

УДК 621.313.32.018  
ББК 31.261.621  
М 54

**Кашин Яков Михайлович**

*Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета, профессор кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков им. А.К. Серова, Краснодар, e-mail: jlms@mail.ru*

**Князев Алексей Сергеевич**

*Кандидат технических наук, начальник группы обслуживания авиационной эскадрильи, Липецк, e-mail: knyazev.aleksei.87@gmail.com*

**Копелевич Лев Ефимович**

*Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, e-mail: kkllev@mail.ru*

**Самородов Александр Валерьевич**

*Кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, e-mail: alex.samorodoff@gmail.com*

**Кашин Александр Яковлевич**

*Помощник командира корабля (на самолетах АН-26), Знаменск, e-mail: jlms\_1@mail.ru*

**Методика расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для гибридных энергетических комплексов и ее реализация\***

*(Рецензирована)*

*Аннотация. Представлена разработанная авторами методика расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники генератора с возбуждением от постоянных магнитов конической конструкции и выполнен расчет разработанного авторами генератора для работы в составе гибридного энергетического комплекса*

*Ключевые слова: генератор, статор, ротор, лобовая часть обмотки, якорь, сопротивление фазы, проводимость.*

**Kashin Yakov Mikhaylovich**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State University of Technology, Professor of the Department of Aviation Radioelectronic Equipment, Krasnodar Air Force Institute for Pilots named after A.K. Serov, Krasnodar, e-mail: jlms@mail.ru*

**Knyazev Aleksey Sergeevich**

*Candidate of Technical Sciences, Head of Group of Aviation Squadron Service, Lipetsk, e-mail: knyazev.aleksei.87@gmail.com*

**Kopelevich Lev Efimovich**

*Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State University of Technology, Krasnodar, e-mail: kkllev@mail.ru*

**Samorodov Aleksandr Valeryevich**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State University of Technology, Krasnodar, e-mail: alex.samorodoff@gmail.com*

**Kashin Aleksandr Yakovlevich**

*Air Officer Assistant (on the Antonov AN-26), Znamensk, e-mail: jlms\_1@mail.ru*

**Method of calculating the parameters of anchor winding and winding coefficients of first harmonic of the synchronous generator with excitation from permanent magnets for hybrid power complexes and its implementation**

*Abstract. The paper presents the authors' method of calculating the parameters of anchor winding and winding coefficients of first harmonic of the generator with excitation from constant magnets of conic construction. The calculation of the generator developed by the authors for work as a part of a hybrid power complex is performed.*

*Keywords: generator, stator, rotor, front part of a winding, anchor, phase resistance, conductivity.*

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-48-230009 p\_a.

В энергодефицитных районах, к которым относится, например, Краснодарский край, являющийся к тому же курортным, целесообразно развивать альтернативную энергетику. Это позволит как увеличить генерацию электроэнергии, так и обеспечить экологическую чистоту региона, природные и метеорологические условия которого благоприятствуют решению этой задачи. Решить такую задачу возможно посредством гибридного энергетического комплекса (ГЭК), разрабатываемого авторами в рамках научного проекта.

В статье [1] показано, что эффективность ГЭК зависит от эффективности входящих в его состав преобразователей энергии. В свою очередь эффективность этих преобразователей зависит от точности расчета их параметров. Методика расчета основных параметров входящего в состав ГЭК конического синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГ с ПМ), разработанного авторами [2], и других синхронных генераторов аналогичной конструкции [3, 4], и позволяющего минимизировать требуемую минимальную продольную составляющую скорости ветра для эффективной работы ГЭК, в которой учено изменение формы магнитной системы генератора, представлена в [1].

Однако полной методики расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники СГ с ПМ конической конструкции ввиду его новизны нет. Авторами проанализированы методики расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники генераторов радиального и аксиального конструктивного исполнения и разработана методика проектирования синхронных электрических машин (ЭМ) различного конструктивного исполнения с возбуждением от постоянных магнитов [5]. На основании этой методики разработана методика расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники конических СГ с ПМ и выполнен расчет этих параметров для многофазного ветрогенератора переменного тока конической конструкции [2] для ГЭК, которые представлены в настоящей работе.

При разработке методики расчета и расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники конического СГ с ПМ – многофазного ветрогенератора переменного тока [2] – в настоящей работе использована методика определения вылета лобовых частей обмотки якоря [5, с. 100–102], а также ряд формул, разработанных авторами при исследовании синхронных генераторов различной конструкции [6–13]. Достоверность этой методики проверена с использованием трехмерного моделирования в программе «Ansys Maxwell 16».

