

УДК 621.313.

М. А. Ваганов, И. А. Пименова

Особенности синхронного неявнополюсного генератора при учете активного сопротивления обмотки статора

Анализируется математическая модель синхронного неявнополюсного генератора, составленная при учете активного сопротивления обмотки статора и позволяющая выявить ряд особенностей этих машин в общем случае, без относительно к их мощности и скорости вращения. Такая модель дает также возможность получить количественную оценку значений угла нагрузки, перегрузочной способности и коэффициента мощности генератора.

Относительный параметр; коэффициент возбуждения; функции тока, угла нагрузки, активной и электромагнитной мощностей; угловая характеристика; КПД статора; оптимальное значение коэффициента мощности генератора

При исследовании установившихся режимов работы синхронных машин в большинстве случаев активное сопротивление обмотки статора r_1 не учитывается, так как это сопротивление, как правило, на порядок меньше синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси x_d и падение напряжения на этом сопротивлении пренебрежимо мало по сравнению с падениями напряжения на синхронных индуктивных сопротивлениях обмотки статора по продольной x_d и поперечной x_q осям.

Синхронные генераторы работают, как правило, параллельно с сетью, и уравнение напряжения по второму закону Кирхгофа для одной из фаз обмотки статора может быть записано в следующем виде;

$$\dot{U}_c + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 r_1 + jx_d \dot{I}_1, \quad (1)$$

где \dot{U}_c – вектор фазного напряжения сети; \dot{E}_1 – вектор ЭДС возбуждения, индуцированной в обмотке статора потоком возбуждения Φ_2 ; \dot{I}_1 – вектор фазного тока обмотки статора.

Вводя обозначение $(-\dot{U}_c) = \dot{U}_1$, выражение (1) перепишем в форме

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{I}_1 r_1 + jx_d \dot{I}_1, \quad (2)$$

На основании выражения (2) построена векторная диаграмма синхронного неявно-полюсного генератора (СНГ) при перевозбуждении и представленная на рис. 1. На векторной диаграм-

ме приняты следующие обозначения: d_3 – продольная ось эквивалентного генератора сети; d , q – продольная и поперечная оси рассматриваемого синхронного генератора; φ_1 – фаза вектора тока \dot{I}_1 относительно вектора напряжения \dot{U}_1 ; θ – угол нагрузки; ψ_1 – фаза вектора тока \dot{I}_1 обмотки статора относительно ЭДС возбуждения \dot{E}_1 .

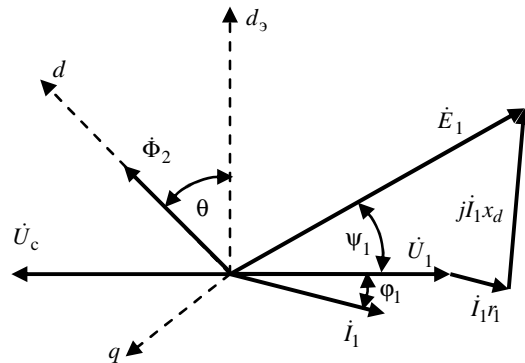


Рис. 1

Используя данную векторную диаграмму, составим систему алгебраических уравнений в проекциях на линию вектора напряжения \dot{U}_1 и на направление, ему перпендикулярное:

$$E_1 \cos \theta - I_1 x_d \sin \varphi_1 - \dot{I}_1 r_1 \cos \varphi_1 = U_1, \quad (3)$$

$$E_1 \sin \theta - I_1 x_d \cos \varphi_1 + \dot{I}_1 r_1 \sin \varphi_1 = 0. \quad (4)$$

Решение этих уравнений относительно тока обмотки статора I_1 и угла нагрузки θ имеет вид

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1} F_I, \quad (5)$$

$$\theta = \arccos F_\theta, \quad (6)$$

$$F_I = \frac{-(x_{d*} \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1) + \sqrt{k_B^2 (1 + x_{d*}^2) - (x_{d*} \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)^2}}{1 + x_{d*}^2}, \quad (7)$$

$$F_\theta = \frac{1}{k_B} [1 + F_I (\cos \varphi_1 + x_{d*} \sin \varphi_1)], \quad (8)$$

$$x_{d*} = x_d / r_1, \quad (9)$$

$$x_{d*} = E_1 / U_1, \quad (10)$$

где F_I – функция тока обмотки статора; F_θ – функция угла нагрузки; x_{d*} – относительный параметр; k_B – коэффициент возбуждения.

