

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНДУКТОРНОГО АВТОТРАКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Петренко А.Н.
АО "СКБ Укрэлектромаш",
Украина, 61005, Харьков, ул. Искринская, 37

Петренко Н.Я., к.т.н., доц.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21 НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"
тел. (057) 707-68-44

Покращення техніко-економічних показників електрообладнання автомобілів та сільгоспмашин є актуальною проблемою. У статті розглянуті питання проектування ротора генератора з постійними магнітами. Робочий процес магнітоелектричної частини генератора розглянутий на основі схеми заміщення зовнішнього кола магніта з урахуванням магнітного стану самого магніта. Для розрахунку зовнішньої характеристики використана робоча діаграма постійного магніта.

Улучшение технико-экономических показателей электрооборудования автомобилей и сельхозмашин является актуальной задачей. В статье рассмотрены вопросы проектирования ротора генератора с постоянными магнитами. Рабочий процесс магнитоэлектрической части генератора рассмотрен на основании схемы замещения внешней цепи магнита с учетом магнитного состояния самого магнита. Для расчета внешней характеристики использована рабочая диаграмма постоянного магнита.

Энерговооруженность современных автомобилей и сельхозмашин постоянно растет, что требует повышения мощности автотракторных источников. Сложные условия эксплуатации автотракторных генераторов, связанных с повышенными вибрациями, значительные перепады температуры окружающей среды выдвигает условия создания высоконадежных многофазных бесконтактных индукторных генераторов с комбинированным возбуждением [1].

В традиционных конструкциях индукторных генераторов комбинированного возбуждения постоянные магниты при двухстороннем или одностороннем возбуждении размещаются на неподвижном статоре. В рассматриваемой конструкции генератора постоянные магниты размещены в пазах вращающегося индуктора. Такое конструктивное решение позволяет за счет совмещения функций индуктора улучшить массогабаритные показатели.

Геометрия магнитной системы генератора определена на стадии его электромагнитного расчета, в связи с чем, число постоянных магнитов и их предельные размеры с учетом конструкции крепления в пазах индуктора считаются заданными [2].

В качестве постоянных магнитов с учетом эксплуатационных, технологических и стоимостных показателей рекомендованы магнитотвердые ферриты (оксидно-бариевые анизотропные марки 22РА220), обладающие высоким значением коэрцитивной силы, отсутствием структурного старения в интервале температур $\pm 60^\circ\text{C}$.

Предполагаем, что электромагнитный расчет генератора уже выполнен, геометрия магнитной системы и параметры обмотки якоря известны.

Размеры постоянных магнитов определяются геометрией зубцового слоя индуктора и требованиями к самовозбуждению генератора. Совмещение функ-

ций индуктора обуславливает особенности расчета магнитоэлектрической части генератора. Объем постоянных магнитов определим из выражения [2]

$$V_m = \frac{0,9 \cdot P_c \cdot \alpha_1 \cdot \sigma_0 \cdot k_{ad} \cdot k_{уд} \cdot k \cdot 10^6}{4 \cdot k_{cp} \cdot f \cdot B_{m0} \cdot H_{mk} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}}$$

где P_c - мощность генератора; $\alpha_1 = 1,1 \dots 1,2$ - коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения, в долях МДС реакции якоря; $\sigma_0 = 1,05 \dots 1,15$ - коэффициент рассеяния в режиме холостого хода; $k_{ad} = 0,85 \dots 0,86$ - коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС возбуждения; $k_{уд} = 1,2$ - коэффициент ударности; $k = \sqrt{2}$ - кратность тока короткого замыкания при $\cos\varphi = 1$; $k_{cp} = 1,11$ - коэффициент формы кривой при синусоидальной форме напряжения; f - частота тока; B_{m0} - индукция в нейтральном сечении магнита при холостом ходе; H_{mk} - напряженность магнитного поля, определяется по кривой намагничивания.

Значения B_{m0} и H_{mk} предварительно могут быть приняты

$$\begin{aligned} B_{m0} &= (0,6 \dots 0,8) B_r; \\ H_{mk} &= (0,6 \dots 0,8) H_c, \end{aligned}$$

где B_r и H_c - из кривой размагничивания магнита.

Необходимую высоту магнита определим из выражения

$$h_m = \frac{0,45 \cdot k_{об} \cdot k_{ad} \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot \tau \cdot A}{H_{mk}},$$

где $k_{об} = 1$ - обмоточный коэффициент обмотки якоря для сосредоточенной обмотки; τ - полюсное деление;

A - линейная нагрузка.

