

## О КОРРЕКТНОСТИ ПРИБЛИЖЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧАНИЯ РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

В. И. Королев, Н. А. Фуфаев, Р. А. Чеснокова

(Горький)

Рассматривается полная система уравнений динамики синхронной машины с двумя обмотками на роторе. Указываются условия, при которых исходная система уравнений может быть сведена к уравнению движения ротора. В результате исследования этого уравнения определяются условия возникновения автоколебаний ротора.

Полную систему уравнений динамики синхронной машины, содержащую уравнения, описывающие электрические процессы, и уравнения механического движения ротора, получил А. А. Горев [1]. Затем были исследованы переходные процессы в электрических цепях и выражение электромеханического момента при постоянной скорости вращения ротора с одним контуром — обмоткой возбуждения. Однако во многих последующих работах электрические уравнения использовались лишь для нахождения электромеханического момента при постоянной скорости вращения ротора, а затем задача сводилась к изучению уравнения механического движения ротора [2,3]. При этом не указывалось, при каких условиях такое рассмотрение допустимо.

Было установлено, что качание ротора синхронной машины может проявляться в форме автоколебаний. Н. П. Власовым [4] исследовано уравнение движения ротора, и в предположении малости параметра при члене с первой производной найдены условия возбуждения автоколебаний. В этом же направлении проводилось исследование в работе [5]. Однако при исследовании автоколебаний Н. П. Власовым не рассматривались процессы в электрических цепях, а выражение электромеханического момента было получено из энергетических соображений. В других же работах использовались частные выражения электромеханического момента, не позволяющие объяснить явление автоколебаний.

**1. Уравнения динамики синхронной машины.** Уравнения динамики явнополюсной синхронной машины с двумя обмотками на роторе — обмоткой возбуждения и поперечной демпферной обмоткой — в предположениях, сделанных в работе [1], имеют вид

$$(1.1) \quad \begin{aligned} L_0 q_0'' + R q_0' &= -u_0 \\ L_x q_x'' + L_y q_y' \dot{\varphi} + M_x q_4'' + M_y q_5' \dot{\varphi} + R q_x' &= -E_x \\ -L_x q_x' \dot{\varphi} + L_y q_y'' - M_x q_4' \dot{\varphi} + M_y q_5'' + R q_y' &= -E_y \\ L_4 q_4'' + \frac{3}{2} M_x q_x'' + R_4 q_4' &= E_4 \\ L_5 q_5'' + \frac{3}{2} M_y q_y'' + R_5 q_5' &= 0 \\ J \ddot{\varphi} &= \frac{3}{2} [M_y q_x' q_5' - M_x q_y' q_4' - (L_x - L_y) q_x' q_y'] + T \end{aligned}$$

Здесь  $\varphi$  — угол между продольной осью ротора и магнитной осью первой фазы статора,  $q_x'$ ,  $q_y'$  — продольный и поперечный токи статора,  $q_4'$ ,  $q_5'$  — токи в обмотках ротора,  $E_x$ ,  $E_y$  — продольная и поперечная составляющие напряжения сети, подключенной к статору,  $E_4$  — э.д.с. возбуж-

дения,  $L_x, L_y$  — коэффициенты самоиндукции в продольной и поперечной осях машины,  $L_4, L_5$  — коэффициенты самоиндукции обмоток ротора,  $M_x, M_y$  — коэффициенты взаимной индукции фаз статора с обмотками ротора,  $R, R_4, R_5$  — активное сопротивление фаз статора и обмоток ротора,  $J$  — момент инерции ротора,  $T$  — момент внешних механических сил, приложенных к валу ротора.

