

4.10.2. Определение параметров по справочным данным

В справочной литературе по асинхронным двигателям всегда приводятся следующие параметры, соответствующие номинальному режиму работы:

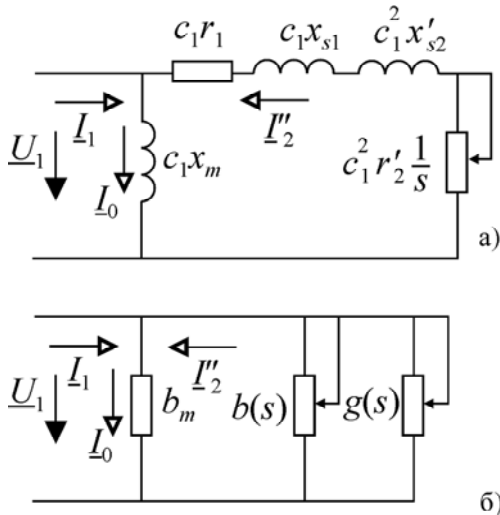


Рис. 4.33

а также:

- механическая мощность P_N [Вт];
- линейное или фазное напряжение питания U_{1N} [В];
- линейный или фазный ток I_{1N} [А];
- скорость вращения n_N [об/мин] или скольжение s_N ;
- номинальный момент нагрузки M_N [Нм];
- коэффициент мощности $\cos \varphi_{1N}$;
- коэффициент полезного действия η_N ;
- кратность максимального момента

$$\lambda = M_{\max} / M_N;$$

- кратность пускового момента $k_s = M_s / M_N$;
- кратность пускового тока $k_{sI} = I_s / I_{1N}$.

Для любого моделирования процессов в двигателе необходимо знание параметров схемы замещения. Поэтому всегда возникает задача вычисления этих параметров на основе справочных данных. Задача эта достаточно сложная и для её упрощения без внесения существенной погрешности обычно пренебрегают магнитными потерями. Тогда схема Г-образная замещения принимает вид, показанный на рис. 4.33, а.

Так как в справочных данных содержатся координаты трёх точек механической характеристики (номинальный момент и скорость вращения, момент опрокидывания и пусковой момент), а токи даны только для номинального и пускового режимов, то расчёт пяти параметров схемы замещения необходимо вести, основываясь на механических величинах. При этом для них может быть обеспечена сходимость к справочным данным, а для электрических величин будет возникать ошибка, связанная с несовершенством модели АД в виде схемы замещения.

Активное сопротивление статора r_1 можно определить по рассеиваемой на нём мощности $\Delta P_{\text{ICu}} = m_1 I_{1N}^2 r_1$, которая равна разности потребляемой активной мощности $P_1 = m_1 U_{1N} I_{1N} \cos \varphi_{1N}$ и электромагнитной мощности в номинальном режиме $P_{em} = M_N \omega_1 / z_p$ –

$$\Delta P_{\text{ICu}} = P_1 - P_{em}$$

$$\Downarrow$$

(4.88)

$$r_1 = \frac{U_{1N} I_{1N} \cos \varphi_{1N} - M_N \omega_1 / (m_1 z_p)}{I_{1N}^2}$$

где: m_1 – число фаз; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота питающей сети и z_p – число пар полюсов магнитного поля двигателя.

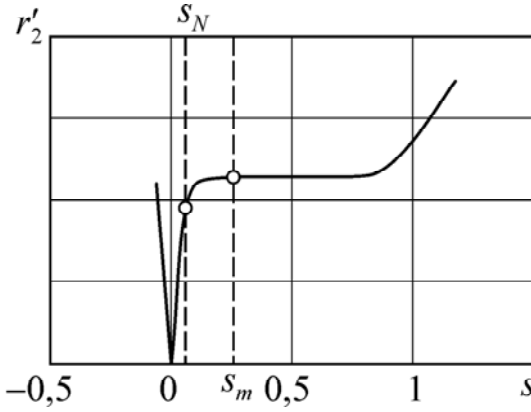


Рис. 4.34

Однако величина r_1 будет несколько завышенной, т.к. в электрическую мощность P_1 входит мощность потерь в магнитопроводе, неучтённая в схеме замещения. Завышенное значение сопротивления r_1 может в дальнейших расчётах приводить к некорректным (мнимым) значениям других параметров.

