

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО РЕЖИМА ПРИ ПОМОЩИ СТАТИЧЕСКОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Известно, что для расчета эксплуатационных характеристик насыщенной явнополюсной синхронной машины в установившемся режиме можно воспользоваться уравнениями Парка—Горева, если знать зависимости вида $E_{\delta d}, E_{\delta q} = f(I_d, I_q, I_f)$ в широком диапазоне изменения токов.

Одним из методов определения этих величин может быть метод физического моделирования.

Наиболее удобными и простыми являются статические модели, выполненные на базе одного или двух полюсных делений [1, 2]. На статоре модели размещаются две обмотки — по оси d и по оси q , на роторе — обмотка возбуждения. Для удобства проведения эксперимента модель может иметь малые геометрические размеры.

Недостатки подобных моделей вытекают из специфики их работы, которая заключается в следующем:

- 1) вращающееся поле заменяется неподвижным;
- 2) экраны в межполюсном пространстве несколько искажают поперечное поле;
- 3) насыщение замыкающих магнитопроводов и появление дополнительных стыков приводит к увеличению продольной м. д. с. по сравнению с найденной по масштабам подобия.

Аналитическая оценка первых двух приближений показывает, что в режимах, близких к номинальному, погрешности в конечных результатах не превышают 10% [3]. Погрешности, вызванные третьей причиной, могут быть устранены при пересчете результатов с модели на оригинал.

Последовательность проведения опытов на модели следующая:

1. Обмотки питаются системой постоянных токов.
2. Производится отключение токов (всех или части).
3. С определенным шагом изменяется один из токов (при постоянстве остальных) и опыт повторяется.
4. Первые три операции проводятся при других комбинациях токов I_d^M, I_q^M, I_f^M .

При этом измеряются токи в обмотках; омические сопротивления контуров затухания; магнитные потоки Φ_d и Φ_q через полюсное деление; потокоцепления измерительных обмоток в зазоре, распределенных подобно силовым обмоткам статора; потокоцепления силовых обмоток Ψ_d и Ψ_q .

Потокоцепления и токи силовых обмоток пересчитываются на оригинал по известным формулам [4]. Если обмотки статоров модели и оригинала имеют одинаковую схему, то их обмоточные коэффициенты равны. Тогда

$$k_{Id} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{\rho^M k_I \omega^0}{\rho^0 \omega_d^M};$$

$$k_{Iq} = 3\sqrt{2} \frac{\rho^M k_I \omega^0}{\rho^0 \omega_q^M}; \quad (1)$$

$$k_{Ed} = k_I k_z \frac{\omega_d^M}{\omega^0} \cdot \frac{\omega^M}{\omega^0} \quad (\text{на одну фазу оригинала});$$

$$k_{Eq} = \frac{k_I k_z}{2} \frac{\omega_q^M}{\omega^0} \cdot \frac{\omega^M}{\omega^0}.$$

Множителем $\sqrt{2}$ учитывается переход от постоянных токов модели к действующим значениям переменных токов оригинала. При $k_I = k_z = 1$ и $\rho^0 = 2$ система (1) примет вид:

$$k_{Id} = \frac{3\sqrt{2}}{8} \frac{\omega^0}{\omega_d^M}; \quad k_{Iq} = \frac{3\sqrt{2}}{4} \frac{\omega^0}{\omega_q^M};$$

$$k_{Ed} = \frac{\omega_d^M}{\omega^0}; \quad k_{Eq} = \frac{1}{2} \frac{\omega_q^M}{\omega^0}. \quad (2)$$

В ряде случаев линейный масштаб по зазору может отличаться от линейного масштаба по активной стали (появление дополнительных стыков в модели и т. д.). Тогда при $k_I = k_z = 1$ справедливо соотношение:

$$F_{\Sigma d}^M = F_{\Sigma d}^0 + \Delta F_{\delta d}^M = F_f^M - F_{sd}^M = k (F_f^0 - F_{sd}^0), \quad (3)$$

где $F_{\Sigma d}$ — результирующая м. д. с. по продольной оси;

F_f — м. д. с. обмотки возбуждения;

F_{sd} — м. д. с. продольной обмотки статора модели и м. д. с. реакции якоря для оригинала;

k — коэффициент увеличения м. д. с. модели.

Из (3) получаем:

$$F_{\Sigma d}^M = k (F_f^0 - F_{sd}^0) = F_{\Sigma d}^0 \left(1 + \frac{\Delta F_{\delta d}^M}{F_{\Sigma d}^0} \right),$$

г. е.

$$k = 1 + \frac{\Delta F_{\delta}^M}{F_{\Sigma d}^0} = 1 + \frac{\Delta F_{\delta}^M}{F_{\delta}^0 k_{\text{нас}}^0} = 1 + \frac{\Delta \delta_{\text{э}}^M}{\delta_{\text{э}}^0 k_{\text{нас}}^0}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{э}}$ — величина эквивалентного воздушного зазора.