Первое уравнение системы (1.1) описывает изменение нулевого тока статора. Переменная  $q_0$  не входит в остальные уравнения системы (1.1), поэтому это уравнение можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Введем безразмерные параметры и безразмерные переменные

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{L_4}{L_x}, & \beta_1 &= \frac{R_4}{\omega_1 L_x}, & \gamma_1 &= \frac{M_x}{L_x}, & \gamma_1^\circ &= \frac{3}{2} \gamma_1 \\ \alpha_2 &= \frac{L_5}{L_x}, & \beta_2 &= \frac{R_5}{\omega_1 L_x}, & \gamma_2 &= \frac{M_y}{L_x}, & \gamma_2^\circ &= \frac{3}{2} \gamma_2 \\ \lambda &= \frac{L_y}{L_x}, & \xi &= \frac{R}{\omega_1 L_x}, & \eta &= \frac{E_4}{E_0}, & M_0 &= \frac{3}{2} \frac{E_0^2}{J L_x \omega_1^4}, & T_0 &= \frac{T}{J \omega_1^2} \\ \tau &= \omega_1 t, & \theta &= \frac{\omega_2}{\omega_1} \tau - \tau - \frac{\pi}{2}, & s &= \theta' = \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1, & \frac{\omega_2}{\omega_1} &= \frac{d\varphi}{d\tau} \\ q_x &= \frac{E_0}{L_x \omega_1^2} x, & q_y &= \frac{E_0}{L_x \omega_1^2} y, & q_u &= \frac{E_0}{L_x \omega_1^2} u, & q_v &= \frac{E_0}{L_x \omega_1^2} v \end{aligned}$$

где  $\omega_1$  — частота внешней сети,  $\theta$  — угол между поперечной осью ротора и вращающимся вектором э.д.с. внешней сети. Тогда система уравнений переходных режимов синхронной машины приводится к безразмерному виду

$$\begin{aligned} (1.2) \quad & x^\circ + \xi x + \lambda(1+s)y + \gamma_1 u^\circ + \gamma_2(1+s)v = \sin \theta \\ & -(1+s)x + \lambda y^\circ + \xi y - \gamma_1(1+s)u + \gamma_2 v^\circ = -\cos \theta \\ & \gamma_1^\circ x^\circ + \alpha_1 u^\circ + \beta_1 u = \eta, \quad \gamma_2^\circ y^\circ + \alpha_2 v^\circ + \beta_2 v = 0 \\ & \theta^\circ = s, \quad s^\circ = T_0 + M_0 M \\ & (M = [\gamma_2 x v - \gamma_1 y u - (1-\lambda)xy]) \end{aligned}$$

Здесь и далее точка означает дифференцирование по безразмерному времени  $\tau$ ,  $M$  — момент электромагнитных сил, отнесенный к  $M_0$ .

**2. Исследование выражения электромеханического момента при постоянной скорости вращения ротора.** При постоянной скорости вращения ротора первые четыре уравнения системы (1.2) представляют собой неоднородную систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Характеристическое уравнение этой системы удовлетворяет условию Рауса — Гурвица при  $\lambda \alpha_2 - \gamma_2 \gamma_2^\circ > 0$ ,  $\alpha_1 - \gamma_1 \gamma_1^\circ > 0$ , что всегда имеет место, так как эти выражения являются поперечным и продольным коэффициентами рассеяния системы [1]; поэтому собственные решения системы затухают. В силу этого при исследовании электромеханического момента переходными значениями переменных будем пренебрегать. Вынужденные решения системы (установившиеся значения пере-

менных) имеют вид

$$(2.1) \quad x = z_1, \quad y = -z_2, \quad u = z_3, \quad v = -z_4$$

$$z_j(\theta) = \frac{1}{a^2 + b^2} \{ [a(a_{1j} - b_{2j}) + b(b_{1j} + a_{2j})] \sin \theta +$$

$$+ [a(b_{1j} + a_{2j}) - b(a_{1j} - b_{2j})] \cos \theta \} + \eta \frac{A_{3j}(0)}{\Delta(0)} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

$$a = \operatorname{Re} \Delta(p), \quad b = \operatorname{Im} \Delta(p), \quad a_{kj} = \operatorname{Re} A_{kj}(p), \quad b_{kj} = \operatorname{Im} A_{kj}(p)$$

$$(p = is, \quad i = \sqrt{-1})$$

Здесь  $\Delta(p)$  — определитель системы (1.2),  $A_{kj}(p)$  — миноры элементов определителя  $\Delta(p)$ . Подставляя (2.1) в выражение для  $M$  (в скобках в (1.2)), получим момент синхронной машины при  $s = \text{const}$

$$(2.2) \quad M = a_1(s) \eta^2 + b_1(s) + b_2(s) \cos 2\theta + b_3(s) \sin 2\theta +$$

$$+ \eta c_1(s) \cos \theta + \eta c_2(s) \sin \theta$$

Величина  $M$  имеет постоянную составляющую и составляющую, изменяющуюся периодически.