Для расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники конического СГ с ПМ для ГЭК выбраны следующие исходные данные:

1. Номинальная мощность  $P_{ном}=15000$  Вт.
2. Номинальное фазное напряжение  $U_{\phi}=115$  В.
3. Число фаз  $m=3$ .
4. Номинальная частота вращения  $n=4000$  об/мин.
5. Частота  $f=400$  Гц.
6. Коэффициент мощности при номинальной нагрузке  $\cos\varphi=0,84$ .
7. Предварительное значение линейной нагрузки  $A_{ЛП}=28000$  А/м.
8. Предварительное значение индукции в зазоре  $B_{\delta np}=0,8$  Тл.
9. Относительная ЭДС  $E_{отн}=(1,05\dots 1,25)$  – меньшее значение при большей мощности. Выберем  $E_{отн}=1,10$ .
10. Коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_k=(0,8\dots 0,9)$ . Выберем  $\alpha_k=0,85$ .
11. Остаточное значение магнитной индукции ПМ  $B_r=(1,1\dots 1,25)$ , Тл. Выберем  $B_r=1,15$  Тл.
12. Коэрцитивная сила ПМ  $H_C=(840000\dots 900000)$ , А/м. Выберем  $H_C=880000$ .
13. Коэффициент перегрузки по току  $k_{кз}=(2\dots 3)$ . Выберем  $k_{кз}=2$ .
14. Угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора (Я)  $\alpha=135^\circ$ .

Выбор величины этого параметра сделан на основе разработанного алгоритма выбора массогабаритных показателей ЭМ с ПМ на этапе проектирования, описанного в [5].

Производим расчет параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники конического СГ с ПМ [2, 6].

1. Относительный шаг обмотки:

$$y_{\text{отн}} = (0,66 \dots 1,0). \quad (1)$$

Выбираем  $y_{\text{отн}} = 0,8$ .

2. Выбираем минимально допустимый зазор между лобовыми частями соседних витков обмотки якоря, м:

$$\Delta_{\text{мин доп}} \geq 0,0015. \quad (2)$$

Выбираем  $\Delta_{\text{мин доп}} = 0,0025$ .

3. Число пазов на полюсном делении:

$$\tau_Z = \frac{Z}{2 \cdot p} \quad (3)$$

$$\tau_Z = \frac{45}{2 \cdot 6} = 3,75.$$

4. Шаг секции по пазам:

$$y_Z = y_{\text{отн}} \cdot \tau_Z \quad (4)$$

$y_Z$  округляется до ближайшего целого числа:  $y_Z = 0,8 \cdot 3,75 = 3$ .

5. Уточненный относительный шаг обмотки:

$$y_{\text{отн УТ}} = \frac{y_Z}{\tau_Z} \quad (5)$$

$$y_{\text{отн УТ}} = \frac{3}{3,75} = 0,8.$$

6. Высота изолированных проводников в одном слое обмотки, м:

$$h_{\text{ИЗ}} = \frac{b_{\text{из\_эл\_пров}} \cdot N_{\text{ИП}}}{2} \quad (6)$$

$$h_{\text{ИЗ}} = \frac{0,00239 \cdot 2}{2} = 0,0024.$$

7. Методика определения вылета лобовых частей обмотки якоря (рис. 1–3) разработана авторами и подробно изложена в [5, с. 100–102]. В настоящей работе она использована в составе общей методики расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники и реализуется для СГ с ПМ [2] для ГЭК.

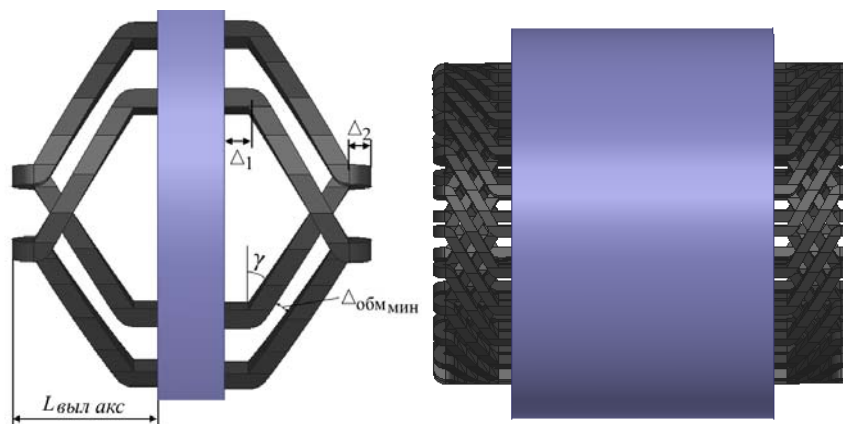


Рис. 1. К расчету лобовой части обмотки якоря синхронного генератора радиального исполнения ( $\alpha=0^\circ$  или  $\alpha=180^\circ$ )

Для рассматриваемого случая СГ с ПМ конического исполнения при  $\alpha=135^\circ$  используем рисунок 2.