Отношение $\frac{\Delta \delta_{\text{э}}^M}{\delta_{\text{э}}^0}$ легко определяется по известным зазорам модели и оригинала или из сравнения прямолинейных частей характеристик холостого хода (х. х.); $k_{\text{нас}}^0$ — из характеристики х. х. оригинала для определенного значения $E_{\delta d}^0 \equiv \Psi_{\delta d}^0$.

Характеристика х. х. оригинала может быть взята из расчетного формуляра или получена при пересчете с модели:

$$\begin{aligned} F_f^0 &= \frac{F_f^M}{k_l} - \frac{\Delta F_{\delta}^M}{k_l}; \\ E_{\delta d_1}^0 &= \frac{314 k_l k_z}{\sqrt{2}} k_{w1}^0 \omega_{\Phi}^0 \Phi_{\tau}^M \frac{1}{k_{\Phi}}; \\ E_{\delta d}^0 &\approx \frac{314 k_l k_z}{\sqrt{2}} k_{w\Sigma}^0 \omega_{\Phi}^0 \Phi_{\tau}^0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_{\Phi} = 1 \pm \sum \frac{\Phi_v^M}{\Phi_1^M} = \frac{\Phi_{\tau}^M}{\Phi_1^M}$ — коэффициент формы поля в зазоре;
 Φ_{τ}^M — поток через полюсное деление модели;
 Φ_1 — поток основной гармоники.

При $k_l = k_z = 1$ из (5) имеем:

$$\begin{aligned} F_f^0 &= F_f^M - \Delta F_{\delta}^M; \\ E_{\delta d_1}^0 &= \frac{314}{\sqrt{2}} \frac{k_{w1} \omega_{\Phi}^0}{k_{\Phi}} \Phi_{\tau}^M. \end{aligned} \quad (5a)$$

Если известно потокосцепление силовой обмотки $\Psi_{\delta d}^M$, то

$$\begin{aligned} E_{\delta d_1}^0 &= \frac{314}{\sqrt{2}} \frac{\omega_{\Phi}^0 k_{w1}}{k_{\Phi} \omega_d^M k_{w\Sigma d}^M} \Psi_{\delta d}^M; \\ E_{\delta d}^0 &\approx \frac{314}{\sqrt{2}} \frac{\omega_{\Phi}^0}{\omega_{\delta}^M} \Psi_{\delta d}^M, \end{aligned} \quad (6)$$

где коэффициент $k_{w\Sigma d}^M = \frac{\Psi_{\delta d}^M}{\omega_d^M \Phi_{\tau}^M} \approx k_{w\Sigma d}^0$ может изменяться в очень широких пределах (особенно в режимах, близких к короткому замыканию). На рис. 1 выделены области существенного и несущего

ществленного изменения $k_{\omega \Sigma d}^M$. Погрешности моделирования синхронного режима возрастают в области существенного изменения коэффициента.

Можно непосредственно измерять потокоцепления силовой обмотки либо потокоцепления измерительной обмотки, распределенной подобно силовой.

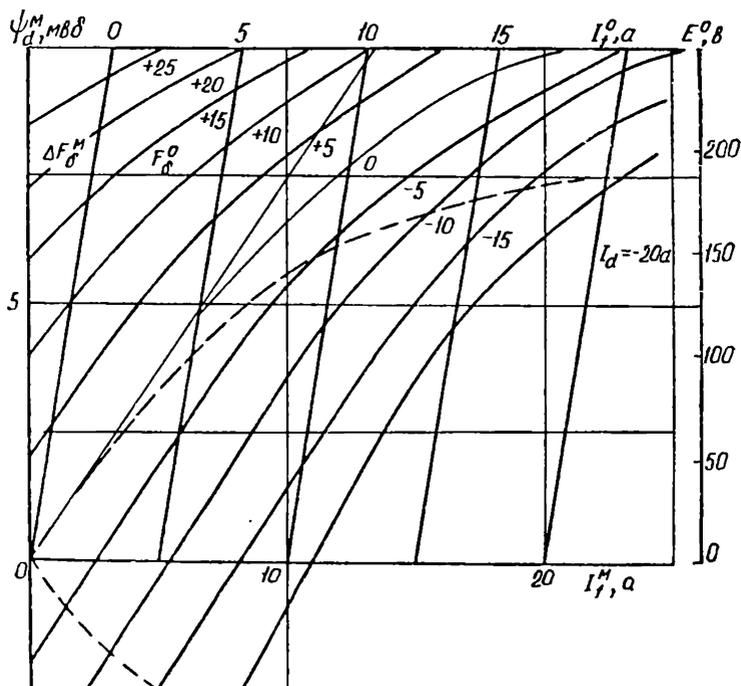


Рис. 1. Нагрузочные характеристики модели на продольной оси. Область, ограниченная пунктирной линией, — область существенного изменения $k_{\omega \Sigma d} = 0,5 \div \infty$, выше — $0,85 - 0,9$; ниже — $0,94 - 1$.