Поэтому лучше, вначале определить приведённое активное сопротивление ротора. Проще всего это сделать по двум координатам любой точки механической

характеристики и значению тока статора в этом режиме. Например, в номинальном режиме мощность скольжения равна

$$\Delta P_{2\text{Cu}} = M_N \Omega_1 s_N = M_N 2\pi f_1 s_N / z_p = m_1 (I_2')^2 r_2'.$$

Тогда, полагая $I_2' \approx I_1$, получим

$$r_2' = \frac{M_N 2\pi f_1 s_N}{z_p m_1 (I_{1N})^2}. \quad (4.89)$$

Если по этому выражению рассчитать значения r_2' для целого ряда точек механической характеристики, полученных экспериментально, то получится кривая, показанная на рис. 4.34. Здесь видно, что значение, рассчитанное для точки номинального режима, будет заниженным, а истинная величина сопротивления ротора соответствует мощности скольжения вблизи точки опрокидывания. Однако в справочных данных критическое скольжение не приводится, поэтому воспользоваться выражением (4.89) невозможно.

Проанализируем уравнения механической характеристики (4.61), обозначив $x_{s1} + c_1 x_{s2}' = x_{ks}$

$$M(s) = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2 r_2'}{\omega_1 s \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_{ks})^2 \right]}. \quad (4.90)$$

Найдём значение производной $\partial M / \partial s$ в режиме холостого хода.

$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{\omega_1} \left\{ \frac{2(r_2')^2 (r_1 + c_1 r_2' / s) c_1}{s^3 [(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_{ks})^2]^2} - \frac{r_2'}{s^2 [(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_{ks})^2]} \right\},$$

а затем предел при $s \rightarrow 0$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial M}{\partial s} = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{\omega_1 c_1^2 r_2'}.$$

Заменяя в этом выражении производную конечными разностями между точками холостого хода и номинального режима, получим

$$\frac{\partial M}{\partial s} = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{\omega_1 c_1^2 r_2'} \approx \frac{\Delta M}{\Delta s} = \frac{M_N}{s_N} \Rightarrow r_2' \approx \frac{m_1 z_p U_{1N}^2 s_N}{\omega_1 c_1^2 M_N}$$

Это выражение даёт хорошее приближение, но его можно несколько упростить, т.к. коэффициент приведения Т-образной схемы к Г-образной c_1 находится в пределах $1,02 < c_1 < 1,06$ и $c_1^2 \approx 1,0$. Тогда для приведённого сопротивления ротора получим:

$$r_2' \approx \frac{m_1 z_p U_{1N}^2 s_N}{\omega_1 M_N} \quad (4.91)$$

Выражение (4.91) позволяет найти такое значение r_2' , при котором наклон касательной к механической характеристике в точке холостого хода будет несколько больше наклона секущей, проходящей через точку номинального режима, т.к. величина r_2' несколько завышена за счёт условия $c_1^2 \approx 1,0$.

Второй точкой справочных данных является точка опрокидывания. Расчётная механическая характеристика должна пройти через неё, однако предварительно нужно определить неизвестное критическое скольжение.

Из формулы Клосса

$$\frac{M_N}{M_{\max}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2(1 + as_m)}{s_N / s_m + s_m / s_N + 2as_m} \quad (4.92)$$

критическое скольжение можно найти как

$$s_m = \frac{s_N}{A} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A} \right), \quad (4.93)$$

где $a = \frac{r_1}{c_1 r_2'}$ и $A = 1 - 2as_N(\lambda - 1)$. Значение a зависит от мощности АД и изменяется в широких пределах $1,5 < a < 1/s_m$.

