bz} &= \frac{b_z^M n_z^M}{b_z^O n_z^O} \neq k_d; \\
 k_{hz} &= \frac{h_z^M}{h_z^O} \neq k_d; \\
 k_{ha} &= \frac{h_a^M}{h_a^O} \neq k_d.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Сопротивления в расчетных схемах замещения модели и оригинала связаны различными масштабами

$$\begin{aligned}
 R_\delta^O &= R_\delta^M k_l \Delta k_\delta; \\
 R_{ш}^O &= R_{ш}^M k_l; \\
 R_z^O &= R_z^M k_l \Delta k_z; \\
 R_a^O &= R_a^M k_l \Delta k_a,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta k_\delta &= \frac{k_\delta}{k_d}; \\
 \Delta k_z &= \frac{k_{bz} k_d}{k_d k_{hz}}; \\
 \Delta k_a &= \frac{k_{ha}}{k_d}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

При равенстве максимальных индукций в зазорах ($B_{\delta m}^O = B_{\delta m}^M$) из-за неравенства масштабов по сопротивлениям расчет с использованием упомянутых схем замещения дает различное распределение частичных потоков в элементах магнитопроводов модели и оригинала, т. е. не будет выполняться условие:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Phi}_n(\dot{t}) &= \text{idem}; \\
 \dot{\Psi}_n(\dot{t}) &= \text{idem}.
 \end{aligned}$$

Аналогичное различие в кривых поля будет и при экспериментальном получении указанных зависимостей. Этот факт вызывает нарушение соотношений (6), т. е.

$$k_v = k_1 k_2 k_f k_d k_l k_w \Delta k_E; \quad (12)$$

$$k_f = \frac{k_d}{k_w} \Delta k_f,$$

где

$$\Delta k_E = f_1 (\Delta k_\delta, \Delta k_z, \Delta k_a, B_{\delta m}^M); \quad (12a)$$

$$\Delta k_f = f_2 (\Delta k_\delta, \Delta k_z, \Delta k_a, B_{\delta m}^M).$$

Для упрощения можно корректировать лишь один коэффициент, например, определять k_f согласно (6), а k_v согласно (12):

$$\Delta k_v = f_3 (\Delta k_\delta, \Delta k_z, \Delta k_a, B_{\delta m}^M). \quad (13)$$

Таблица вариантов расчета и эксперимента

Номер модели	δ	b	h_z	h_a	b_n
1	0,5	5	5	20	10
2	0,5	5	15	15	10
3	1,0	5	15	20	10
4	1,0	5	15	15	10
5	1,0	10	10	15	10
6	2,0	10	30	30	20
7	1,4	5	15	20	10
8	1,4	5	15	15	10

Значения (13) могут быть получены один раз для определенного диапазона изменения геометрических размеров путем проведения направленного эксперимента на физических моделях или расчетом.

Методика приближенного моделирования заключается в следующем:

1. Подбор модели.
2. Получение характеристик модели (в частности использование уже имеющихся).
3. Пересчет результатов на оригинал по выражениям (6) или (5).
4. Корректировка характеристик с учетом (13).

В работе были рассмотрены варианты, показанные в таблице. Характеристики, приведенные на рис. 2, получены экспериментально для случаев 3, 4, 5, 7 и 8 таблицы. На рис. 3 показаны зависимости изменения напряжения (для основного варианта) от изменения относительных геометрических размеров зубцов, яра и зазора ($\Delta h_z, \Delta b_z, \Delta h_a, \Delta \delta$). Кривые получены при токах 2,5; 5; 7,5а. Характеристика 2 оригинала на рис. 1 пересчитана по характеристике 2 модели, для которой нарушено требование геометрического подобия яра. Корректировка полученной характеристики согласно (13) с учетом рис. 3 дает зависимость 1, соответствующую случаю полного физического подобия.

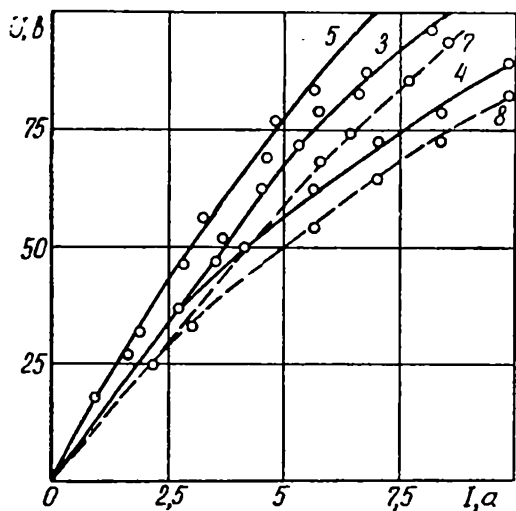


Рис. 2. Экспериментальные х. х. х. для вариантов 3, 4, 5, 7 и 8.