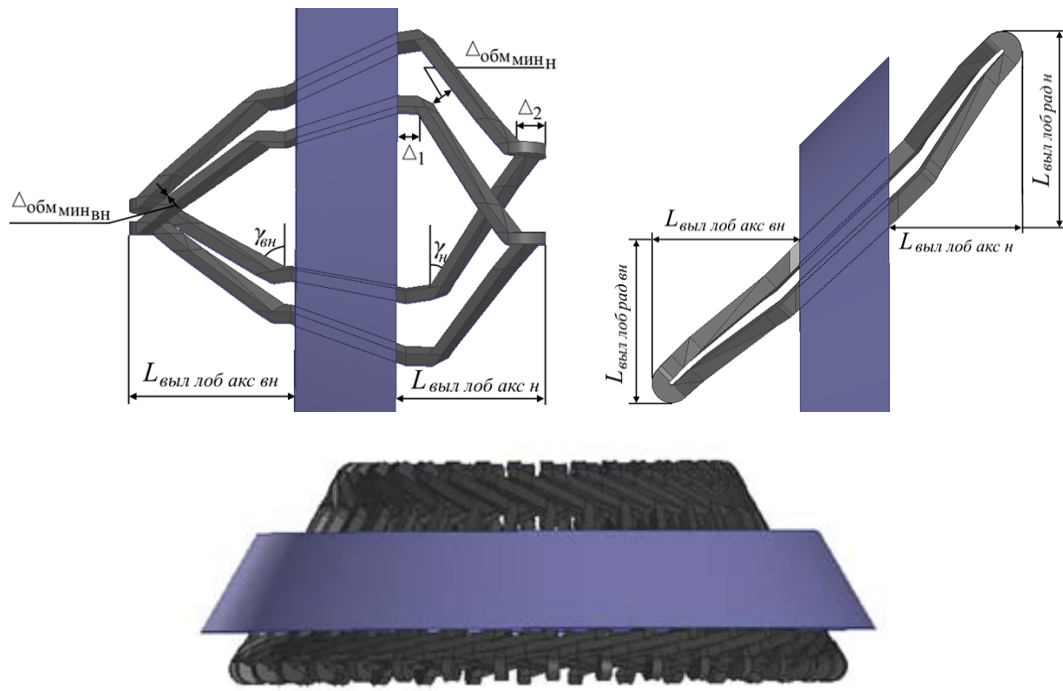


Рис. 2. К расчету лобовой части обмотки якоря синхронного генератора конического исполнения ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  или  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ )

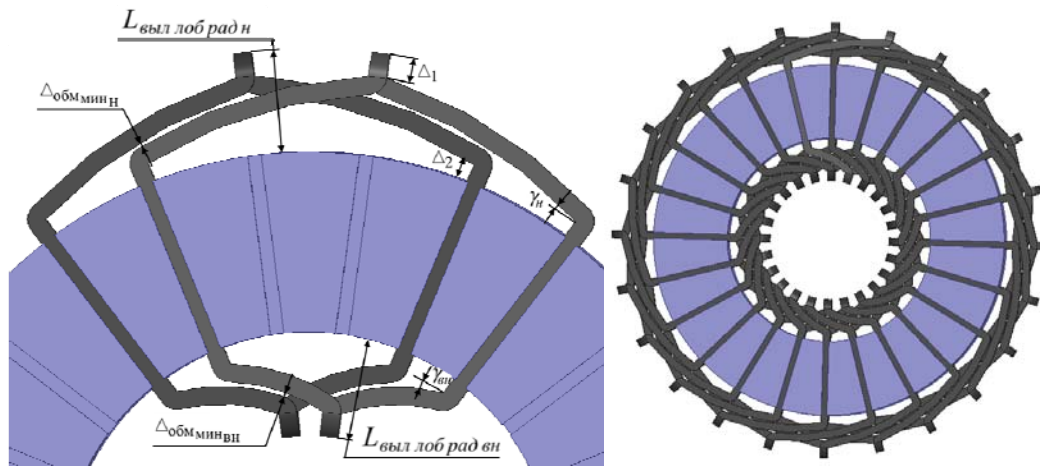


Рис. 3. К расчету лобовой части обмотки якоря синхронного генератора аксиального исполнения ( $\alpha=90^\circ$ )

7.1. Вылет прямого участка обмотки из магнитопровода, м:

$$\Delta_1 = (0,001 \dots 0,003). \quad (7)$$

Выберем  $\Delta_1 = 0,001$ .

