

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

С. К. ВОХЯН

К РАСЧЕТУ МНОГОФАЗНОГО САМОВОЗБУЖДАЮЩЕГОСЯ
 ИНДУКЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В последние годы все чаще приходится сталкиваться с необходимостью оценки возможностей индукционных генераторов, возбуждаемых от конденсаторов. Существующая литература не дает необходимого материала для достоверного расчета генераторов, что отрицательно сказывается на их развитии и практическом применении. Это привело к необходимости разработки методики расчета, которая основывалась бы на общепринятой методике расчета асинхронных двигателей (ВНИИЭМ, 1954 г.) и давала бы хорошую сходимость с экспериментом.

В статье приведены некоторые расчетные формулы, характерные для индукционных генераторов, и краткие пояснения к ним, которые, как правило, касаются только новых формул. Обозначения часто встречающихся величин приведены ниже.

1. Расчетная э. д. с. холостого хода:

$$E = U \left(1 - \frac{c^2 p^2}{D_i Z_1} \right) \kappa,$$

где $c = 12$ в случае полузакрытых пазов статора и $c = 5$ в случае открытых пазов статора.

При пренебрежении падением напряжения на активном сопротивлении, э. д. с. холостого хода индукционного генератора равна:

$$E = U - I_m x_1 = U \left(1 - x_1 \frac{I_m}{I_1} \right),$$

где x_1 — сопротивление рассеяния статора в относительных единицах

$$x_1 \frac{I_m}{I_1} = \frac{0,32 \pi k_m k_c}{f_w^2} \frac{c^2 p^2}{D_i Z_1}$$

Принимая $c = 0,32 \pi k_m k_c / f_w^2 \approx 12$ для полузакрытых пазов статора и $c \approx 5$ для открытых пазов, получаем формулы п. 1.

Обозначение	Наименование	Размерность
P	Мощность генератора	вт
U, U_2	Фазное и линейное напряжение	в
f	Частота	Гц
I_m	Намагничивающий ток	а
D_s	Внутренний диаметр статора	см
l_s	Расчетная длина статора	см
τ	Полюсное деление	см
δ	Воздушный зазор	мм
Z_1	Число пазов статора	—
p	Число пар полюсов	—
x_1	Сопротивление рассеяния фазы статора	ом
x_2	Приведенное сопротивление рассеяния ротора	ом
r_2	Приведенное активное сопротивление ротора	ом
x_m	Сопротивление намагничивания	ом
P_{Cu}	Потери в меди статора	вт
P_F	Полные потери в стали статора	вт
$P_{C,c}$	Потери в конденсаторах	вт
$\%P_c$	Добавочные потери холостого хода	вт
$\operatorname{tg} \delta$	Тангенс угла потерь в конденсаторах	—
$w_{эф}$	Эффективное число витков фазы статора	—
f_x	Обмоточный коэффициент	—
k_s	Коэффициент воздушного зазора	—

2. Расчетный магнитный поток:

$$\Phi = \frac{E}{2k w_{эф} f 50} 10^8 \text{ вб.}$$

В отличие от формул для асинхронных двигателей, k — коэффициент формы кривой напряжения — определяется по рис. 1 в зависимости от коэффициента насыщения зубцов k_s .

3. Индукция в зазоре и магнитное напряжение зазора:

$$B_s = \frac{\Phi}{\tau \delta} \text{ вб.}$$

В отличие от метода Ф. Пунга, расчет магнитной цепи генераторов

повышенной частоты при нелицитне расчетной индукции в зубцах не более 16—16,5 кГс ведется по максимальному значению индукции. α_i — коэффициент уплощения формы кривой поля — определяется в зависимости от коэффициентов насыщения зубцов и спинки (рис. 1).

$$AW_i = 0,08 B_s \delta k_c k_r \alpha_i$$

где k_r — коэффициент рифления, определение которого дано в [1].