Коэффициент приведения Т-образной схемы замещения к Г-образной* равен

$$\underline{C}_1 = 1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_m \approx c_1 = |1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_m| \approx 1 + x_{s1} / x_m. \quad (4.94)$$

Из выражения для критического момента

* В ветви намагничивания на рис. 4.33 исключено активное сопротивление ротора r_1 , т.к. оно несущественно влияет на величину комплексного сопротивления $\underline{Z}_1 + \underline{Z}_m = r_1 + jx_{1\sigma} + jx_m \approx j(x_{1\sigma} + x_m) = jc_1 x_m$

$$M_{\max} = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{2\omega_1 c_1 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_{ks}^2} \right)} = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{2\omega_1 c_1 \left(r_1 + c_1 r_2' / s_m \right)} \quad (4.95)$$

с учётом выражения для критического скольжения

$$s_m = \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_{ks}^2}} \quad (4.96)$$

можно найти r_1

$$r_1 = \frac{m_1 z_p U_{1N}^2}{2\omega_1 \lambda M_N} - \frac{c_1 r_2'}{s_m}, \quad (4.97)$$

а затем из выражения (4.96) можно определить x_{ks} :

$$x_{ks} = \sqrt{\left(\frac{c_1 r_2'}{s_m(a, c_1)} \right)^2 - r_1^2} = x_{s1} + c_1 x_{s2}'. \quad (4.98)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания x_{ks} далее можно разделить на сопротивления потоков рассеяния статора и ротора x_{s1} и x_{s2}' , полагая

$$x_{s1} = x_{s2}' = x_{ks} / 2. \quad (4.99)$$

Для определения индуктивного сопротивления ветви намагничивания x_m преобразуем последовательное соединение главной цепи схемы рис. 4.33, а в параллельное, выделив активную и реактивную составляющие комплексной проводимости (рис. 4.33, б)

$$g(s) = \frac{r_1 + c_1 r_2' / s}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_{ks}^2 \right]}; \quad b(s) = \frac{x_{ks}}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_{ks}^2 \right]}. \quad (4.100)$$

Величина x_m слабо влияет на электрохимические процессы и входит в уравнение механической характеристики АД только посредством коэффициента c_1 . В то же время, проводимость ветви намагничивания $1/x_m$ в режимах близких к номинальному соизмерима с реактивной проводимостью главной цепи $b(s)$ и существенно влияет на энергетические параметры. Поэтому её целесообразно определять из баланса реактивной мощности $Q_1 = Q_{ks} + Q_m = U_{1N} I_{1N} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1N}}$, где Q_{ks} – реактивная мощность, расходуемая на формирование полей рассеяния статора и ротора. После преобразования главной цепи схемы замещения мощности потоков рассеяния и основного потока могут быть представлены через одинаковое для всех ветвей фазное напряжение U_{1N} как $Q_{ks} = U_{1N}^2 b(s_N)$, и $Q_m = U_{1N}^2 b_m = U_{1N}^2 / (c_1 x_m)$. Подставляя эти выражения в уравнение баланса мощностей, получим –

$$x_m = \frac{1}{c_1 \left[I_{1N} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1N}} / U_{1N} - b(s_N) \right]} \approx$$

$$\approx \frac{1}{I_{1N} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1N}} / U_{1N} - b(s_N)}. \quad (4.101)$$

Таким образом, из исходных данных мы получили все искомые параметры в виде функций коэффициентов a и c_1 , которые, в свою очередь, определяются величинами сопротивлений r_1 и r'_2 .

На рабочем участке механическая характеристика вполне удовлетворительно определяется точной формулой Клосса, т.е. тремя константами M_{\max} , s_m и a , одна из которых M_{\max} является справочным значением. Поэтому параметры схемы замещения должны обеспечивать сходимость расчётного M_{\max} и справочного значений \tilde{M}_{\max} .