7.2. Длина прямого участка соединения проводников, м:

$$\Delta_2 = 1,5 \cdot b_{из\_эл\_пров}. \quad (8)$$

$$\Delta_2 = 1,5 \cdot 0,00239 = 0,0036.$$

7.3. Угол между проводником секции и торцевой стороной магнитопровода якоря на меньшем диаметре, град.:

$$\gamma_{вн} = \arcsin\left(\frac{\Delta_{мин\ доп}}{b_{Z_{вн}} + b_{П_{ут}}}\right). \quad (9)$$

$$\gamma_{вн} = \arcsin\left(\frac{0,0025}{0,0043 + 0,00554}\right) = 22,9.$$

7.4. Угол между проводником секции и торцевой стороной магнитопровода якоря на большем диаметре, град:

$$\gamma_n = \arcsin\left(\frac{\Delta_{\text{мин доп}}}{b_{Z_H} + b_{П.ум}}\right). \quad (10)$$

$$\gamma_n = \arcsin\left(\frac{0,0025}{0,00817 + 0,00554}\right) = 17,2.$$

*Примечание.* Для радиального исполнения  $\gamma_{\text{вн}} = \gamma_n = \gamma$ .

7.5. Длина лобовой части секции  $L_{\text{лобВН}}$  на меньшем диаметре  $D_{\text{ВН}}$ , м:

$$L_{\text{лобВН}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \frac{0,5 \cdot y_Z \cdot (b_{Z_{\text{ВН}}} + b_{П.ум})}{\cos(\gamma_{\text{вн}})} + \pi \cdot a_{\text{из-эл-пров}} \cdot N_{b_{П.ум}} \cdot \frac{0,5 \cdot \pi - \frac{\gamma_{\text{вн}} \cdot \pi}{180}}{2 \cdot \pi} + \frac{\pi \cdot h_{\text{ИЗ}}}{4} + 2 \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

$$L_{\text{лобВН}} = 0,001 + 0,0036 + \frac{0,5 \cdot 3 \cdot (0,0043 + 0,00554)}{\cos(22,92)} + 3,1415 \cdot 0,00121 \cdot 4 \cdot \frac{0,5 \cdot 3 \cdot 1415 - \frac{22,92 \cdot 3 \cdot 1415}{180}}{2 \cdot 3,1415} + \frac{3,1415 \cdot 0,0024}{4} + 0,002 = 0,0249.$$

7.6. Длина лобовой части секции  $L_{\text{лобН}}$  на большем диаметре  $D_H$ , м:

$$L_{\text{лобН}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \frac{0,5 \cdot y_Z \cdot (b_{Z_H} + b_{П.ум})}{\cos(\gamma_n)} + \pi \cdot a_{\text{из-эл-пров}} \cdot N_{b_{П.ум}} \cdot \frac{0,5 \cdot \pi - \frac{\gamma_n \cdot \pi}{180}}{2 \cdot \pi} + \frac{\pi \cdot h_{\text{ИЗ}}}{4} + 2 \cdot 10^{-3}. \quad (12)$$

$$L_{\text{лобН}} = 0,001 + 0,0036 + \frac{0,5 \cdot 3 \cdot (0,00817 + 0,00554)}{\cos(17,2)} + 3,1415 \cdot 0,00121 \cdot 4 \cdot \frac{0,5 \cdot 3 \cdot 1415 - \frac{17,2 \cdot 3 \cdot 1415}{180}}{2 \cdot 3,1415} + \frac{3,1415 \cdot 0,0024}{4} + 0,002 = 0,0301.$$

*Примечание.* Для радиального исполнения  $L_{\text{лобВН}} = L_{\text{лобВН}} = L_{\text{лоб}}$ .

7.7. Длина вылета лобовой части в аксиальном направлении (вдоль оси вращения ротора) на меньшем диаметре, м:

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \cos(\alpha). \quad (13)$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = 0,0249 \cdot \cos(135) = 0,0193.$$

7.8. Длина вылета лобовой части в аксиальном направлении (вдоль оси вращения ротора) на большем диаметре, м:

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{лобН}} \cdot \cos(\alpha). \quad (14)$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{АКС}}} = 0,0301 \cdot \cos(135) = 0,0230.$$

*Примечание.* Для радиального исполнения  $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лоб}}_{\text{АКС}}}$ , для аксиального исполнения  $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{АКС}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{АКС}}} = 0$ .