При синхронном вращении ротора ( $s = 0$ ) первая составляющая, которую назовем тормозным моментом, имеет вид

$$(2.3) \quad M_1 = a_1(0) \eta^2 + b_1(0)$$

$$a_1(0) = - \frac{\xi \gamma_1^2 (\lambda^2 + \xi^2)}{\beta_1^2 (\lambda + \xi^2)^2}, \quad b_1(0) = - \frac{1}{2} \frac{\xi (1 - \lambda)^2}{(\lambda + \xi^2)^2}$$

Величина  $M_1$  зависит только от параметров машины и не зависит от положения ротора. Тормозной момент имеет место при любом режиме работы и противодействует вращению ротора.

При отсутствии омических потерь в цепи статора ( $\xi = 0$ ) он исчезает. Вторая составляющая (синхронный момент) имеет вид

$$(2.4) \quad M_2 = b_2(0) \cos 2\theta + b_3(0) \sin 2\theta + \eta c_1(0) \cos \theta + \eta c_2(0) \sin \theta$$

$$b_2(0) = \frac{\xi (1 - \lambda^2)}{2 (\lambda + \xi^2)^2}, \quad b_3(0) = \frac{(1 - \lambda) (\xi^2 - \lambda)}{2 (\lambda + \xi^2)^2}$$

$$c_1(0) = \frac{\xi \gamma_1}{\beta_1 (\lambda + \xi^2)^2} (\xi^2 - \lambda + 2\lambda^2)$$

$$c_2(0) = \frac{\gamma_1}{\beta_1 (\lambda + \xi^2)^2} (\xi^2 \lambda - \lambda^2 - 2\xi^2)$$

Синхронный момент возникает в результате взаимодействия постоянного магнитного поля ротора и вращающегося магнитного поля статора. При отсутствии возбуждения ( $\eta = 0$ ) синхронный момент обусловлен различием индуктивностей по продольной и поперечной осям и имеет вид

$$M_2 = \frac{1}{2} \frac{1 - \lambda}{(\lambda + \xi^2)^2} [(\xi^2 - \lambda) \sin 2\theta + \xi (1 + \lambda) \cos 2\theta]$$

В случае, когда обмотки ротора имеют одинаковые индуктивности по продольной и поперечной осям ( $\lambda = 1$ ), синхронный момент имеет вид

$$M_2 = \frac{\eta \gamma_1}{\beta_1 (1 + \xi^2)} [\xi \cos \theta - \sin \theta]$$

При отсутствии омических потерь в цепи статора ( $\xi = 0$ )

$$(2.5) \quad M_2 = -\frac{1}{2} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \sin 2\theta - \eta \frac{\gamma_1}{\beta_1} \sin \theta$$

а если при этом индуктивности по осям равны ( $\lambda = 1$ ), то остается лишь второе слагаемое в этом выражении.

Рассмотренный выше момент торможения (2.3) и синхронный момент (2.4) полностью определяют электромеханический момент машины при синхронном режиме работы ( $s = 0$ ). Эти моменты, как и следовало ожидать, совпадают с полученными А. А. Горевым [1] для машины с одной обмоткой на роторе, так как при синхронном вращении наличие демпферной обмотки не влияет на электромеханический момент.

При  $s \neq 0$ , т. е. при асинхронном вращении ротора, электромеханический момент имеет вид (2.2). Величина  $a_1(s) \eta^2 + b_1(s)$  в выражении (2.2) представляет собой среднее значение асинхронного момента за период скольжения. Асинхронный момент обусловлен взаимодействием магнитного поля статора с полем токов, индуцированных в обмотках ротора.