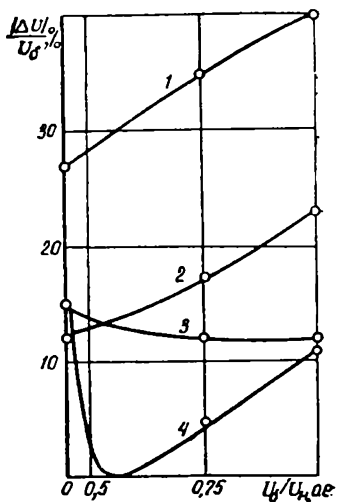


Рис. 3. Зависимость изменения напряжения х. х. х. от изменения относительных геометрических размеров:

$$\begin{aligned}
 1 - \dot{\Delta}h_z = -0,33; \dot{\Delta}b_z = +1; \\
 \dot{\Delta}\delta = -0,25; 2 - \dot{\Delta}h_a = +0,33; \\
 3 - \dot{\Delta}\delta = 0,4; 4 - \dot{\Delta}\delta = 0,4; \\
 \dot{\Delta}h_a = 0,33.
 \end{aligned}$$

Для вариантов 1, 2 при токе 8,5 а был произведен расчет потоков в зубцах и ярмах, а также напряжений х. х. согласно [4]. Разница напряжений составляет около 20%, максимальные значения потоков отличаются на 17—20% (рис. 4). Из сравнения кривых следует, что потокораспределение в ярме и зазоре может быть найдено из соответствующих зависимостей приближенно подобной модели после некоторой корректировки:

$$\Phi_n^o = \frac{\Phi_n^m}{k_1 k_d} \Delta \Phi_n,$$

где

$$\Delta \Phi_n = f_4 (\Delta k_\delta, \Delta k_z, \Delta k_a, B_{\delta m}^m). \quad (14)$$

Следует отметить, что ввиду отсутствия разработанных и выпускаемых серий линейных двигателей диапазон отклонений их относительных геометрических размеров не стабилизировался, и поэтому задача отыскания зависимостей вида (13) и (14) является

в известной мере неопределенной. В этой связи требуется дальнейший детальный анализ указанных соотношений.

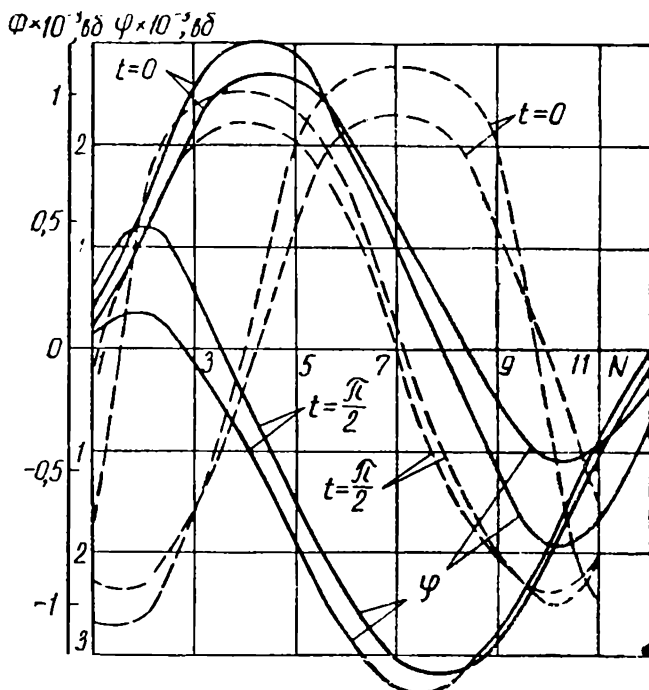


Рис. 4. Сравнение потоков в зубцах (Φ_n) и в ярме (ψ) для вариантов 1 и 2 таблицы при $t=0$ и $t=\frac{\pi}{2}$.

Проведенная проверка методики в целом позволяет рекомендовать ее для практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Иванов-Смоленский. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М., «Энергия», 1969.
2. Ф. Н. Сарапулов, Ю. В. Барышников. Определение параметров асинхронного двигателя с двухтоковым питанием методом физического моделирования. Сб. трудов ППИ, Пермь, 1970.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Ч. II. М., «Энергия», 1965.
4. Ф. Н. Сарапулов, Н. М. Пирумян, М. Г. Резин. Расчет магнитного поля в воздушном зазоре устройств с разомкнутым магнитопроводом в режиме холостого хода. Сборник материалов V Таллинского совещания по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников, Талли, 1971, вып. 6.