При параллельной работе синхронного генератора с сетью напряжение U_1 фиксировано и коэффициент возбуждения характеризует уровень ЭДС возбуждения относительно этого напряжения. Активное сопротивление r_1 обмотки статора быстро уменьшается с повышением мощности синхронного генератора.

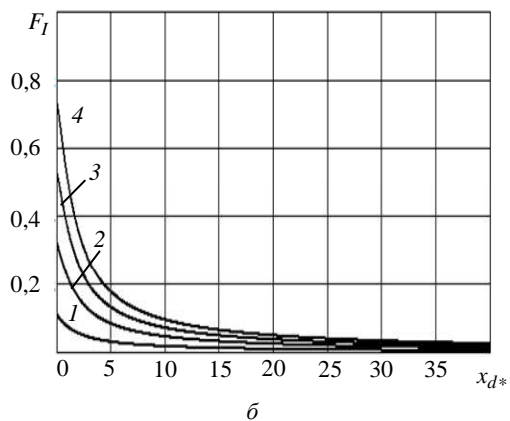
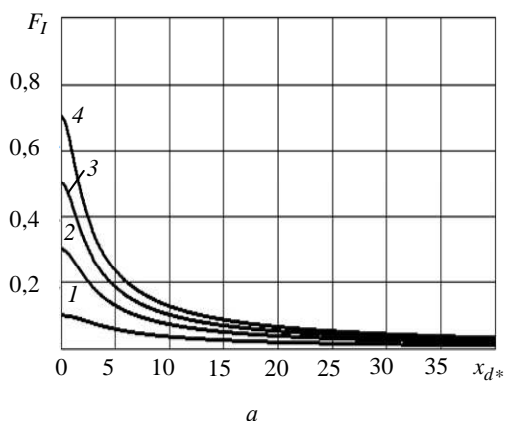


Рис. 2

Сопротивления r_1 и x_d уменьшаются при возрастании мощности синхронной машины, но сопротивление r_1 уменьшается быстрее, что со-

провождается увеличением x_{d*} с возрастанием мощности генератора, и малым значениям x_{d*} соответствуют синхронные генераторы небольшой мощности. В силу этого анализ каких-либо показателей качества синхронного генератора в плоскости параметра x_{d*} эквивалентен оценке влияния мощности генератора на эти показатели. И такая оценка оказывается справедливой во всем диапазоне мощностей синхронных машин. Прежде всего это утверждение относится к функциям тока и угла нагрузки.

На рис. 2 графически представлена зависимость $F_I = f(x_{d*})$, определяемая выражением (7), для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и двух значений коэффициента мощности: $a - \cos \varphi_1 = 1$ (что соответствует нормальному возбуждению) и $b - \cos \varphi_1 = 0,9$ при перевозбуждении.

Все кривые с увеличением параметра x_{d*} монотонно затухают. Повышение коэффициента возбуждения k_B сопровождается возрастанием значений функции F_I (соответствующие кривые смещаются вверх), т. е. ток I_1 увеличивается. Снижение коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ вызывает также некоторое увеличение тока I_1 за счет появления реактивной составляющей этого тока.

Графики функции угла нагрузки синхронного неявнополюсного генератора $\theta = f(x_{d*})$, определяемой выражениями (6) и (8), представлены на рис. 3 для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (с кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и трех значений коэффициента мощности: $a - \cos \varphi_1 = 1$ (соответствует нормальному возбуждению синхронного генератора); $b - \cos \varphi_1 = 0,9$; $в - \cos \varphi_1 = 0,8$ при перевозбуждении.