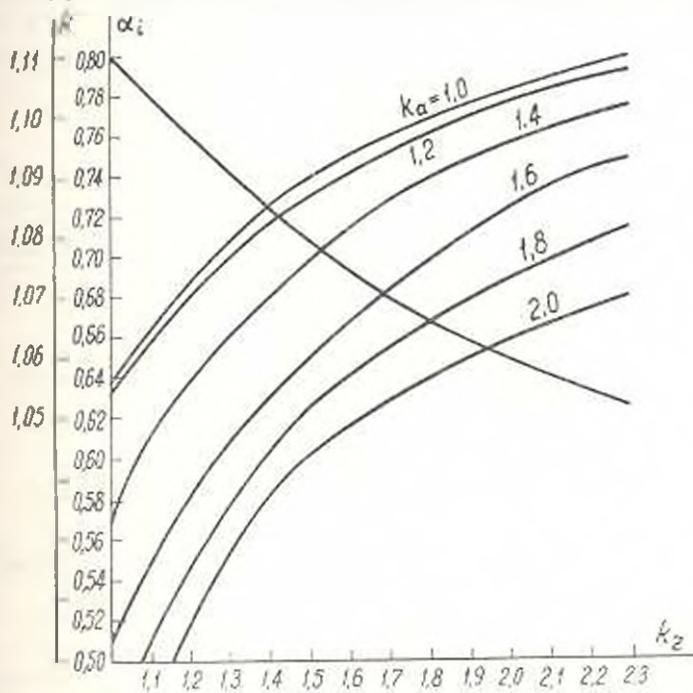


Рис. 1.

4. Магнитное напряжение зубцов статора и ротора

а) Трапецевидальные зубцы статора:

$$AW_{z_1} = AW_{z_1} \gamma$$

где AW_{z_1} — магнитное напряжение зубцов, определенное по основной кривой намагничивания и индукции на 1/3 высоты зубца;

γ — отношение величины магнитного напряжения зубцов, определенной методом графического интегрирования, к величине магнитного напряжения, определенной по индукции на 1/3 высоты зубца (рис. 2) [2]. На рис. 2 пунктирные кривые построены с учетом потока, проходящего через паз параллельно зубцу.

б) Круглые пазы ротора:

$$AW_{z_2} = AW_{z_2} \xi$$

где AW_{z_2} — магнитное напряжение зубцов, определенное по индукции в наиболее узком сечении;

ξ — отношение величины магнитного напряжения зубцов, определенной методом графического интегрирования, к величине магнитного напряжения, определенной по индукции в наиболее узком сечении (рис. 3) [2].

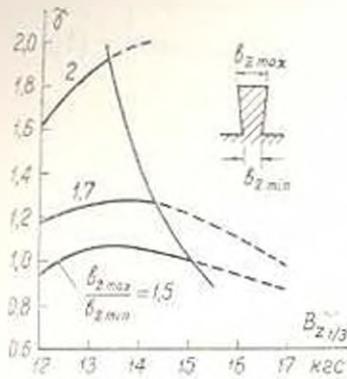


Рис. 2.

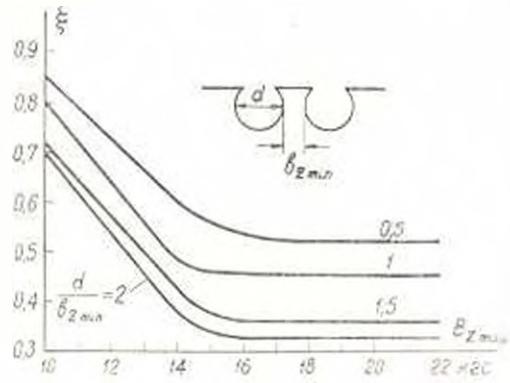


Рис. 3.