Полученные выше выражения не позволяют аналитически решить уравнение $M_{\max}(r_1, r'_2) - \tilde{M}_{\max} = 0$, однако возможны два способа численного решения. Первый является методом последовательных приближений и основан на том, что выражения (4.88) и (4.91) позволяют вычислить завышенные значения r_1 и r'_2 . Поэтому, последовательно уменьшая их с некоторым шагом и определяя остальные параметры, а также максимальный момент, можно создать цикл расчёта, условием прерывания которого будет приближение расчётного опрокидывающего момента к справочному значению с заданной точностью TOL.

На рис. 4.35, а приведена блок-схема алгоритма такого расчёта. Сначала с помощью выражений (4.88) и (4.91) по справочным данным рассчитываются исходные завышенные значения активных сопротивлений статора и ротора r_{10} и r'_{20} . Затем в блоке *1a* вычисляются остальные параметры схемы замещения, а также критическое скольжение s_m и относительное значение опрокидывающего момента

$$\mu_m = \frac{m_1 z_p \left| \left[\underline{I}'_2(s_m) \right]^2 \right| k_2 r'_{20}}{\omega_1 s_m M_N}. \quad (4.102)$$

Причём приведённый ток ротора при критическом скольжении $\underline{I}'_2(s_m)$ рассчитывается по Т-образной схеме замещения на рис. 4.9, а. Полученное значение μ_m сравнивается с предыдущим расчётным значением μ'_m и если $\delta_n = |\mu_m - \mu'_m| / \mu'_m > \text{TOL}$, то коэффициент k_1 , на который умножается значение r_{10} , уменьшается на величину $\Delta_k \approx 10^{-4}$ *

При достаточной сходимости значений μ_m в соседних циклах ($\delta_n < \text{TOL}$) проверяется соответствие расчётной кратности максимального момента μ_m

* Столь малый декремент необходим для обеспечения сходимости решения у машин мощностью выше 20 кВт

справочному значению λ . Если отклонение $\delta_\mu = (\mu_m - \lambda)/\lambda > \text{TOL}$, то величину сопротивления ротора r'_{20} нужно уменьшить на величину Δ_k и повторить цикл вычислений. После выполнения некоторого количества циклов с уменьшением r'_{20} отклонение δ_μ снижается до заданного значения TOL и задача определения постоянных параметров схемы замещения завершается.