Выведем условия, при которых выражение (2.2) переходит в известные выражения электромеханического момента, которыми пользовались разные авторы [1-3, 6-8]. Заметим, что при выводе формулы электромеханического момента обычно пренебрегали омическим сопротивлением в цепи статора. Поэтому, если в (2.2) положить  $\xi = 0$ , получим

$$(2.6) \quad a_1(s) = 0, \quad c_1(s) = 0, \quad c_2(s) = -\gamma_1 / \beta_1$$

$$b_{1,2}(s) = -\frac{s}{2} \left[ \frac{\beta_2 \gamma_2 \gamma_2^\circ}{\lambda^2 \beta_2^2 + s^2 (\gamma_2 \gamma_2^\circ - \lambda \alpha_2)^2} \pm \frac{\beta_1 \gamma_1 \gamma_1^\circ}{\beta_1^2 + s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)^2} \right]$$

$$b_3(s) = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda \beta_2^2 - \alpha_2 s^2 (\gamma_2 \gamma_2^\circ - \lambda \alpha_2)}{\lambda^2 \beta_2^2 + s^2 (\gamma_2 \gamma_2^\circ - \lambda \alpha_2)^2} - \frac{\beta_1^2 - \alpha_1 s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)}{\beta_1^2 + s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)^2} \right]$$

В случае одинаковых обмоток по продольной и поперечной осям ротора  $\lambda = 1$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$  и электромеханический момент имеет вид [8]

$$M = -\frac{\gamma \gamma^\circ \beta s}{\beta^2 + s^2 (\gamma \gamma^\circ - \alpha)^2} - \eta \frac{\gamma}{\beta} \sin \theta$$

Если в выражениях (2.6) пренебречь членами, содержащими  $s^2$ , считая  $s$  малым, то выражение электромеханического момента совпадает с полученным в [6]. В случае одинаковых обмоток по осям ротора получаем известное выражение [9]

$$M = -\eta \frac{\gamma}{\beta} \sin \theta - \frac{\gamma \gamma^\circ}{\beta} s$$

Из (2.6) можно получить выражения коэффициентов электромеханического момента в случае, когда на роторе имеется одна обмотка возбуждения. Действительно, считая демпферную обмотку разомкнутой, т. е.

полагая  $\gamma_2 = 0$ ,  $\alpha_2 = 0$ , получим

$$(2.7) \quad b_{1,2}(s) = \mp \frac{s}{2} \frac{\beta_1 \gamma_1 \gamma_1^\circ}{\beta_1^2 + s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)^2}$$

$$b_3(s) = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{\beta_1^2 - \alpha_1 s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)}{\beta_1^2 + s^2 (\gamma_1 \gamma_1^\circ - \alpha_1)^2} \right]$$

В случае цилиндрического ротора ( $\lambda = 1$ )

$$(2.8) \quad M = -\eta \frac{\gamma}{\beta} \sin \theta - \frac{s}{2} \frac{\beta \gamma \gamma^\circ}{\beta^2 + s^2 (\gamma \gamma^\circ - \alpha)^2} (1 - \cos 2\theta) -$$

$$-\frac{s^2}{2} \frac{\gamma \gamma^\circ (\gamma \gamma^\circ - \alpha)}{\beta^2 + s^2 (\gamma \gamma^\circ - \alpha)^2} \sin 2\theta$$

Выражения (2.7) и (2.8) совпадают с полученными А. А. Горевым [1]. Таким образом, моменты А. А. Горева получаются из (2.2) при  $\xi = 0$ ,  $\alpha_2 = 0$ ,  $\gamma_2 = 0$ , т. е. для ротора с одной обмоткой и в пренебрежении омическим сопротивлением статора.

Если в (2.8) пренебречь членами, содержащими  $s^2$ , то

$$(2.9) \quad M = -\eta \frac{\gamma}{\beta} \sin \theta - \frac{s}{2} \frac{\gamma \gamma^\circ}{\beta} (1 - \cos 2\theta)$$

**3. Качание ротора синхронной машины.** Динамика синхронной машины описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений шестого порядка (1.2), исследование которой представляет значительные трудности. Ниже указываются условия, при которых движение ротора синхронной машины может быть корректно описано уравнением второго порядка с использованием выражения электромеханического момента, полученного при постоянной скорости вращения ротора. Эти условия сводятся к следующему:

1) наибольшая постоянная времени электрических контуров много меньше постоянной времени механического движения (это выполняется, вообще говоря, для малых электрических машин);

2) за время  $T'$ , несколько превышающее время переходного процесса в электрических цепях, скорость вращения ротора  $s$  изменяется мало, т. е.  $T's \ll 1$ .