В первом случае потокоцепления и э. д. с. оригинала рассчитывают по показаниям флюксметра:

$$E_0 = \frac{\omega r_k}{\sqrt{2}} \frac{\omega^0}{\omega^M} \frac{I_{ш}}{U_{ш}} \Phi,$$

где E_0 — полная э. д. с. (с учетом э. д. с. рассеяния), в;
 r_k — омическое сопротивление контура затухания, ом;
 $I_{ш}, U_{ш}$ — ток через шунт, а, и напряжение на нем, в;
 Φ — показания флюксметра, мвб.

Последовательность расчета угловой характеристики

| Величины | 1-е приближение (оригинал) | Модель | 2-е приближение (оригинал) | Модель | 3-е приближение (оригинал) | Примечание |
|------------------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----------------------------|---|
| I_f | 22 | →25 | 22 | →25 | 22 | $P = mU / \cos \varphi =$ $= 3 \cdot 230 \cdot 14,4 =$ $= 9,9 \text{ кВт}$ $x_s = 0,56 \text{ Ом}$ $r_s = 0,50 \text{ м}$ |
| I_d | 22,8 | →13,2 | k_{Id} 22 | →12,8 | k_{Id} →12,8 | |
| I_q | 0 | →26,4 | k_{Iq} →13,2 | →23 | k_{Iq} →11,5 | |
| $E_{\delta d}^0$ | 234 | →234 | →237 | →237 | 236 | |
| $E_{\delta q}^0$ | 70 | →70 | 60 | →60 | 61 | |

Во втором случае необходима калибровка измерительной обмотки (особенно при укладке этой обмотки лишь на части длины модели).

Калибровку проводят по какой-либо известной точке характеристики х. х. модели и оригинала. Например, для оригинала СМ-81/4 берется точка $E_{\delta d}^0 = 185 \text{ в}$ и соответствующий ей ток $I_f^0 = 9,5 \text{ а}$. По соотношению (5) $I_f^m = 12 \text{ а}$. При этом токе потокосцепления распределенной измерительной обмотки $\Psi_{\text{визм}}^m = 10,8 \text{ мвб}$, а поток через полюсное деление $\Phi_t^m = 7,5 \text{ мвб}$.

По этим данным получена шкала э. д. с. оригинала, которую можно получить по (5) при $k_{\omega \Sigma d}^m = 0,9$ (рис. 1). Если учесть увеличение зазора в модели, то шкала токов возбуждения оригинала I_f^0 при х. х. сдвинется вправо, и координатная сетка $E_{\delta d}^0 = f(I_f)$ будет косоугольной. Эта сетка с известным приближением может быть использована и для режимов перевозбуждения ($E_{\delta d} = 200 - 250 \text{ в}$), поскольку в этой области

$$k \approx 1 + \frac{\Delta I_f^m}{I_f^0} = 1,15 \div 1,2 = \text{const.}$$

В других областях изменение k значительно, что не позволяет ввести постоянную шкалу I_f^0 . Аналогично пересчитываются параметры по поперечной оси. При этом $k_{\omega \Sigma q}^m$ изменяются в менее широких пределах. Если $\omega_q^m = \omega_d^m$, то $k_{Id} = \frac{1}{2} k_{Iq}$, $k_{Ed} = 2k_{Eq}$. Для модели СМ-81/4 при $k = 1,2$ имеем $k_{Id} = 0,99$; $k_{Iq} = 1,98$.

На рис. 1 показаны нагрузочные характеристики модели по продольной оси для различных комбинаций токов.

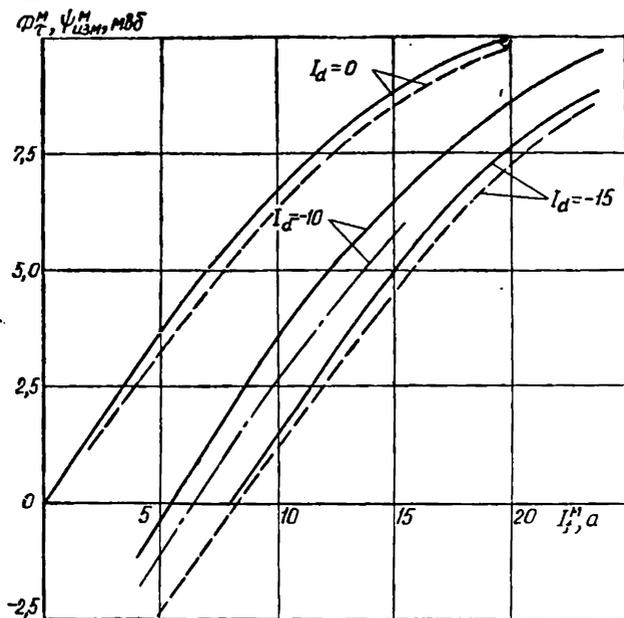


Рис. 2. Влияние поперечного тока I_q на нагрузочные характеристики по продольной оси:

