

Г. А. АЙРАПЕТЯН, Г. А. НАЛЧАДЖЯН

РАСЧЕТ НА ЭЦВМ РЕЖИМА РАБОТЫ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Режимы и законы регулирования синхронных двигателей, расположенных в различных узлах энергосистемы и работающих параллельно с остальной нагрузкой, должны определяться не только условиями работы данного узла, но и требованиями режима энергосистемы в целом. Параметрами, определяющими режим энергосистемы, являются частота f , напряжение узла U и их производные.

Исследования, с целью выявления оптимальных режимов работы синхронных двигателей, а также их размещения, должны выполняться в комплексе с исследованием режима энергосистемы, что возможно только на современных ЭЦВМ. Отсюда возникает необходимость составления алгоритма и программы расчета на ЭЦВМ режима синхронного двигателя при различных заданных значениях частоты и напряжения с возможностью рассмотрения различных законов регулирования. При этом необходимо рассмотрение как неявнополюсных, так и явнополюсных машин, а также вопросов их эквивалентирования.

Настоящая статья посвящена составлению алгоритма и программы расчета режима явнополюсного синхронного двигателя при значительных колебаниях напряжения узлов и частоты в энергосистеме.

Программа составлена применительно к ЭЦВМ „Урал-3“ и, кроме самостоятельного значения, является составной частью общей программы исследования режимов энергосистемы, связанных с возникновением больших дефицитов мощности.

При холостом ходе синхронного двигателя а. д. с. статора равна $E_0 = E_s$ и определяется только током холостого хода. Э. д. с. E_s при скорости вращения n , отличной от номинальной n_n , равна (в относительных единицах) [1]:

$$E_s = \frac{f^* x_{ad}}{x_{adn}} \cdot \frac{I_n}{I_{n1}} = \frac{f^* k_d I_n'}{k_{n1}} \quad (1)$$

Здесь n/f^* — частота сети; I_n — ток возбуждения; I_{n1} — ток возбужде-

нии холостого хода; x_{nd} — индуктивное сопротивление продольной реакции статора; $x_{ndn} = \frac{x_{dnen} - x_s}{C} = \left(\frac{1}{OKЗ} - \frac{x_s}{C} \right)$ — сопротивление продольной реакции статора при насыщении магнитной цепи, соответствующем номинальному напряжению на холостом ходу, где x_{dnen} — индуктивное сопротивление по продольной оси без учета насыщения; x_s — индуктивное сопротивление рассеяния; ОКЗ — отношение короткого замыкания; C — коэффициент искривления характеристики холостого хода при токе возбуждения $I_e = I_{n.3}$; $k_{\gamma} = \frac{I_{\gamma.3}}{I_{n.3}}$ — постоянный коэффициент;

$k_p = \frac{x_{nd}}{x_{ndn}}$ — коэффициент насыщения, представляющий собой нелинейную передаточную функцию между $\frac{I_{\gamma}}{I_{n.3}}$ и E_n [1].

С другой стороны, по векторной диаграмме явнополюсного синхронного двигателя (рис. 1) при любых значениях напряжения и частоты находим (в относительных единицах):

$$E_0 = j(x_d - x_q) I_d + \sqrt{U^2 + 2UfIx_q \sin \varphi + P^2 f^2 x_q^2}. \quad (2)$$

Здесь U , I — соответственно напряжение и ток статора двигателя; I_d — составляющая тока статора по продольной оси; x_d , x_q — индуктивное сопротивление соответственно по продольной и поперечной осям.

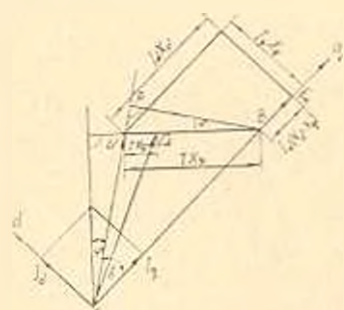


Рис. 1. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного двигателя.

Аналогично из этой же векторной диаграммы определяется э. д. с. E , пропорциональная потоку в воздушном зазоре:

$$E = \sqrt{U^2 + 2UfIx_q \sin \varphi + P^2 f^2 x_q^2}. \quad (3)$$

Составляющая тока статора по продольной оси определяется из выражения:

$$I_d = I \sin \varphi \cos \delta - I \sin \delta \cos \psi. \quad (4)$$

* Величины в относительных единицах в дальнейшем будут указываться без вы-

Угол нагрузки δ определяется из $\triangle OAB$ векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Ifx_d \cos \varphi}{U - Ifx_d \sin \varphi}. \quad (5)$$