Второе условие означает, что за время  $T'$  результирующий момент электромагнитных и механических сил не успевает существенно изменить угловую скорость вращения ротора. Тогда на промежутке времени  $T'$  в первых четырех уравнениях системы (1.2) можно положить  $s = \text{const}$  и, пренебрегая собственными решениями (переходными значениями переменных), найти установившееся значение токов. Пусть  $T''$  — время протекания механического переходного процесса, которое в силу принятых нами условий много больше  $T'$ . Поэтому промежуток времени  $T''$  можно разделить на малые интервалы времени  $T'$ , в течение каждого из которых скорость ротора постоянна. При  $s = \text{const}$  электромеханический момент зависит только от полученных установившихся значений токов. Тогда на любом интервале времени  $T \geq T'' \gg T'$  изменение переменных  $\theta$  и  $s$  описывается двумя последними уравнениями системы (1.2), в которых электро-

механический момент определяется выражением (2.2).

$$(3.1) \quad \begin{aligned} \theta^* &= s, \\ s^* &= T_0 + a_1(s) \eta^2 + b_1(s) + b_2(s) \cos 2\theta + b_3(s) \sin 2\theta + \\ &+ \eta c_1(s) \cos \theta + \eta c_2(s) \sin \theta \end{aligned}$$

Поскольку при переходе от системы шестого порядка (1.2) к системе второго порядка (3.1) предполагаем, что электрические переходные процессы протекают «быстро», а механические (изменение  $\theta$  и  $s$ ) — «медленно», то сведение изучения динамики синхронной машины к изучению дифференциального уравнения второго порядка оказывается корректным, если  $\theta^*$  будет того же порядка, что и  $s^*$ . Но так как  $s$  меняется медленно, т. е.  $s^*$  предполагается малой величиной, величина  $s = \theta^*$  также должна быть малой порядка  $s^*$ .

Автоколебательному характеру качания ротора соответствует устойчивый предельный цикл системы (3.1), охватывающий состояние равновесия. Система (3.1) имеет на фазовом цилиндре ( $-\pi < \theta \leq \pi$ ) четыре состояния равновесия, координаты которых определяются уравнениями

$$\begin{aligned} s &= 0 \\ T_0 + a_1(0) \eta^2 + b_1(0) + b_2(0) \cos 2\theta + b_3(0) \sin 2\theta + \\ &+ \eta c_1(0) \cos \theta + \eta c_2(0) \sin \theta = 0 \end{aligned}$$

Характер состояний равновесия зависит от корней  $\lambda = 1/2 d \pm 1/2 \sqrt{d^2 + 4c}$  соответствующего характеристического уравнения, где

$$\begin{aligned} c &= -2b_2(0) \sin 2\theta_i + 2b_3(0) \cos 2\theta_i - \eta c_1(0) \sin \theta_i + \eta c_2(0) \cos \theta_i \\ d &= a_1'(0) \eta^2 + b_1'(0) + b_2'(0) \cos 2\theta_i + b_3'(0) \sin 2\theta_i + \\ &+ \eta c_1'(0) \cos \theta_i + \eta c_2'(0) \sin \theta_i \end{aligned}$$

Состояния равновесия  $(\theta_2, 0)$ ,  $(\theta_4, 0)$  — седла, для них  $c > 0$ , состояния равновесия  $(\theta_1, 0)$ ,  $(\theta_3, 0)$  ( $c < 0$ ) — узлы, если  $d^2 + 4c \geq 0$ , и фокусы, если  $d^2 + 4c < 0$ . Узлы (фокусы) устойчивы, если  $d < 0$ , и неустойчивы при  $d > 0$ . При  $d = 0$  фокус становится сложным. Для выяснения его устойчивости недостаточно линейного приближения, т. е. изучения характеристического уравнения, и вопрос может быть решен с помощью ляпуновских величин, которые выражаются через коэффициенты нелинейных уравнений, полученных путем отбрасывания в правых частях исходных уравнений всех членов порядка выше третьего. Если ляпуновская величина для сложного состояния равновесия отлична от нуля, то она характеризует устойчивость этого состояния равновесия, а также границу области устойчивости  $d = 0$  [10].