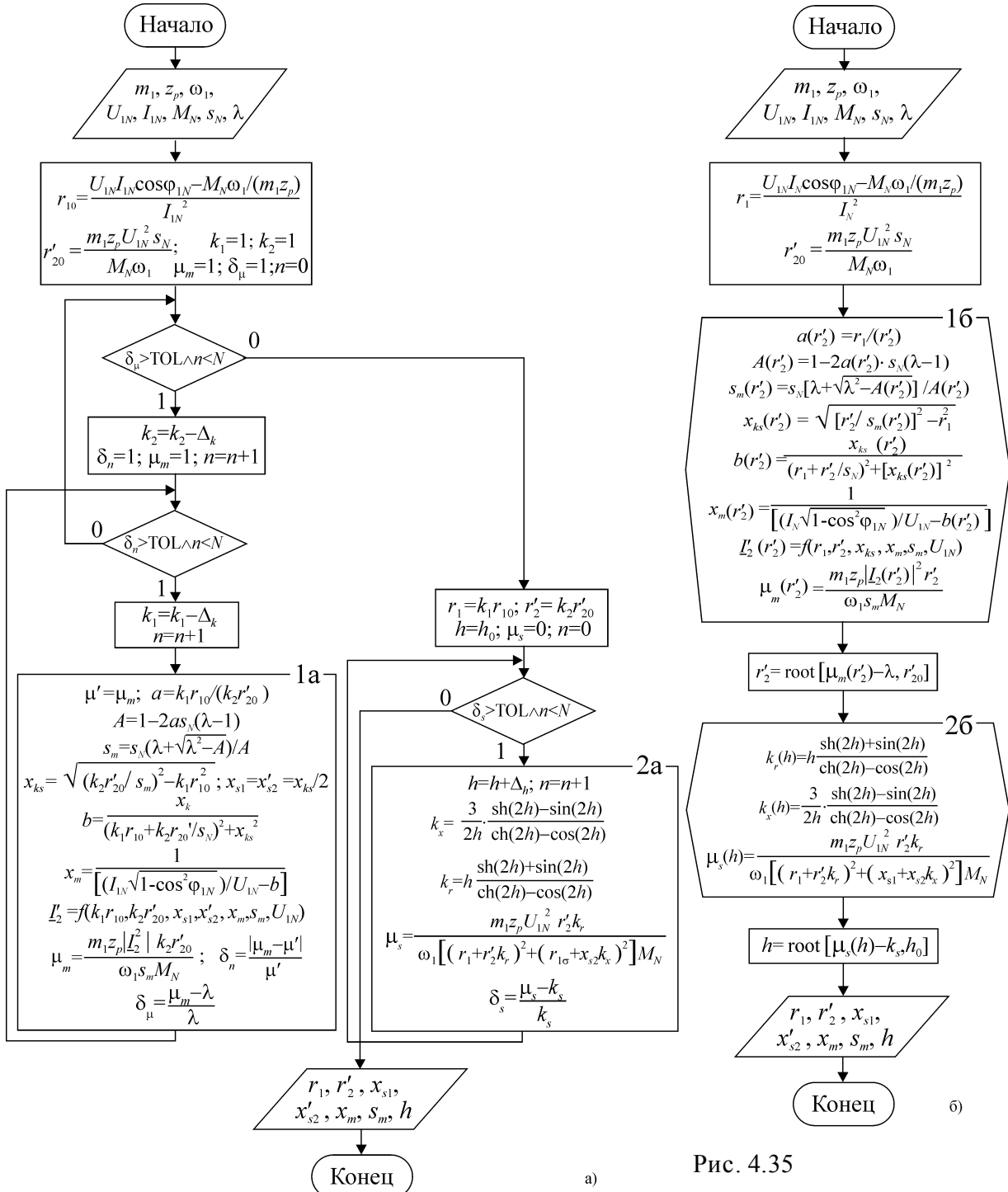


Рис. 4.35

Полученные величины обеспечивают с заданной точностью соответствие опрокидывающего момента справочному значению. Однако при скольжениях больше критического погрешность схемы замещения с постоянными

параметрами увеличивается и при пуске может стать многократной. Для учёта влияния вытеснения тока в обмотке ротора необходимо определить относительную глубину паза

$$\xi = h / h_{eq} \approx h |s|^\beta, \quad (4.103)$$

где s – скольжение; β – показатель степени, обычно принимаемый равным $1/2$, однако для получения формы механической характеристики, соответствующей справочным данным, его значение можно увеличивать.

Очевидно, что ни реальную глубину паза h , ни эквивалентную глубину h_{eq} при каком-либо скольжении определить невозможно, но приближённое равенство (4.103) позволяет найти h численным решением уравнения

$$\mu_s(h) - k_s = \frac{z_p m_1 U_1^2 r_2 \cdot k_r(1)}{\omega_1 \left\{ [r_1 + r_2' k_r(1)]^2 + [x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' k_x(1)]^2 \right\} M_n} - k_s = 0, \quad (4.104)$$

т.к. при $s=1$ относительная глубина паза $\xi \approx h|_{s=1}$ и тогда коэффициенты вытеснения (4.73) и (4.74) равны

$$k_r(1) = h \frac{\operatorname{sh} 2h + \sin 2h}{\operatorname{ch} 2h - \cos 2h}; \quad k_x(1) = \frac{3}{2h} \frac{\operatorname{sh} 2h - \sin 2h}{\operatorname{ch} 2h - \cos 2h}. \quad (4.105)$$

Подставляя эти выражения в уравнение (4.104) и решая его относительно h , мы получим требуемое значение.

В алгоритме на рис. 4.35, *а* уравнение (4.104) решается в блоке 2*а* методом последовательных приближений при инкрементировании некоторого начального значения h_0^* . Условием прерывания цикла является сходимость относительного пускового момента $\mu_s = M_s / M_N$ к справочному значению кратности пускового момента k_s .