5. Коэффициент мощности генератора:

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}}; I_{1p} = I_m \cos \psi_2$$

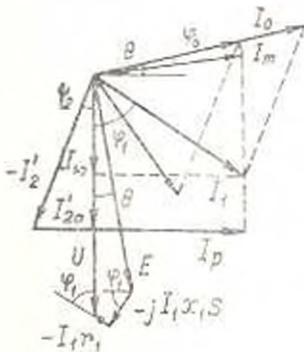


Рис. 4.

$$\cos^2 \theta = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}; \operatorname{tg} \theta = \frac{x_1 \cos \varphi_1 + r_1 \sin \varphi_1}{1 - x_1 \sin \varphi_1 - r_1 \cos \varphi_1}$$

Эти формулы получены из векторной диаграммы (рис. 4), построенной при условии неизменности напряжения под нагрузкой. Здесь r_1 — активное сопротивление обмотки якоря в относительных единицах. Значения $\cos \varphi_1$ и $\cos^2 \theta$ можно найти путем 2]—3 приближений, первоначально принимая $\cos \varphi_1 = I_{1a} / \sqrt{I_{1a}^2 + I_m^2}$.

6. Реактивный ток, обусловленный рассеянием обмоток генератора:

$$I_L = |I_{1a} + I_m| \frac{x_1 s - r_1 \operatorname{tg} \theta}{r_1 + x_1 s \operatorname{tg} \theta} a,$$

где s — абсолютная величина скольжения. Из рис. 4 следует, что $I_L = I_{2a} \operatorname{tg} (\psi_2 - \theta)$, а $I_{2a} = I_{1a} + I_m \sin \psi_2$; причем $\operatorname{tg} \psi_2 = x_1 s r_1'$.

7. Реактивный ток потребления генератора:

$$I_p = I_{1p} + I_L a.$$

8. Реактивный ток конденсаторов:

$$I_R = I_p \pm I_{np} \text{ а; } I_{np} = \frac{P}{mU} \operatorname{tg} \varphi \text{ а,}$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — тангенс угла нагрузки.

9. Емкость фазы батареи конденсаторов:

а) При параллельном включении и m -угольник:

$$C = \frac{I_R \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}{4\pi f U_1 \sin \frac{\pi}{m}} 10^6 \text{ мкф,}$$

б) При параллельном включении в m -лучевую звезду:

$$C = \frac{I_R \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}{2\pi f U} 10^6 \text{ мкф.}$$

10. Потери в батарее конденсаторов:

а) $P_{Ca} = \frac{m}{2 \sin \frac{\pi}{m}} U_1 I_R \operatorname{tg} \delta \text{ вт;}$ б) $P_{Cb} = m U I_R \operatorname{tg} \delta \text{ вт.}$

11. Параметры схемы замещения:

$$x_1^* = x_1 (1 + \tau_1) \left(1 + \tau_1 \frac{r_1}{x_1}\right) (1 + \rho_1^2) \text{ ом; } x_2^* = x_2 (1 + \tau_1)^2 (1 - \rho_1^2)^2 \text{ ом;}$$

$$r_2^* = r_2 (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1^2)^2 \text{ ом; } x_k^* = x_1^* + x_2^* \text{ ом.}$$

Параметры соответствуют схеме замещения с вынесенным на зажимы активным сопротивлением обмотки якоря. Здесь τ_1, ρ_1 — безразмерные

коэффициенты; $\tau_1 = \frac{x_1}{x_m}$; $\rho_1 = \frac{r_1}{x_1 + x_m}$.

12. Полная электромагнитная мощность статора:

$$P_s = -P - (P_{Ca} + P_l + P_{Cb}) + \sum P_0 \text{ вт.}$$

По величине и по знаку P_s соответствует энергетической диаграмме индукционного генератора.