— $I_q = 0$; --- $I_q^M = 20 a (\sim 0.5 I_H)$; - · - по измерениям с распределенной измерительной обмотки.

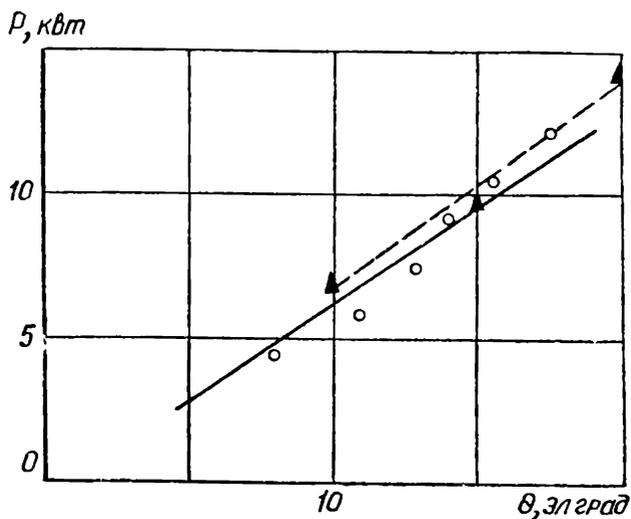


Рис. 3. Сравнение угловых характеристик, полученных на оригинале (○) и с помощью модели (▲) при $I_j^o = 22 a$.

Из рис. 2 видно, что влияние поперечного тока на поток в зазоре по продольной оси для данной машины пренебрежимо мало. Это утверждение справедливо для быстроходных машин [5].

Приведенные на том же рисунке зависимости потокосцеплений измерительных (распределенной и сосредоточенной) обмоток показывают, что характер изменения Φ_r^m и $\Psi_{\delta d}^m$ от I_f^m различен, особенно при $\Phi_r^m \rightarrow 0$.

На основе нагрузочных характеристик можно построить эксплуатационные характеристики, в частности угловые. Построение угловых характеристик оригинала осуществляется методом последовательных приближений при $I_f = \text{const}$.

Порядок расчета:

1. Задаются углом нагрузки Θ (например 15°).
2. Проводятся направления $E_{\delta d}^0$ и I_d^0 .
3. Принимается $I_d^0 = I_n^0$ и строится треугольник $(r + jx_\sigma) I_d^0$ при $I_q^0 = 0$. Получают $E_{\delta d}^0$ и $E_{\delta q}^0$.
4. По характеристикам $E_{\delta d}^0 = f(I_d^m)$ при определенном I_f берется второе приближение тока I_d^m и I_d^0 , по значениям I_d^m , I_q^m и $E_{\delta q}^m$ находятся токи I_q^m и I_q^0 .
5. Строится новый вектор тока $I = I_d + jI_q$ и т. д.

Порядок расчета для $\Theta = 15^\circ$ приведен в таблице.

На рис. 3 показано сравнение угловых характеристик, полученных на оригинале СМ-81/4 и при помощи модели. Следует отметить, что используемый при таком построении графический метод недостаточно точен. Более точные результаты дает применение аналитических выражений, путь расчета при этом не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Кузнецов. Физическая модель для исследования установившегося режима синхронной явнополюсной машины. Доклады научно-технической конференции, М., МЭИ, 1967.
2. Ф. Н. Сарапулов, Д. М. Карышев, И. Е. Родионов. Методика исследования синхронных явнополюсных машин на физических статических моделях. Тр. УПИ, сб. 181, Свердловск, 1970.
3. Ф. Н. Сарапулов. О точности физического моделирования синхронных машин. Тр. ППИ, сб. 78, Пермь, 1970.
4. Ф. Н. Сарапулов. Моделирование асинхронных и синхронных режимов синхронных явнополюсных машин на физических статических моделях. Автореферат канд. диссертации, Свердловск, УПИ им. С. М. Кирова, 1967.
5. Д. М. Карышев, И. Е. Родионов, Ф. Н. Сарапулов. Исследование потокораспределения в явнополюсных синхронных машинах с помощью физических статических моделей. Тр. ППИ, сб. 62, Пермь, 1969.