Для получения устойчивого решения необходимо начальное значение глубины паза h_0 предварительно более точно определить путём построения функция $\mu_s(h)$, т.к. она имеет экстремум, а при малых h производная $\partial \mu_s / \partial h$ равна нулю. На рис. 4.36, *а* показана поверхность относительного пускового момента $\mu_s = f(h, P_2)$, рассчитанного для двигателей серии 5А различной мощности P_2 по выражению (4.104), и поверхность справочной кратности пускового момента (непрозрачная поверхность), а на рис. 4.36, *б* – функции $\mu_s(h)$ для двигателей минимальной и максимальной мощности. Искомые значения h соответствуют точкам кривых $\mu_s(h)$, где $\partial \mu_s / \partial h > 0$, т.е. точкам *а* и *с*. Поэтому для машины малой мощности начальное значение следует выбрать равным $h_0 \approx 1$, а для мощной машины – $h_0 \approx 3$.

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя можно найти также с помощью библиотечных функций решения нелинейных алгебраических уравнений, имеющихся в математических пакетах. В пакете *Mathcad* это

* Следует заметить, что в алгоритме программы на рис. 4.35, *а* для исключения бесконечных циклов ведётся подсчёт их числа n и осуществляется прерывание, если n превышает максимально допустимое значение N .

функция $\text{root}[f(x), x_0]$, а в пакете *Matlab* – $\text{fzero}[f(x), x_0]$, причём, при решении в среде *Matlab* функцию $f(x)$ необходимо описать *m*-файлом. Обе функции возвращают вещественное число, соответствующее условию $f(x) = 0$.

Алгоритм программы вычисления параметров с помощью библиотечных функций показан на рис. 4.35, б. Блоки 2а и 2б отличаются от блоков 1а и 1б алгоритма рис. 4.35, а тем, что в них выполняется определение функции $f(r'_2)$ и $f(h)$, которые затем используются блоками решения уравнений $\mu_m(r'_2) - \lambda = 0$ и $\mu_s(h) - k_s = 0$.