13. Скольжение:

$$s = \frac{r_2^*}{x_k^*} \left[\frac{mU^2}{2P_s} + \sqrt{\left(\frac{mU^2}{2P_s}\right)^2 - x_k^*} \right].$$

Это выражение следует из квадратного уравнения:

$$s = \frac{P_{\text{стп}}}{P_3} = \frac{mU^2 r_2^*}{\left[\left(\frac{r_2^*}{s} \right)^2 + x_{R^*}^2 \right] P_3}$$

14. Скольжение при максимальной нагрузке:

$$s_{\text{н}} = -r_2^* x_{R^*}$$

Величина максимального скольжения соответствует максимальной электромагнитной мощности якоря и определена отысканием экстремума функции $P_3 = \tilde{\gamma}(s)$.

15. Кратность максимальной нагрузки:

$$K_M = \frac{s_M}{2s} \left[1 + \left(\frac{s}{s_M} \right)^2 \right] \approx \frac{s_M}{2s}$$

В отличие от известной формулы Клосса для ориентировочного определения кратности максимального момента асинхронных двигателей, формула п. 15 устанавливает точное значение кратности максимальной электромагнитной мощности.

16. Критическая емкость

а) При соединении конденсаторов в m -угольник:

$$C_{\text{к}} = \frac{2,25}{4 \sin^2 \frac{\pi}{m}} \frac{p^2 \delta k_r k_p}{\omega^2 f_w D_l l f^2 (1 + \tau_1)} 10^{11} \text{ мкф фаза};$$

б) при соединении конденсаторов в m -лучевую звезду:

$$C_{\text{зв}} = \frac{2,25 p^2 \delta k_r k_p}{\omega^2 f_w D_l l f^2 (1 + \tau_1)} 10^{11} \text{ мкф фаза}.$$

17. Критическая скорость вращения:

$$\text{а) } n_{\text{кр}} = \frac{9,10^7}{2 \sin \frac{\pi}{m} \omega} \sqrt{\frac{b k_r k_p}{10 C f_w D_l l (1 + \tau_1)}} \text{ об/мин};$$

$$\text{б) } n_{\text{кр}} = \frac{9,10^7}{\omega} \sqrt{\frac{b k_r k_p}{10 C f_w D_l l (1 + \tau_1)}} \text{ об/мин}.$$

Формулы п. п. 16 и 17 определяют величины, соответствующие началу самовозбуждения. Их вывод дан в [3].

18. Полные реактивные сопротивления фазы обмотки статора и приведенного ротора:

$$x = x_1 + x_m \text{ ом}; \quad x_p = x_2' + x_m \text{ ом}.$$

19. Входное реактивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x' = x_1 + \frac{x_2 x_m}{x_2 + x_m} \text{ ом.}$$

20. Входное приведенное реактивное сопротивление фазы ротора при замкнутом статоре:

$$x'_p = x_2 + \frac{x_1 x_m}{x_1 + x_m} \text{ ом.}$$

21. Постоянная времени фазы обмотки статора при разомкнутой обмотке ротора:

$$T = \frac{x}{\omega_c r_1} \text{ сек.}$$

где $\omega_c = 2\pi f$ — угловая частота в сек^{-1} .

22. Постоянная времени обмотки ротора при разомкнутой обмотке статора:

$$T_p = \frac{x_p}{\omega_c r_2} \text{ сек.}$$

Формулы п. п. 19—22 следуют из схемы замещения индукционного генератора. При выводе формул п. п. 19, 20 активные сопротивления приняты равными нулю.

23. Постоянная времени фазы обмотки статора при короткозамкнутом роторе:

$$T' = \frac{x_p}{x_p} T \text{ сек.}$$

24. Постоянная времени обмотки ротора при короткозамкнутом статоре:

$$T'_p = \frac{x'}{x} T_p \text{ сек.}$$

Между постоянными времени по п. п. 21, 22 и п. п. 23, 24 имеет место следующая связь.

$$T' = \frac{\sigma x}{\omega_c r_1} = \sigma T = \frac{x'}{x} T = \frac{x_p}{x_p} T;$$

$$T'_p = \frac{\sigma x_p}{\omega_c r_2} = \sigma T_p = \frac{x'_p}{x_p} T_p = \frac{x'}{x} T_p,$$

где σ — результирующий коэффициент рассеяния обмоток.