С увеличением мощности синхронного генератора (параметр k_B растет) угол нагрузки возрастает при фиксированном значении коэффици-

ента возбуждения k_B независимо от коэффициента мощности генератора $\cos \varphi_1$. Повышение коэффициента мощности генератора $\cos \varphi_1$ сопровождается снижением угла нагрузки, так как при этом уменьшается активная мощность генератора. При коэффициентах мощности $\cos \varphi_1 = 0,9$ и $0,8$ и при коэффициентах возбуждения $k_B = 1,5 \dots 1,7$ (рис. 3, б и в) угол нагрузки θ составляет $25 \dots 32^\circ$, что согласуется с номинальными значениями углов нагрузки синхронных неявнополюсных генераторов мощностью от нескольких киловатт и выше. Следует также отметить, что при $x_{d*} > 20$ угол нагрузки практически остается постоянным при фиксированном значении коэффициента возбуждения k_B . Повышение коэффициента возбуждения k_B приводит к увеличению угла нагрузки. Но при этом перегрузочная способность генератора снижается.

В синхронных неявнополюсных генераторах малой мощности (мощностью в пределах одного киловатта), для которых значение параметра $x_{d*} < 3$, числовое значение этого параметра оказывает существенное влияние на угол нагрузки синхронного неявнополюсного генератора. В частности, уменьшение x_{d*} сопровождается быстрым снижением угла нагрузки (начала графиков на всех трех частях рис. 3).

Решение системы уравнений (3) и (4) относительно активной $I_1 \cos \varphi_1$ и реактивной $I_1 \sin \varphi_1$ составляющих тока обмотки статора имеет вид

$$I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U_1}{\eta_1} \frac{(k_B \cos \theta - 1) + k_B x_{d*} \sin \theta}{1 + x_{d*}^2}, \quad (11)$$

$$I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U_1}{\eta_1} \frac{(k_B \cos \theta - 1)x_{d*} - k_B \sin \theta}{1 + x_{d*}^2}, \quad (12)$$

и отсюда – действующее значение тока обмотки статора синхронного неявнополюсного генератора $I_1 = \sqrt{(I_1 \sin \varphi_1)^2 + (I_1 \cos \varphi_1)^2}$. При учете (11) и (12), а также активного сопротивления обмотки статора получим следующее окончательное выражение для тока обмотки статора:

$$I_1 = \frac{U_1}{\eta_1} \sqrt{\frac{k_B^2 - 2k_B \cos \theta + 1}{1 + x_{d*}^2}}. \quad (13)$$

Выражения (11)–(13) определяют соответствующие токи обмотки статора синхронного неявнополюсного генератора в функции угла нагрузки θ .

Из сравнения выражений (5) и (13) получим еще одно выражение для функции тока синхронного неявнополюсного генератора

$$F_{I\theta} = \sqrt{\frac{k_B^2 - 2k_B \cos \theta + 1}{1 + x_{d*}^2}}, \quad (14)$$

но в зависимости от угла нагрузки синхронного генератора θ с учетом возможных изменений коэффициента возбуждения k_B и относительного параметра x_{d*} .

Активная мощность на зажимах m_1 -фазной обмотки статора синхронного генератора $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ может быть представлена как разность электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой вращающимся магнитным полем через воздушный зазор от ротора к статору, и электри-