В формулах (2), (3), (4), (5) произведя подстановки:

$$I \sin \varphi = \frac{\alpha \sin \varphi_n}{U}; \quad I \cos \varphi = \frac{\beta \cos \varphi_n}{U};$$

$$I^2 = \frac{1}{U^2} (\beta^2 \cos^2 \varphi_n + \alpha^2 \sin^2 \varphi_n)$$

(где $\beta = \frac{P}{P_n}$, $\alpha = \frac{Q}{Q_n}$ — относительные нагрузки статора соответственно по активной и реактивной мощностям), находим выражения (2), (3), (4) и (5) через активную и реактивную мощности статора:

$$E_0 = f(x_d - x_q)I_d + \sqrt{U^2 - 2fx_d \alpha \sin \varphi_n + \left(\frac{fx_d}{U}\right)^2 (\beta^2 \cos^2 \varphi_n + \alpha^2 \sin^2 \varphi_n)}; \quad (6)$$

$$E_s = \sqrt{U^2 - 2fx_q \alpha \sin \varphi_n + \left(\frac{fx_q}{U}\right)^2 (\beta^2 \cos^2 \varphi_n + \alpha^2 \sin^2 \varphi_n)}; \quad (7)$$

$$I_d = \frac{\alpha}{U} \sin \varphi_n \cos \delta + \frac{\beta}{U} \cos \varphi_n \sin \delta; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{fx_q \beta \cos \varphi_n}{U^2 - fx_q \alpha \sin \varphi_n}. \quad (9)$$

Приравнявая уравнения (1) и (6), после решения относительно α находим:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\left[k_s U \frac{I_s}{K_n} - U(x_d - x_q)I_d\right]^2 - (x_q \beta \cos \varphi_n)^2}}{x_q \sin \varphi_n}, \quad (10)$$

где

$$x_d = k_s x_{d00} + x_c. \quad (11)$$

Необходимо заметить, что в работе принято допущение о независимости x_d от насыщения [3].

Нелинейная функция $k_s = \varphi(E_s)$ может быть получена из характеристики холостого хода, которая одновременно представляет собой зависимость $k_s = \varphi\left(\frac{E_s}{f}\right)$ при любой частоте и аппроксимирована в

лине ломаной линии, каждая из отрезков которой описывается уравнением:

$$k_{n,n} = a_n - b_n \frac{E_{\text{в}}}{I} \quad (12)$$

где a_n и b_n — коэффициенты отрезков.

Зависимость тока возбуждения от различных параметров режима осуществляется принятым законом регулирования:

$$I_b = \varphi(n_1, n_2, \dots, n_n).$$

В рассматриваемых алгоритме и программе току возбуждения даны дискретные значения. Предусматривается возможность совместного использования программы с подпрограммами, реализующими различные законы регулирования.

Таким образом, для определения величины реактивной мощности необходимо совместное решение уравнений (7—12). Их решение осуществляется итерационным методом. В первом шаге итерации помимо заданных U , f , β и I_b принимаем заданным также $\gamma_1 = 0$. Итерация продолжается до выполнения условия сходимости ($x_i - x_{i-1} < \epsilon$). Блок-схема программы расчета приведена на рис. 2.

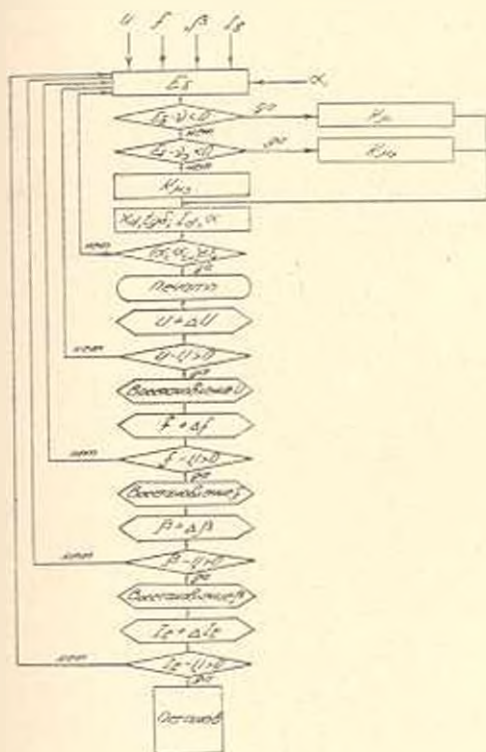


Рис. 2. Блок-схема программы расчета

В качестве примера рассмотрен синхронный двигатель типа СДН 18-91-10 с параметрами: $P_n = 10000 \text{ кВт}$; $U_n = 6000 \text{ в}$; $I_n = 1100 \text{ а}$;

$n_n = 600 \text{ об./мин.}$; $\cos \varphi_n = 0,9$; $\text{ОКЗ} = 0,9$; $x_s = 0,082$; $x_d = 1,095$; $x_q = 0,016$.
Принимаем $C = 1,2$, следовательно, $x_{\text{сдв}} = 1,042$.