7.9. Длина вылета лобовой части в радиальном направлении на меньшем диаметре, м:

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{лобВН}} \cdot \sin(\alpha). \quad (15)$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = 0,0249 \cdot \sin(135) = 0,0161.$$

7.10. Длина вылета лобовой части в радиальном направлении на большем диаметре, м:

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{лобН}} \cdot \sin(\alpha). \quad (16)$$

$$L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{РАД}}} = 0,0301 \cdot \sin(135) = 0,0193.$$

*Примечание.* Для радиального исполнения  $L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобВН}}_{\text{РАД}}} = L_{\text{ВЫЛ}_{\text{лобН}}_{\text{РАД}}} = 0$ .

7.11. Минимальный зазор между лобовыми частями проводников соседних секций на меньшем диаметре, м:

$$\Delta_{обм_{минВН}} = \left( \frac{\pi \cdot (D_{ВН} - 0,5 \cdot L_{лобВН} \cdot \sin(\alpha))}{Z} - b_{из\_эл\_пров} \right) \cdot \sin(\gamma_{вн}). \quad (17)$$

$$\Delta_{обм_{минВН}} = \left( \frac{3,1415 \cdot (0,1421 - 0,5 \cdot 0,0249 \cdot \sin(135))}{45} - 0,00239 \right) \cdot \sin(22,9^{\circ}) = 0,0025.$$

7.12. Минимальный зазор между лобовыми частями проводников соседних секций на большем диаметре, м:

$$\Delta_{обм_{минН}} = \left( \frac{\pi \cdot (D_{Н} - 0,5 \cdot L_{лобН} \cdot \sin(\alpha))}{Z} - b_{из\_эл\_пров} \right) \cdot \sin(\gamma_{н}). \quad (18)$$

$$\Delta_{обм_{минН}} = \left( \frac{3,1415 \cdot (0,1964 - 0,5 \cdot 0,0301 \cdot \sin(135^{\circ}))}{45} - 0,00239 \right) \cdot \sin(17,2^{\circ}) = 0,0025.$$

*Примечание.* Для радиального исполнения  $\Delta_{обм_{минВН}} = \Delta_{обм_{минН}} = \Delta_{обм_{мин}}$ .

Если  $\Delta_{обм_{минВН}} < \Delta_{мин_{доп}}$ , то  $\gamma_{вн}$  необходимо увеличить на 1 градус (учитывая, что  $\gamma_{вн}$  не может быть больше 90 градусов) и пересчитать зазор  $\Delta_{обм_{минВН}}$ .

Если  $\Delta_{обм_{минН}} < \Delta_{мин_{доп}}$ , то  $\gamma_{н}$  необходимо увеличить на 1 градус (учитывая, что  $\gamma_{н}$  не может быть больше 90 градусов) и пересчитать зазор  $\Delta_{обм_{минН}}$ .

Если при достижении равенства  $\gamma_{вн} = 90^{\circ}$  или  $\gamma_{н} = 90^{\circ}$  хотя бы одно из условий

$$\begin{cases} \Delta_{обм_{минВН}} \geq \Delta_{мин_{доп}}, \\ \Delta_{обм_{минН}} \geq \Delta_{мин_{доп}} \end{cases} \quad (19)$$

не соблюдается, то это означает, что расстояние между лобовыми частями обмотки будет меньше допустимого (проводники соседних секций будут соприкасаться). В этом случае необходимо уменьшить конструктивный коэффициент  $\lambda_{ПП}$  или число пазов на полюс и фазу  $q$  и повторить расчет.

8. Средняя длина витка секции, м:

$$l_{Вср} = 2 \cdot l_{акт_{УТ}} + L_{лобВН} + L_{лобН}. \quad (20)$$

$$l_{Вср} = 2 \cdot 0,0446 + 0,0499 + 0,0601 = 0,1993.$$

9. Активное сопротивление фазы (при температуре 20°C), Ом:

$$R_{ЯК} = \frac{w_{\phi_{УТ}} \cdot l_{Вср}}{57 \cdot q_{ЯК_{эл\_пров.ут}} \cdot a_1 \cdot n_1 \cdot n_2}. \quad (21)$$

$$R_{ЯК} = \frac{60 \cdot 0,1993}{57 \cdot 2,37 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 0,0883.$$

10. Рабочая температура обмотки, °C:

$$t_{раб} = (80 \dots 220)^{\circ}C. \quad (22)$$

Выберем  $t_{раб} = 120$ .