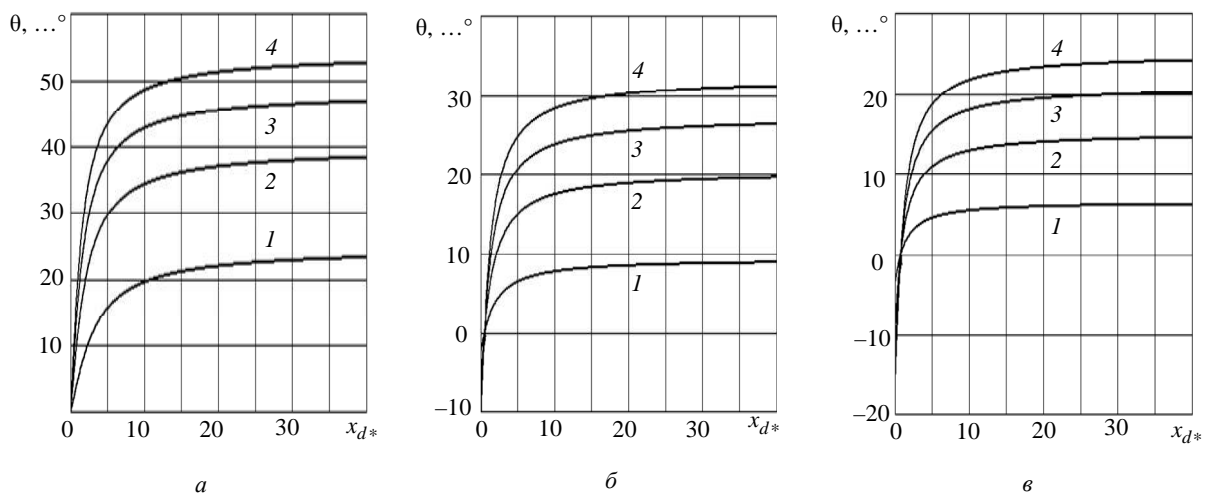


Рис. 3

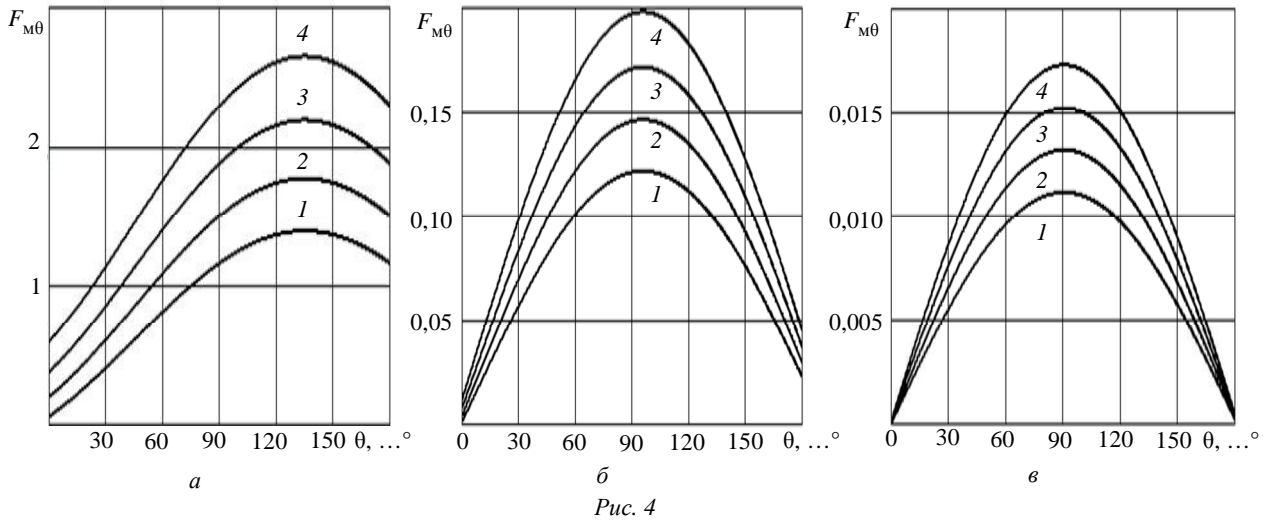


Рис. 4

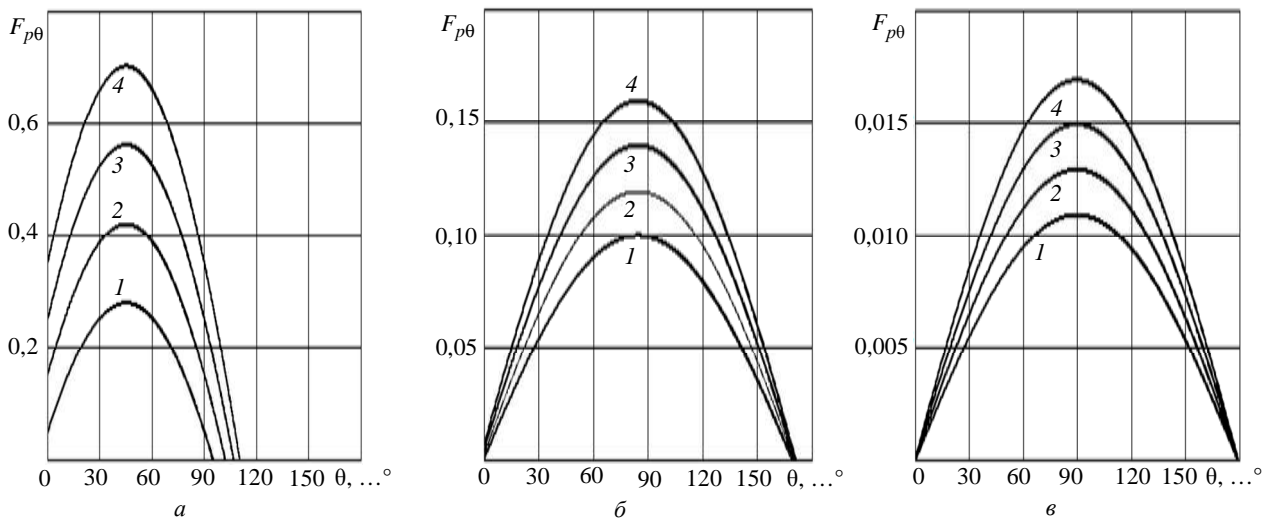


Рис. 5

ческих потерь в обмотке статора $P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1$. И тогда $P_{ЭМ} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 + m_1 I_1^2 r_1$. Учитывая (5) и (7), получим

$$P_1 = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_p, \quad P_{ЭМ} = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_M, \quad (15)$$

$$F_p = F_I \cos \varphi_1, \quad F_M = F_I (\cos \varphi_1 + F_I), \quad (16)$$

а при учете (11) и (13) –

$$P_1 = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_{p\theta}, \quad P_{ЭМ} = m_1 \frac{U_1^2}{r_1} F_{M\theta}, \quad (17)$$

$$F_{M\theta} = \frac{k_B^2}{1+x_{d*}^2} - \frac{k_B}{1+x_{d*}^2} \cos \theta + \frac{k_B x_{d*}}{1+x_{d*}^2} \sin \theta, \quad (18)$$

$$F_{p\theta} = -\frac{1}{1+x_{d*}^2} + \frac{k_B}{1+x_{d*}^2} \cos \theta + \frac{k_B x_{d*}}{1+x_{d*}^2} \sin \theta. \quad (19)$$

Выражения (18) и (19) определяют функции электромагнитной $F_{M\theta}$ и активной $F_{p\theta}$ мощностей синхронного неявнополюсного генератора в зависимости от угла нагрузки θ . Соответствующие графические зависимости представлены на рис. 4 и 5 и построены при четырех значениях коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и при следующих значениях параметра $x_{d*} = 1, 10$ и 100 (рис. 4, а, б, в и 5 а, б, в соответственно).

Зависимости $F_{M\theta} = f(\theta)$ и $F_{p\theta} = f(\theta)$, определяемые выражениями (18) и (19), представляют собой хорошо известные угловые характеристики синхронных машин [1]. Угловая характеристика без учета активного сопротивления обмотки статора определяется выражением [1]