Для системы (3.1) с помощью ЭВМ были найдены состояния равновесия и исследована их устойчивость. Была прослежена смена устойчивости состояния равновесия  $(\theta_3, 0)$  в зависимости от параметров  $\lambda = L_y / L_x$ ,  $\xi$  (характеризующего омические потери в цепи статора) и  $T_0$  — механического момента на валу ротора. (Параметры  $\lambda$  и  $\xi$  входят в коэффициенты системы (3.1).) Вычисления проводились при  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 0.5$ ,  $\beta_1 = 5$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\gamma_1 = 0.3$ ,  $\gamma_2 = 0.1$ ,  $\eta = 0.1$  (синхронная машина при этом имеет недовозбужденную магнитную систему).

Сечения поверхности  $d = 0$  плоскостями  $\lambda = \text{const}$  в пространстве параметров  $(T_0, \lambda, \xi)$  приведены на фиг. 1 при  $\lambda = 0.1$  (а),  $\lambda = 0.3$  (б),  $\lambda = 0.5$  (в).

При  $\xi = 0$  (нет омических потерь в цепи статора) состояние равновесия  $(\theta_3, 0)$  устойчиво ( $d < 0$ ). С ростом  $\xi$  состояние равновесия становится неустойчивым ( $d > 0$ ), а затем снова устойчивым ( $d < 0$ ). Ляпуновская величина в первом случае положительна, а во втором — отрицательна. Следовательно, граница области устойчивости  $d = 0$  состояния равновесия  $(\theta_3, 0)$  состоит из двух частей. Одна часть ее является «опасной» (кривая 1, фиг. 1). При пересечении ее с ростом  $\xi$  к устойчивому состоянию равновесия стягивается единственный неустойчивый предельный цикл. Состояние равновесия становится неустойчивым. Вторая часть границы  $d = 0$  является «безопасной» (кривая 2, фиг. 1). При пересечении ее с уменьшением  $\xi$  из устойчивого состояния равновесия появляется единственный устойчивый предельный цикл, соответствующий «мягкому» режиму возбуждения автоколебаний [9]. Состояние равновесия становится неустойчивым.