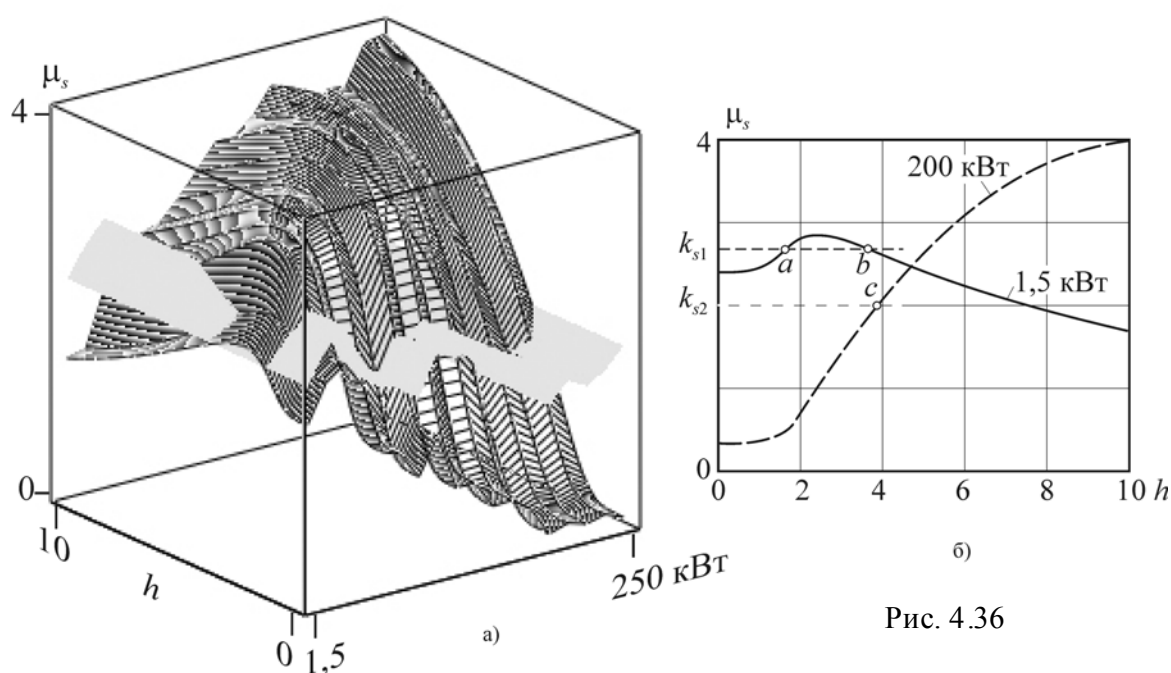


Рис. 4.36

Оба алгоритма позволяют определить параметры схемы замещения, обеспечивающие при расчёте механических характеристик сходимость опрокидывающего и пускового моментов двигателя к справочным данным с заданной погрешностью. Отклонение остальных величин от справочных значений не определено. Произведём оценку этих погрешностей для двигателей серии 5А в диапазоне мощностей от 1,5 до 250 кВт. На рис. 4.37 показаны кривые относительных погрешностей вычисления номинального тока статора I_{1N} , электромагнитного момента M_N , коэффициентов мощности $\cos\varphi$ и полезного действия η , а также пускового тока I_s . Из этого рисунка следует, что наибольшая погрешность возникает при вычислении пускового тока (рис. 4.37, б). Для двигателей мощностью выше 5 кВт она не превышает -10% , однако при уменьшении мощности быстро возрастает до -35% . Это объясняется неадекватностью Т-образной схемы замещения и модели эффекта вытеснения тока в стержнях обмотки ротора для машин малой мощности. Аналогичная тенденция наблюдается и в картине погрешностей вычисления других величин (рис. 4.37, а). Практически все они быстро возрастают в диапазоне мощностей $P_N < 10$ кВт, но при этом их величина значительно меньше, чем при

вычислении пускового тока, что объясняется отсутствием влияния эффекта вытеснения при номинальном скольжении. В целом отклонение расчётных

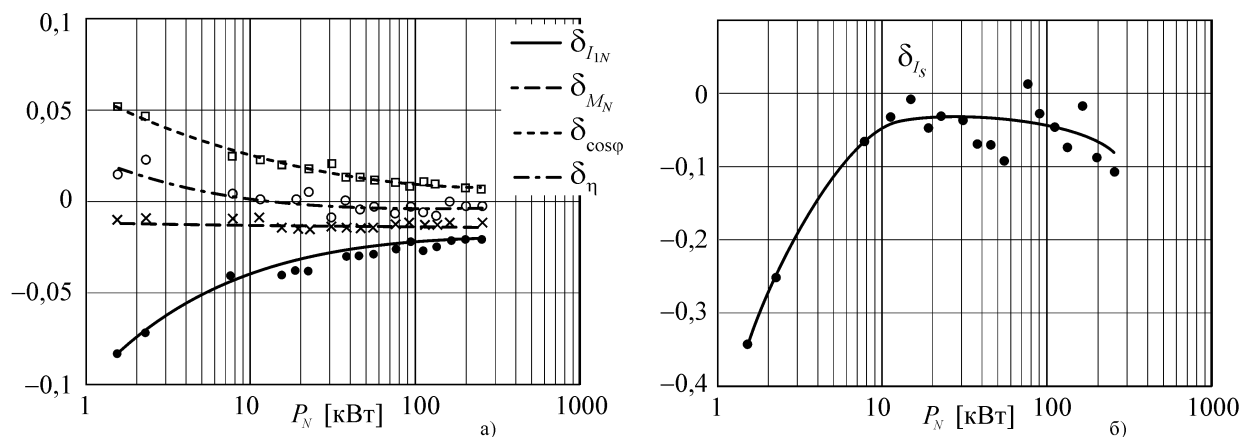


Рис. 4.37

значений от справочных данных значительно меньше статистического разброса самих данных.