25. Ударный ток симметричного m -фазного короткого замыкания:

$$i_{uy} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{x'} \left[e^{-\frac{1}{2T}} + \left(1 - \frac{x'}{x_m} \right) e^{-\frac{1}{2T_p}} \right] a,$$

где E_1 — э. д. с. предшествующего режима.

26. Действующее значение ударного тока симметричного n -фазного короткого замыкания:

$$I_{\text{уд}} = \frac{E_1}{x'} \left| \sqrt{2e^{-\frac{t}{T'}} + \left(1 - \frac{x'}{x_m}\right)^2 e^{-\frac{t}{T'}}} \right| a.$$

Симметричный т. к. з. — $\frac{E_1(x_m - x')}{x_m x'} e^{-\frac{t}{T'}}$.

Апериодичный т. к. з. — $\frac{E_1 \sqrt{2}}{x'} e^{-\frac{t}{T'}}$.

Извлекая квадратный корень из суммы квадратов этих токов, получим приведенную выше формулу.

27. Критерий самовозбуждения в режиме холостого хода:

$$T_p > \frac{1}{8f \ln \frac{2m_0(x-x_0)}{[m_0x - r(1-\gamma_0)] - 1 [m_0x - r(1-\gamma_0)]^2 - 4r^2\gamma_0^2}}$$

Здесь $m_0 = \frac{1+z}{1+z}$ — максимальная глубина модуляции индуктивности;

$x_0 = \frac{x(1+z)}{2}$ — среднее значение индуктивности; $\gamma_0 = \frac{2}{1+z}$; $r =$

$= 2\left(r_s + \frac{P_{\text{ст}} - P_{\text{к}}}{mI_{\text{н}}^2}\right)$ ом — эквивалентное активное сопротивление; $P_{\text{ст}}$

$P_{\text{к}}$ — соответственно потери в стали статора и в конденсаторах в режиме холостого хода.

Комментарии и вывод формул п. 27 приведены в [4, 5].

Использование разработанной методики для расчета четырех типов индукционных генераторов (охватывающих диапазоны: по мощности — 0,6 — 75 кВт, по частоте — 400 — 1200 Гц, скорости вращения — 4000 — 24000 об/мин) показывает хорошую сходимость с экспериментом.

ВНИИКЭ

Получено 5.IX.1969.

В. И. РОБИНУ

ԲՈՎԸՆԱԳ ԻՆՏԵԼԵԿՏՈՍԱՆ ԻՆՏԵԼԵԾԻՆ ԳԼԵՆԲԱՏՈՐԻ
ՇՆՆՎԱՐԿԻ ԳԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա Վ Ի Ն Փ Ն Ի Վ

Հիմնվելով ազատիտիտի շարժիչների հաշվարկի բնորոշված մեթոդիկայի վրա, պատշաճելով ВНИИЭМ-ի հաշվարկի նորմալների ձևի ու մանրամասնություններ, մշակված է բազմաֆազ ինքնազրգուսան ինդուկցիոն գլենբատորի հաշվարկի մեթոդիկա: Հաշվարկային բանաձևերը տրված են այն տեսքով, որ հնարավոր է դրանց անմիջական օգտագործումը գործնական հաշվարկներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Боян С. К. Определение коэффициента воздушного зазора при наличии рифления на поверхности ротора. „Электротехническая промышленность“. № 2, 1963.
2. Oberrettl K. Bulletin Oerlikon, 1959, № 355, с. 66—84.
3. Боян С. К. Определение критических емкости и скорости вращения самовозбуждающихся индукционных генераторов. Сб. „Электротехническая промышленность“, вып. № 304, 1968.
4. Боян С. К. Экспериментальное исследование самовозбуждения индукционного генератора. „Электротехника“, № 2, 1967.
5. Боян С. К. Самовозбуждение индукционного генератора. Труды ВНИИЭМ, т. 25, 1969.