11. Активное сопротивление фазы при рабочей температуре, Ом:

$$R_{ЯК_{t_{раб}}} = R_{ЯК} \cdot (1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{раб} - 20)). \quad (23)$$

$$R_{ЯК_{t_{раб}}} = 0,0883 \cdot (1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)) = 0,1219.$$

12. Относительное значение активного сопротивления фазы:

$$R_{ЯК\ отн} = \frac{R_{ЯК\ раб} \cdot I_{ном}}{U_{\phi}}. \quad (24)$$

$$R_{ЯК\ отн} = \frac{0,1219 \cdot 41,67}{120} = 0,0423.$$

13. Проводимость рассеяния паза:

$$\Lambda_{II} = \frac{(N_{hII} \cdot b_{из\_эл\_пров} + 0,00025) \cdot (7 + 9 \cdot y_{отн\ УТ})}{48 \cdot b_{II\ ут}} + \left( \frac{0,00025}{b_{II\ ут}} + \frac{3 \cdot h_{кл}}{b_{II\ ут} + 2 \cdot b_{ц}} + \frac{h_{yc}}{b_{ц}} \right) \times \frac{1 + 3 \cdot y_{отн\ УТ}}{4}. \quad (25)$$

$$\Lambda_{II} = \frac{(2 \cdot 0,00239 + 0,00025) \cdot (7 + 9 \cdot 0,8)}{48 \cdot 0,00554} + \left( \frac{0,00025}{0,00554} + \frac{3 \cdot 0,0005}{0,00554 + 2 \cdot 0,00191} + \frac{0,0007}{0,00191} \right) \times \frac{1 + 3 \cdot 0,8}{4} = 0,7547.$$

14. Проводимость рассеяния по коронкам зубцов:

$$\Lambda_{Kz} = \frac{\alpha_k}{\frac{b_{ц}}{\delta} + 0,8}. \quad (26)$$

$$\Lambda_{Kz} = \frac{0,85}{\frac{0,00191}{0,00055} + 0,8} = 0,1449.$$

15. Коэффициент проводимости обмотки:

$k = 0,334$  для трехфазной двухслойной обмотки.

16. Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки:

$$\Lambda_{ЛОБ} = k \cdot \left( \frac{L_{лоб\ вн} + L_{лоб\ н}}{2} - 0,64 \cdot y_{отн\ УТ} \cdot \tau \right) \cdot \frac{q}{l_{акт\ УТ}}. \quad (27)$$

$$\Lambda_{ЛОБ} = 0,334 \cdot \left( \frac{0,0499 + 0,0601}{2} - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,0442 \right) \cdot \frac{1,25}{0,0446} = 0,3031.$$

17. Суммарная проводимость рассеяния обмотки якоря:

$$\Lambda_{S_{ОБМ\_ЯК}} = \Lambda_{II} + \Lambda_{Kz} + \Lambda_{ЛОБ}. \quad (28)$$

$$\Lambda_{S_{ОБМ\_ЯК}} = 0,7547 + 0,1449 + 0,3031 = 1,2027.$$

18. Индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря, Ом:

$$X_S = 63 \cdot \left( \frac{w_{\phi\ УТ}}{100} \right)^2 \cdot \frac{f}{400} \cdot \frac{l_{акт\ УТ}}{p \cdot q} \cdot \Lambda_{S_{ОБМ\_ЯК}}. \quad (29)$$

$$X_S = 63 \cdot \left( \frac{60}{100} \right)^2 \cdot \frac{400}{400} \cdot \frac{0,0446}{6 \cdot 1,25} \cdot 1,2027 = 0,1623.$$

19. Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки якоря:

$$X_{S\ отн} = \frac{X_S \cdot I_{ном}}{U_{\phi}}. \quad (30)$$

$$X_{S\ отн} = \frac{0,1623 \cdot 41,67}{120} = 0,0564.$$

20. Относительное значение ЭДС при нагрузке (уточненное):

$$E_{OТН_{VT}} = \sqrt{(\cos(\varphi) + R_{ЯК_{OТН}})^2 + (\sin(\varphi) + X_{S_{OТН}})^2}. \quad (31)$$

$$\cos(\varphi) = 0,8 \text{ (из исходных данных)}, \quad \sin(\varphi) = \sqrt{1 - \cos^2(\varphi)} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6.$$

$$E_{OТН_{VT}} = \sqrt{(0,8 + 0,0423)^2 + (0,6 + 0,0564)^2} = 1,07.$$

Если уточненное значение  $E_{OТН_{VT}}$  отличается от принятого в начале расчета  $E_{OТН}$  больше, чем на 5%, то значение конструктивного коэффициента  $\lambda_{ЛР}$  необходимо скорректировать при неизменном диаметре эталонной окружности  $D_{эт\_окр}$  и повторить расчет сначала, то есть должно выполняться условие  $\left| \frac{E_{OТН} - E_{OТН_{VT}}}{E_{OТН}} \right| \leq 0,05$ .