При сосредоточенной обмотке якоря

$$A = \frac{m \cdot W_{\phi} \cdot I_c}{\pi \cdot D}$$

При заданных значениях P_c , A , f , $2p$ объем постоянного магнита на единицу мощности определяется из выражения

$$\bar{V}_m = \frac{p \cdot k_E}{8 \cdot k_{об} \cdot k_{\phi m} \cdot f \cdot B_{\delta cр} \cdot A}$$

где $k_E = \frac{E_{\delta}}{U_{\phi N}} \approx 1$;

$$k_{\phi m} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \left(1,122 - 0,122 \cdot \sqrt{\frac{F_{\delta} + F_z}{F_{\delta}}} \right) - \text{коэффициент}$$

формы магнитного поля. Отношение $\frac{F_{\delta} + F_z}{F_{\delta}} \approx 1,1 \dots 1,25$;

$$B_{\delta cр} = B_m \cdot \frac{(1 + \delta^*)^{2p} - 1}{(1 + \delta^*)^{2p} + 1} \cdot \frac{1}{p \cdot \delta^*} - \text{средняя индукция}$$

по длине воздушного зазора;

$$\delta^* = \frac{2 \cdot \delta}{D_m} - \text{относительный воздушный зазор};$$

δ - воздушный зазор от поверхности магнита до полюсов статора;

D_m - диаметр наружной поверхности магнитов.

Рабочий процесс магнитоэлектрической части генератора рассматривается на основе схемы замещения внешней цепи магнита с учетом магнитного состояния самого магнита. Расчет магнитного сопротивления воздушного зазора с учетом зубчатого строения якоря R_{δ} может быть выполнен с использованием метода Поля [2], по которому стенки зубцов якоря и ротора замещаются фиктивными с наклоном к горизонтальной линии под углом $\beta = 1,0 \dots 1,1$ рад.

Расчет магнитного сопротивления рассеяния магнита R_{sm} выполняется по методу Эвершеда-Пику. Магнит разбивается на участки симметрично относительно оси, проходящей через середину магнита. Каждая пара симметричных участков соединяется трубками магнитного потока рассеяния по всему периметру между линиями равного магнитного потенциала. Магнитное сопротивление внешнего контура рассеяния рассчитывается с учетом того, что на каждый магнит ротора приходится $1/z_p$ часть поперечного сечения ярма якоря, корпуса, втулки обмотки возбуждения, дополнительного зазора и т.д. Учитывая слабое насыщение магнитной цепи, при расчете магнитных сопротивлений используем магнитные проницаемости, соответствующие ненасыщенному состоянию ферромагнитных материалов.

На основании кривой размагничивания материала магнита ($B_r - H_c$) с учетом его размеров построим кривую размагничивания магнита ($\Phi_r - F_m$), кривая 1 (рис.1), где Φ_r - остаточный поток магнита,

$\Phi_r = B_r \cdot S_m$; $F_m = H_c \cdot h_m$ - коэрцитивная МДС магнита.

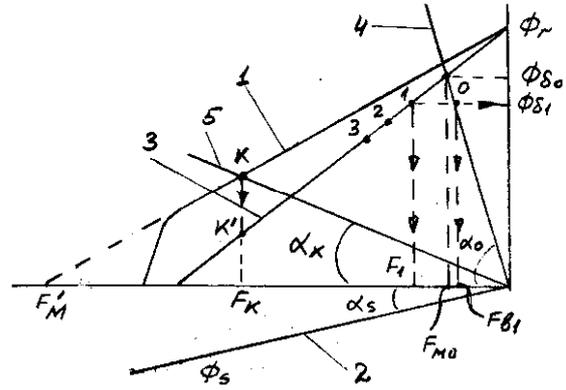


Рис. 1.

Для магнитов на основе магнитотвердых ферритов при определении F_m значения H_c определим на пересечении продолжения линейной части кривой размагничивания с осью абсцисс H_c' . При этом получаем условную МДС $F_m' = H_c' \cdot h_m$. После определения H_c' из кривой ($B_r - H_c$) можно определить сопротивление магнита:

$$R_M = \frac{h_m}{\beta \cdot S_M},$$

где $\beta = \frac{B_r}{H_c'}$.

Под углом α_s проводим магнитную характеристику рассеяния магнита - прямая 2. Вычитая из кривой 1 прямую 2, получим прямую 3 - зависимость магнитного потока, отдаваемого магнитом во внешнюю магнитную цепь от МДС магнита при холостом ходе, т.е. $\Phi_{\delta 0} = f(F_{M0})$. Под углом α_0 проводим магнитную характеристику внешней цепи - прямая 4 (если магнитная цепь ненасыщена). Пересечение прямых 3 и 4 определяет магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta 0}$ и МДС магнита F_{M0} на холостом ходу.