$$P_{ЭМ} = \frac{m_1 U_1 E_1}{x_d} \sin \theta. \quad (20)$$

Из выражений (18) и (19) видно, что каждая из функций имеет три слагаемых. Третьи слагаемые пропорциональны синусу угла нагрузки θ , как и $P_{эм}$ в выражении (20). Вторые слагаемые зависят от косинуса угла нагрузки θ , но различаются знаком. В функции электромагнитной мощности это слагаемое отрицательно и вызывает снижение $F_{M\theta}$ и увеличение $F_{P\theta}$. Первые слагаемые различаются знаком и от угла нагрузки вообще не зависят, определяя постоянную составляющую электромагнитной и полезной активной мощностей, которая существует при любом угловом положении ротора и обусловлена только активным сопротивлением обмотки статора. При учете первого слагаемого электромагнитная мощность возрастает, а активная – снижается. Числовые значения всех трех слагаемых соизмеримы при значениях x_{d*} , близких к 1. С возрастанием x_{d*} значимость первых двух слагаемых быстро снижается и определяющим становится третье слагаемое, которое, в конечном итоге, определяет вид угловой характеристики синхронной неявнополюсной синхронной машины и используется на практике независимо от мощности машины.

Несинусоидальность угловых характеристик синхронных машин при учете активного сопротивления обмотки статора отмечена в [2].

Рассмотрим электрический КПД статора без учета магнитных потерь в стали статора η_3 как отношение полезной активной мощности на зажимах обмотки статора P_1 к электромагнитной мощности генератора $P_{эм}$, т. е. $\eta_3 = P_1 / P_{эм}$, и при учете (15) и (16) окончательно получим

$$\eta_3 = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + F_I} \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что электрический КПД η_3 статора существенно зависит от коэффициента мощности генератора $\cos \varphi_1$. На рис. 6 представлены графики $\eta_3 = f(\varphi_1)$ для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) и при значениях параметра $x_{d*} = 1, 10$ и 100 (рис. 6, а, б, в соответственно).

Анализ выражения (21) и графики на рис. 6 показывают, что данное выражение действительно имеет максимум по коэффициенту мощности $\cos \varphi_1$. Оптимальные значения $\sin \varphi_{1m}$ и $\cos \varphi_{1m}$, соответствующие максимуму электрического КПД статора η_3 , определяются выражениями

$$\sin^2 \varphi_{1m} = \frac{x_{d*}^2}{\sqrt{1+x_{d*}^2}} \frac{(k_B^2 + 1)\sqrt{1+x_{d*}^2} - 2k_B}{(k_B^2 - 1)^2 + x_{d*}^2 (k_B^2 + 1)^2}, \quad (22)$$