В рассматриваемом случае

$$\left| \frac{E_{OТН} - E_{OТН_{VT}}}{E_{OТН}} \right| = \left| \frac{1,10 - 1,07}{1,10} \right| = 0,027,$$

условие  $\left| \frac{E_{OТН} - E_{OТН_{VT}}}{E_{OТН}} \right| \leq 0,05$  выполняется, поэтому продолжаем расчет.

21. Коэффициент распределения обмотки (для трехфазной двухслойной обмотки):

$$k_p = \frac{1}{2 \cdot q' \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q'}\right)}. \quad (32)$$

где  $q'$  – числитель неправильной дроби: при  $q = a + \frac{b}{c}$  имеем  $q' = ac + b$ .

В рассматриваемом случае  $q = 1 + \frac{1}{4} = \frac{5}{4}$ , поэтому  $q' = 5$ .

$$k_p = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot \sin\left(\frac{3,1415}{6 \cdot 5}\right)} = 0,9511.$$

22. Коэффициент укорочения обмотки:

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{омн_{VT}} \cdot \pi}{2}\right). \quad (33)$$

$$k_y = \sin\left(\frac{0,8 \cdot 3,1415}{2}\right) = 0,9619.$$

23. Скос пазов в долях зубцового деления:

$$k_{СК_Z} = (0,5 \dots 1) \quad (34)$$

Выберем  $k_{СК_Z} = 1$ .

24. Скос пазов по дуге окружности якоря, м:

$$k_{СК_{ОКР}} = k_{СК_Z} \cdot t_{ZCP}. \quad (35)$$

$$k_{СК_{ОКР}} = 1 \cdot 0,0118 = 0,0118.$$

25. Коэффициент скоса пазов:

$$k_{СК_{П}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_{СК_{ОКР}}}{\tau}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_{СК_{ОКР}}}{\tau}}. \quad (36)$$



$$k_{CKII} = \frac{\sin\left(\frac{3,1415 \cdot 0,0118}{2 \cdot 0,0442}\right)}{\frac{3,1415 \cdot 0,0118}{2 \cdot 0,0442}} = 0,9711.$$

26. Обмоточный коэффициент основной гармоники:

$$k_{0_{VT}} = k_p \cdot k_y \cdot k_{CKII}. \quad (37)$$

$$k_{0_{VT}} = 0,9511 \cdot 0,9619 \cdot 0,9711 = 0,89.$$

Если полученное значение  $k_{0_{VT}}$  отличается от принятого в начале расчета больше, чем на 5%, то значение конструктивного коэффициента  $\lambda_{ПР}$  необходимо скорректировать при неизменном диаметре эталонной окружности  $D_{эт\_окр}$  и повторить расчет сначала, то

есть должно выполняться условие  $\left| \frac{k_{0_{ПР}} - k_{0_{VT}}}{k_{0_{ПР}}} \right| \leq 0,05$ .

В рассматриваемом случае

$$\left| \frac{k_{0_{ПР}} - k_{0_{VT}}}{k_{0_{ПР}}} \right| = \left| \frac{0,92 - 0,89}{0,92} \right| = 0,032,$$

условие  $\left| \frac{k_{0_{ПР}} - k_{0_{VT}}}{k_{0_{ПР}}} \right| \leq 0,05$  выполняется, поэтому расчет параметров обмотки якоря и обмо-

точных коэффициентов основной гармоники завершен. Можно переходить к расчету магнитной цепи индуктора, методика которого будет показана в последующих публикациях.

**Вывод:** Разработанная на основании совокупности известных методов и формул, используемых при расчете синхронных ЭМ с ПМ радиальной и аксиальной конструкции, методика расчета параметров обмотки якоря и обмоточных коэффициентов основной гармоники синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов и выведенных авторами формул расчета этих параметров для ЭМ с ПМ различного конструктивного исполнения позволяет осуществить расчет параметров синхронных ЭМ с ПМ не только радиальной и аксиальной, но и конической конструкции.

Это подтверждается результатами расчета по представленной методике и исследований многофазного ветрогенератора переменного тока [2], являющегося синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов, используемым для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию в гибридных энергетических комплексах.