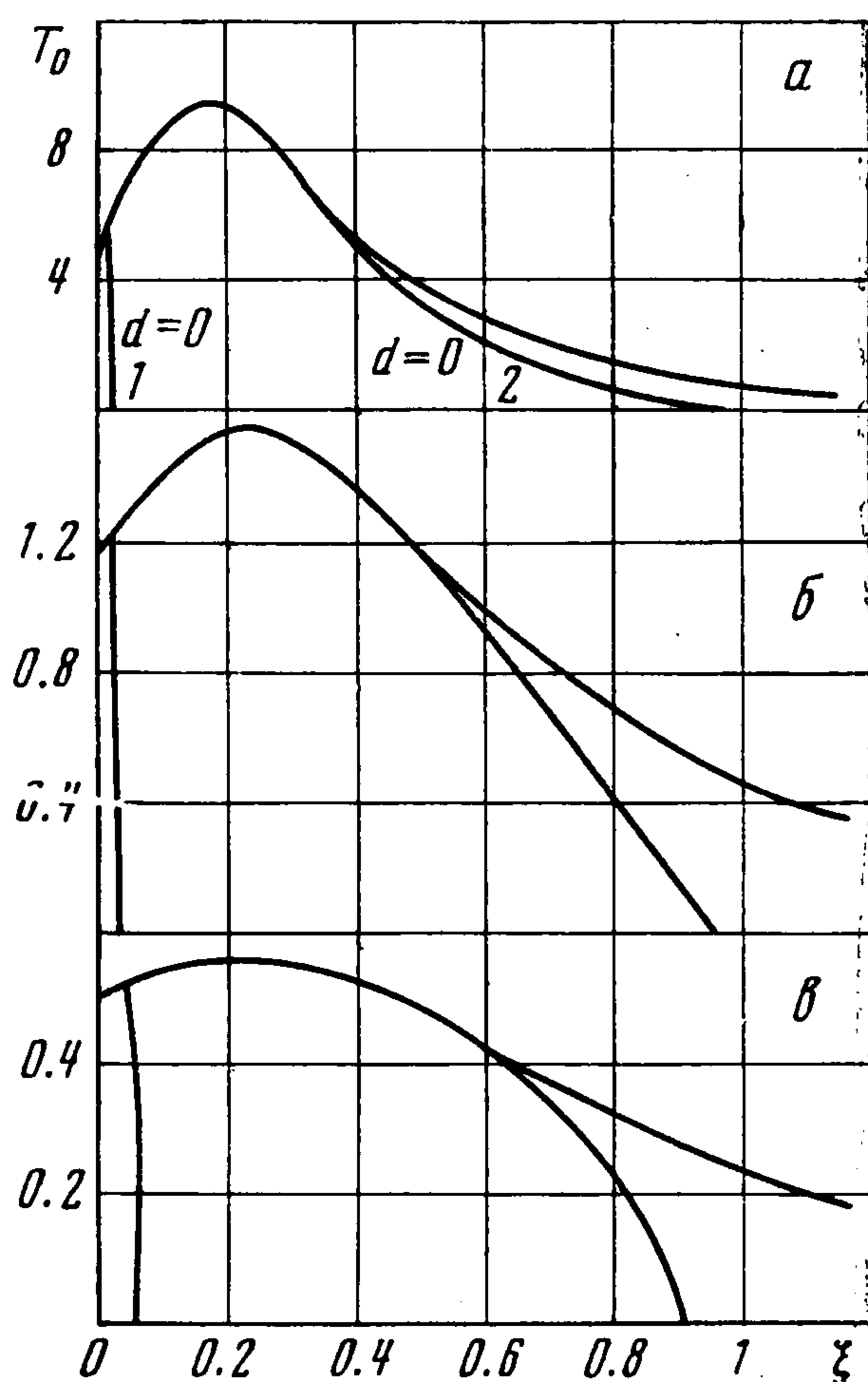
Приближенное интегрирование на ЭВМ системы (3.1) [11] показало, что для значений параметров вблизи безопасной части границы  $d = 0$  существует устойчивый предельный цикл (фиг. 2), который растет с уменьшением  $\xi$ , а затем исчезает. (Характер исчезновения цикла не исследовался.) Состояние равновесия  $(\theta_1, 0)$  с ростом  $\xi$  также дважды меняет устойчивость.

При возрастании  $\xi$  или  $T_0$  фокусы  $(\theta_1, 0)$  и  $(\theta_3, 0)$  становятся узлами, затем сливаются соответственно с седлами  $(\theta_2, 0)$  и  $(\theta_4, 0)$  и через сложные состояния равновесия типа «седло — узел» исчезают (фиг. 1).