По характеристике холостого хода синхронного двигателя строится характеристика $k_n = \varphi(E_n)$ (рис. 3), которая аппроксимирована в виде трех прямых отрезков.

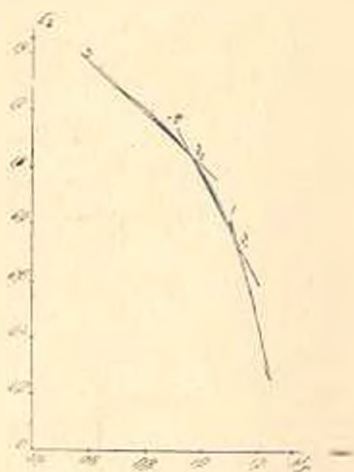


Рис. 3. Зависимость $k_n = \varphi(E_n)$. γ_1 и γ_2 — точки пересечения отрезков прямых

Коэффициенты отрезков равны:

$$a_1 = 1,296; a_2 = 1,51; a_3 = 2,15; b_1 = 0,232; b_2 = 0,51; b_3 = 1,13.$$

Коэффициент $k_{n,1}$ определяется по номинальному режиму: $k_{n,1} = 0,545$.



Рис. 4. Характеристики синхронного двигателя типа СДН—18—91—10. Сплошной линией указаны характеристики с учетом явнопольности, пунктирной — без учета явнопольности.

1 — $\varphi(U)$ при $\xi = 0,8$, $I_b = 0,9$, $f = 1$;

2 — $\varphi(\xi)$ при $U = 1,05$, $I_b = f = 1$;

3 — $\varphi(f)$ при $U = 0,95$, $I_b = \xi = 1$;

4 — $\varphi(I_b)$ при $U = 0,95$; $f = \xi = 1$.

Получены семейства кривых зависимости γ от U , f , β и I_h (некоторые из них приведены на рис. 4).

Выводы. Предложенная программа расчета режимов явнополюсного синхронного двигателя с учетом режима узла питания с одной стороны дает возможность исследования электромеханических переходных процессов энергосистемы с учетом влияния режима синхронных двигателей, с другой—позволяет произвести анализ математической модели синхронного двигателя и оценку принимаемых допущений. Примеры расчета режима синхронного двигателя на ЭЦВМ по разработанной программе показали необходимость учета явнополюсности в случаях широкого изменения параметров режима питающего узла и загрузки двигателя. Показано (см. рис. 4), что в ряде режимов погрешность от неучета явнополюсности доходит до 10% (например, кривые 2 при $U = f = I_h = 1$ и $\beta = 1,1$).

Распространенное в литературе [2] мнение, что такая погрешность не превышает 1–3%, объясняется тем, что в [2] рассматриваются некоторые дискретные значения переменных параметров режима ($f = I_h = 1$; $\beta = 0,5$; $\beta = 0,75$ и $\beta = 1$), при которых, действительно, погрешность не превышает 1–3% (см. рис. 4). Применение же ЭЦВМ позволяет вести расчет по более полным расчетным выражениям и рассматривать весь диапазон возможных изменений параметров.

АрмНИИЭ

Поступило 3.X.1969.

Գ. Ս. ՇԱՐՊԱՊԵՏՅԱՆ, Դ. Ա. ՆԱԶԱԶՅԱՆ

ԱՎՆԱՅՏ ԲԻՎԵՆՆԵՐՈՎ ՍԻՆԽՐՈՆ ՇԱՐՊԻՉԻ ԱՇԽԱՏԱՆԻԻ ՌԵԺԻՄԻ
ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԷԹՇՄ-Ի ՎՐԱ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հողվածում տրված են ալգորիթմ և ծրագիր, որոնք թույլ են տալիս որոշիլ սինխրոն շարժիչի ուժիմի պարամետրները (հաշվի առած կամ չառած ակնհայտությունը) էներգահամակարգում նախդրյունների լարման և համախոսության զգալի փոփոխման դեպքում: Ալգորիթմը նախատեսում է նաև զրգուման կարգավորման տարրեր օրենքների իրագործման նախադրություն: Ծրագիրը, որը կազմված է «Ուրալ-3» ԷԹՇՄ-ի համար, նախդրանում է էներգահամակարգում հարսության մեծ դեֆիցիտի հետ կապված սնմանների ուսումնասիրման ընդհանուր ծրագրի յաղագրիչ մասը:

Բերված է հաշվման ծրագրի բոկ-սխեման: Տրված են սինխրոն շարժիչի բնութագրերը՝ ակնհայտության հաշվառով և ուսանց գրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1963.
2. Литвиш А. В. Влияние снижения напряжения на реактивную мощность синхронных двигателей при нормальном возбуждении. Сборник статей под редакцией Сыромятникова И. А. Госэнергоиздат, 1959.
3. Лайбл Т. Теория синхронной машины при переходных процессах. Госэнергоиздат, 1957.