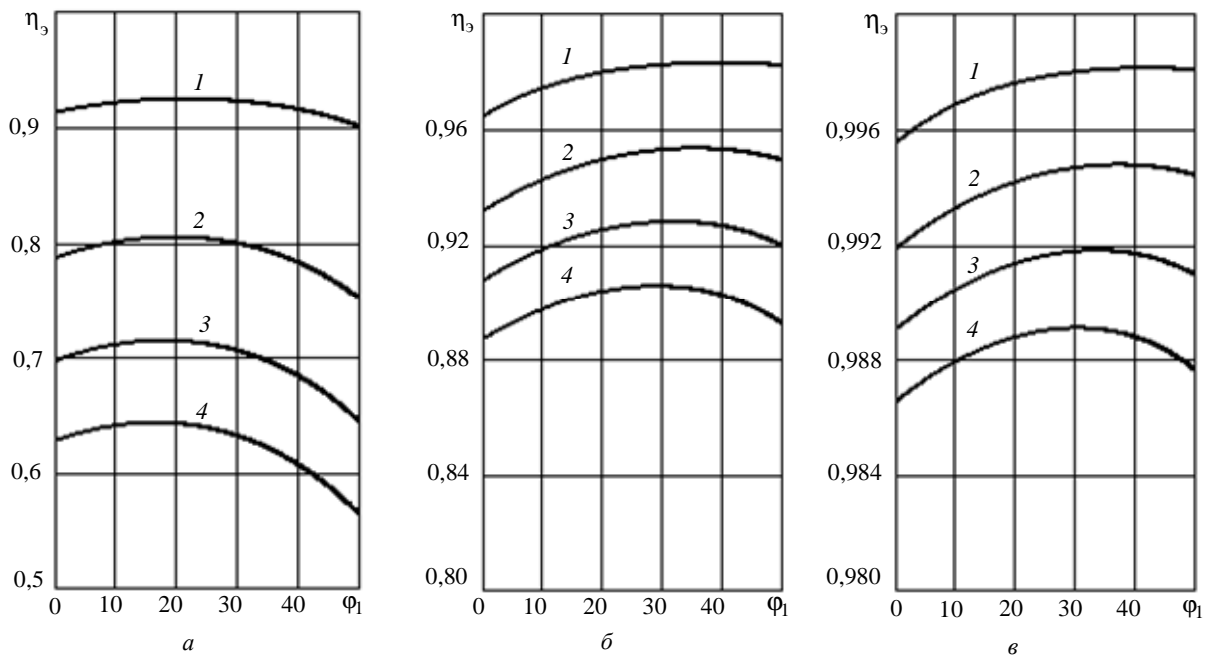


Рис. 6

$$\cos^2 \varphi_{1m} = 1 - \sin^2 \varphi_{1m}$$

и тогда максимум электрического КПД статора

$$\eta_3 = \frac{\cos \varphi_{1m}}{\cos \varphi_{1m} + F_I} \quad (23)$$

На рис. 7 представлены зависимости $\eta_3 = f(x_{d*})$ и $\eta_{эм} = f(x_{d*})$ для четырех значений коэффициента возбуждения $k_B = 1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_{1m} = 1$. На рис. 7 сплошным линиям соответствует зависимость $\eta_3 = f(x_{d*})$, а пунктирные линии, определяющие $\eta_{эм}$, располагаются выше. С увеличением параметра x_{d*} кривые сближаются, но всегда $\eta_{эм} > \eta_3$. Из этого следует, что работа синхронного генератора с «опережающим» коэффициентом мощности сопровождается повышением его КПД, т. е. экономически оправданна, так как не только возрастает пропускная способность линии электропередачи, но и улучшаются показатели работы самого синхронного генератора.

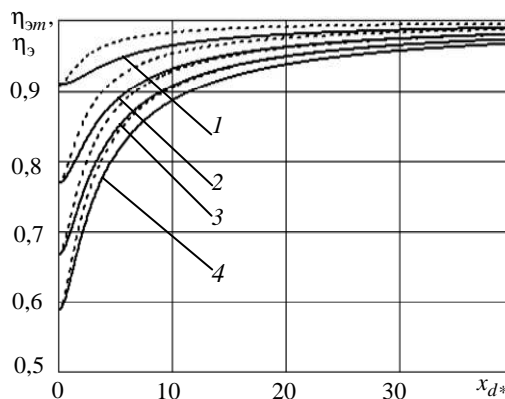


Рис. 7

Таким образом, учет активного сопротивления обмотки статора позволяет внести ряд принципиальных уточнений в математическую модель синхронного неявнополюсного генератора применительно к установившемуся режиму работы. В частности, получено точное выражение для угловых характеристик синхронного генератора, а также теоретически доказана целесообразность работы синхронного неявнополюсного генератора в режиме перевозбуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. В., Вольдек А. И. Электрические машины. СПб.: Питер, 2007.

2. Осин И. Л., Юферов Ф. М. Электрические машины. М.: Изд-во МЭИ, 2003.

M. A. Vaganov, I. A. Pimenova

FEATURES OF SYNCHRONOUS IMPLIED POLE GENERATOR WITH REGARD TO ACTIVE RESISTANCE OF STATOR WINDING

We will analyse a math model of synchronous implied pole generator, which is made with regard to active resistance of stator winding and which allows to reveal a number of features of these machines in general, regardless of their capacity. Also, this model provides an opportunity to get a quantitative estimate of the angle load, overload capacity and power factor of the generator.

Relative parameter; the coefficient of excitation; the stream function of the load angle, active and electromagnetic power; angle characteristics; stator efficiency; the optimal value of the power factor of the generator