#### Примечания:

1. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2017. Вып. 1 (196). С. 95–106. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
2. Многофазный ветрогенератор переменного тока: патент на изобретение RUS 2658316, 07.07.2017 / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев. Краснодар, 2017.
3. Стабилизированный вентильный аксиально-радиальный ветрогенератор постоянного тока: патент на изобретение RUS 2689211, 22.03.2018 / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов. Краснодар, 2018.
4. Стабилизированный вентильный аксиально-

#### References:

1. Methodology for the calculation of synchronous electric machines with excitation from permanent magnets for wind-solar energy sources / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 1 (196). P. 95–106. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
2. Multiphase AC wind generator: Patent for Invention RUS 2658316, 07.07.2017 / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev. Krasnodar, 2017.
3. Stabilized DC axial-radial direct-current valve wind generator: patent for Invention RUS 2689211, 22.03.2018 / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Voynov. Krasnodar, 2018.
4. Stabilized DC axial-conical direct-current valve wind

- конический ветрогенератор постоянного тока: патент на изобретение RUS 26889251, 22.03.2018 / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов. Краснодар, 2018.
5. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2017. Вып. 1 (196). С. 95–106. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  6. Состояние и перспективы развития авиационных ветроэнергетических комплексов для аварийных систем электроснабжения воздушных судов / Я.М. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, К.З. Артеян // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2019. Вып. 1 (236). С. 93–102. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  7. Князев А.С. Эквивалентное преобразование электрических машин с коническим ротором // Технические и технологические системы «ТТС-15»: материалы VII междунар. науч. конф. / под общ. ред. Б.Х. Гайтова. Краснодар: Издательский дом – Юг, 2015. С. 127–132.
  8. Кашин А.Я., Князев А.С. Радиальные и аксиальные электрические машины как частный случай электрических машин с коническим ротором. Основные определения // Технические и технологические системы «ТТС-15»: материалы VII Междунар. науч. конф. / под общ. ред. Б.Х. Гайтова. Краснодар: Издательский дом – Юг, 2015. С. 121–127.
  9. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С. Универсальные главные размеры электрических машин // Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР», 16–17 февраля 2017 г. Воронеж, 2017. С. 34–41.
  10. Исследование зависимости мощности синхронных электрических машин от главных размеров и частоты вращения ротора / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Ракло // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2016. Вып. 3 (186). С. 99–108. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  11. Сквозное проектирование синхронных электрических машин с постоянными магнитами / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Ракло // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2016. Вып. 3 (186). С. 114–121. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  12. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С. Эквивалентные электрические машины. Исследование эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с постоянными магнитами // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 1. С. 3–12.
  13. Массогабаритная оптимизация эквивалентных синхронных электрических машин / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. 2017. Вып. 1 (196). С. 129–143. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  - generator: Patent for Invention RUS 2688925, 22.03.2018 / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Voynov. Krasnodar, 2018.
  5. Methodology for the calculation of synchronous electric machines with excitation from permanent magnets for wind-solar energy sources / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 1 (196). P. 95–106. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  6. The state and prospects of development of aviation wind power complexes for emergency systems for aircraft power supply / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov, K.Z. Artinian // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2016. Iss. 1 (236). P. 93–102. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  7. Knyazev A.S. Equivalent transformation of electric machines with conical rotor / Technical and technological systems “TTS-15”: materials of the 7<sup>th</sup> International scient. conf. / general ed. by B.Kh. Gaytov. Krasnodar: Publishing House – Yug, 2015. P. 127–132.
  8. Kashin A.Ya., Knyazev A.S. The radial and axial electric machine as a particular case of electrical machines with a conical rotor. Basic definitions // Technical and technological systems “TTS-15”: materials of the 7<sup>th</sup> International scient. conf. / general ed. by B.Kh. Gaytov. Krasnodar: Publishing House – Yug, 2015. P. 121–127.
  9. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. Universal main dimensions of electric machines // Collection of Scientific Articles on the Materials of the 4<sup>th</sup> Russian Scientific-Practical conference “AVIATOR”, February 16–17, 2017. Voronezh, 2017. P. 34–41.
  10. Research on dependence of capacity of synchronous electric machines on the main sizes and frequency of the rotor rotation / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Raklo // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2016. Iss. 3 (186). P. 99–108. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  11. Through designing synchronous electric machines with permanent magnets / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Raklo // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2016. Iss. 3 (186). P. 114–121. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
  12. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. Equivalent electrical machines. Study of equivalent radial and axial synchronous generators with permanent magnets // News of Institutions of Higher Education of Chernozemye. 2016. No. 1. P. 3–12.
  13. Optimization of weight and dimensions of the equivalent synchronous electrical machines / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 1 (196). P. 129–143. URL: <http://vestnik.adygnet.ru>