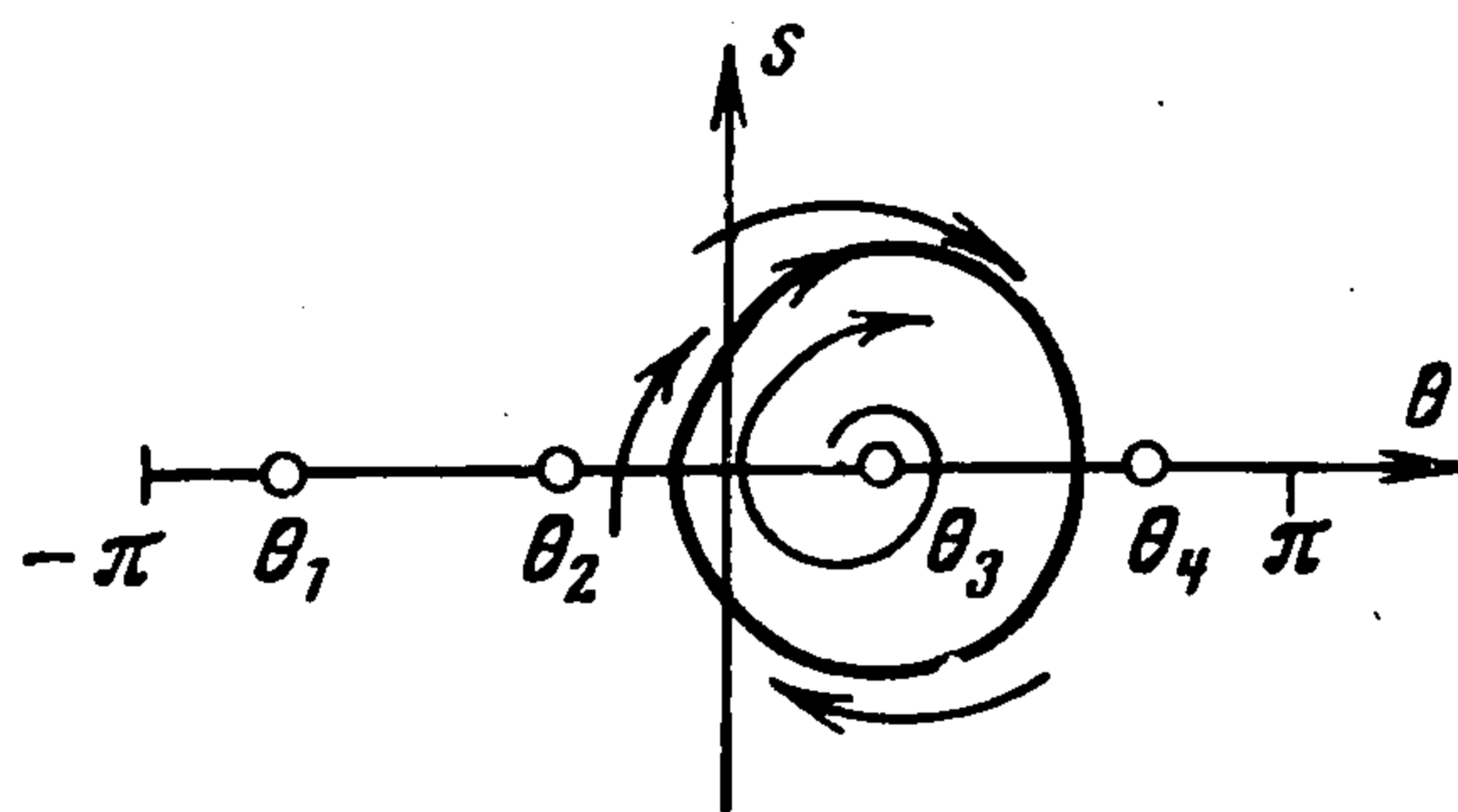
Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы: а) при указанных условиях 1) и 2) качание ротора синхронной машины может быть приближенно описано уравнением механического движения ротора, в котором использовано выражение электромеханического момента, полученное при постоянной скорости вращения ротора; б) самораскачивание ротора возможно только при наличии омических потерь в цепи статора.

В заключение авторы выражают признательность Ю. И. Неймарку за обсуждение работы и полезные советы.

Поступила 19 VI 1972



Фиг. 1



Фиг. 2

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. М., Госэнергоиздат, 1950.
  2. Янко-Триницкий А. А. Новый метод анализа работы синхронных двигателей при резкопеременных нагрузках. М., Госэнергоиздат, 1958.
  3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., «Энергия», 1964.
  4. Власов Н. П. Автоколебания синхронного мотора. Уч. зап. Горьковск. ун-та, вып. 12, 1939.
  5. Гершт Е. Н. Качественное исследование одного дифференциального уравнения теории электрических машин. Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1964, № 1.
  6. Edgerton H. E., Fourmarier P. The pulling into step of a salient pole synchronous Motor. A. I. E. E. Transactions, 1931, vol. 50.
  7. Белюстина Л. Н. Об устойчивости режима работы явнополюсного синхронного двигателя. Изв. АН СССР, ОТН, 1954, № 10.
  8. Горушкин В. И. Условия синхронизации синхронного генератора с нелинейной асинхронной характеристикой. Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика, 1959, № 2.
  9. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. Изд. 2. М., Физматгиз, 1959.
  10. Баутин Н. Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. М., Гостехиздат, 1949.
  11. Белюстина Л. Н. Определение качественной структуры «грубой» динамической системы путем приближенного построения особых траекторий. Изв. вузов. Радиофизика, 1959, т. 2, № 4.
-