Действительное значение ЭДС холостого хода

$$E_{0д} = 4,44 \cdot \Phi_{\delta 0} \cdot f \cdot W_{\phi} \cdot k_{об}.$$

Параметры нагрузки в заданном режиме

$$R_H = \frac{U_{\phi}}{I_c} \cdot \cos \varphi;$$

$$X_H = \frac{U_{\phi}}{I_c} \cdot \sin \varphi.$$

Требуемая ЭДС холостого хода при такой нагрузке

$$E_{0г} = \frac{I_c \cdot (X_{qH} \cdot X_{dH} + R_{adH}^2)}{\sqrt{X_{qH}^2 + R_{adH}^2}},$$

где $X_{qH} = X_q + X_H$;

$$X_{dH} = X_d + X_H;$$

$$R_{adH} = R_{ad} + R_H;$$

$$X_q = X_{aq} + X_{сЯ};$$

$$X_{aq} = \frac{4 \cdot m \cdot f}{\pi \cdot p} \cdot (W_{\Phi} \cdot k_{об})^2 \cdot \lambda_{aq};$$

$$X_d = X_{ad} + X_{ся};$$

$$X_{ad} = \frac{4 \cdot m \cdot f}{\pi \cdot p} \cdot (W_{\Phi} \cdot k_{об})^2 \cdot \lambda_{ad};$$

$X_{ся}$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря.

Если $E_{0г} \neq E_{0д}$, то необходимо скорректировать объем магнита и повторить расчет.

Для расчета внешней характеристики используем рабочую диаграмму магнита (рис.1). В режиме холостого хода (точка O на прямой 3) $I_{г} = 0$, МДС продольной составляющей реакции якоря $F_{ad} = 0$ и напряжение генератора $U = E_{0д}$.

При увеличении тока нагрузки рабочая точка смещается из положения O по линии 3 влево-вниз. Задаемся несколькими рабочими точками (1, 2, 3 и т.д.) на линии 3 и определим соответствующие этим режимам значения тока и напряжения генератора. Точке 1 соответствует значение потока в воздушном зазоре $\Phi_{\sigma 1}$ и некоторое значение МДС магнита F_1 , расходуемой на проведение потока $\Phi_{\sigma 1}$ по внешней магнитной цепи генератора и на преодоление продольной составляющей реакции якоря F_{ad} . По прямой 4 $\Phi_{\delta 0} = f(F)$ потоку $\Phi_{\sigma 1}$ соответствует необходимая МДС внешней магнитной цепи $F_{в1}$. Тогда продольная составляющая реакции якоря в режиме точки 1

$$F_{ad} = F_1 - F_{в1}.$$

ЭДС нагруженного генератора в точке 1

$$E_N = 4,44 \cdot \Phi_{\delta 1} \cdot f \cdot W_{\Phi} \cdot k_{об}.$$

Угол ψ между ЭДС и током можно определить аналитически по известным параметрам генератора:

$$\psi = \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot (1 + g)}{2} + \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi \cdot (1 + g)^2}{4} + g} \right],$$

$$\text{где } g = \frac{X_q - R_a \cdot \operatorname{tg} \varphi}{s \cdot \frac{E_H}{F_{ad}} - X_{\sigma} + R_a \cdot \operatorname{tg} \varphi};$$

s - для генераторов с сосредоточенными обмотками определяется из выражения [2]

$$s = \frac{4}{\pi} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot W_{к} \cdot k_{ад}.$$

Ток генератора для точки 1

$$I = \frac{F_{ad}}{s \cdot \sin \psi}.$$

Фазное напряжение для точки 1

$$U = \frac{E_H - I \cdot (X_d \cdot \sin \psi + R_a \cdot \cos \psi)}{\cos(\psi - \varphi)}.$$

Повторяя расчет для точек 2, 3 и т.д. получим совокупность значений тока нагрузки генератора и соответствующие им значения фазного напряжения.

В режиме короткого замыкания положение точки K на кривой размагничивания (линия 1) определим, проведя прямую 5 под углом α_k . Величину магнитного потока в режиме короткого замыкания определим исходя из точки K на линии 3. МДС F_{ad} при коротком замыкании равна F_k . Угол ψ при коротком замыкании определим из выражения

$$\psi_k = \arctg \frac{X_q}{R_a}.$$

Зная $F_{ad} = F_k$, ψ_k и s можно определить ток короткого замыкания генератора.

В АО "СКБ Укрэлектромаш" спроектирован и изготовлен по заказу завода ХТЗ опытная партия автотракторных генераторов с комбинированным возбуждением мощностью 1 кВт, напряжением 14...28 В, частотой вращения 4500±500 об/мин с током нагрузки 72...36 А. Постоянные магниты крепятся на клею в пазах ротора с последующей заливкой ротора алюминием.

В настоящее время по разработанным методикам проектируется генератор мощностью 1,5 кВт, напряжением 14...28 В, частотой вращения 5000±500 об/мин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петренко А.Н. и др. Анализ конструктивных исполнений автотракторных генераторов // Вестник НТУ ХПИ, №17, 2001.
- [2] Петренко А.Н. Методика расчета геометрии и параметров активной зоны одноименнополюсных индукторных автотракторных генераторов // Вестник НТУ ХПИ, №5, 2005.

Поступила 20.09.2005