

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

## TECHNICAL SCIENCES

УДК 621.313

ББК 31.261

И 85

### **Кашин Я.М.**

*Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета, Краснодар, e-mail: jlms@mail.ru*

### **Кашин А.Я.**

*Слушатель Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков им. А.К. Серова, Краснодар, e-mail: jlms\_1@mail.ru*

### **Князев А.С.**

*Инженер группы обслуживания авиационной эскадрильи, Липецк, e-mail: knyazev.aleksei.87@gmail.com*

### **Ракло А.В.**

*Кандидат технических наук, зам. начальника кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков им. А.К. Серова, Краснодар, e-mail: mawritanec@yandex.ru*

### **Исследование зависимости мощности синхронных электрических машин от главных размеров и частоты вращения ротора\***

*(Рецензирована)*

**Аннотация.** *Рассматривается вопрос выбора главных размеров электрической машины на этапе проектирования, приводятся результаты исследований влияния изменения главных размеров синхронного генератора и частоты вращения ротора на изменение его фазного напряжения и мощности.*

**Ключевые слова:** *электрическая машина, главные размеры электрической машины, мощность электрической машины, исследования в Ansys Maxwell 16.*

### **Kashin Ya.M.**

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

### **Kashin A.Ya.**

*Listener of Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after A.K. Serov, Krasnodar, e-mail: jlms\_1@mail.ru*

### **Knyazev A.S.**

*Engineer of Group of Aviation Squadron Service, Lipetsk, e-mail: knyazev.aleksei.87@gmail.com*

### **Raklo A.V.**

*Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department of Aviation and Radioelectronic Equipment, Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after A.K. Serov, Krasnodar, e-mail: mawritanec@yandex.ru*

### **Research on dependence of capacity of synchronous electric machines on the main sizes and frequency of the rotor rotation**

**Abstract.** *The paper deals with the choice of the main sizes of the electric machine at a design n stage. The work provides the results of researches on influence of change of the main sizes of the synchronous generator and frequency of the rotor rotation on change of its phase pressure and capacity.*

**Keywords:** *the electric machine, the main sizes of the electric machine, capacity of the electric machine, research in Ansys Maxwell 16.*

Габариты и мощность электрических машин (ЭМ) тесно связаны друг с другом, и при заданных параметрах могут возникнуть противоречивые условия проектирования – требуемая мощность может быть достигнута только при определенных габаритах, которые не всегда соответствуют заданным, а, с другой стороны, при заданных габаритах не всегда воз-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта 16-48-230500 «р\_а».

можно достижение требуемой мощности ЭМ. Поэтому при расчете ЭМ необходимо искать наиболее оптимальные значения размеров ЭМ. Основными размерами цилиндрических ЭМ являются активная длина  $l$  и диаметр расточки якоря  $D$ , которые могут иметь различное соотношение, как показано на рисунке 1.

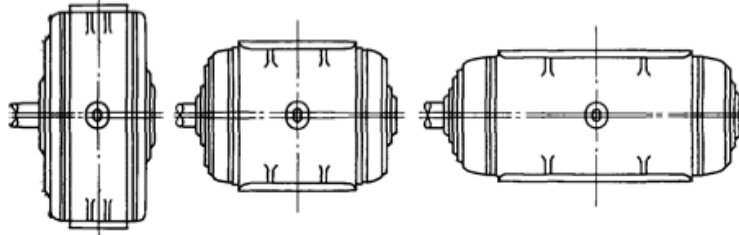


Рис. 1. Цилиндрические ЭМ с разным соотношением  $\frac{l}{D}$

Для определения основных размеров ЭМ при проектировании, как правило, руководствуются рекомендациями по выбору оптимальных значений соотношения  $\lambda = \frac{l}{D}$  в зависимости от мощности ЭМ (рис. 2 [1]), числа пар полюсов (рис. 3 [2]), а также заданных габаритных размеров.

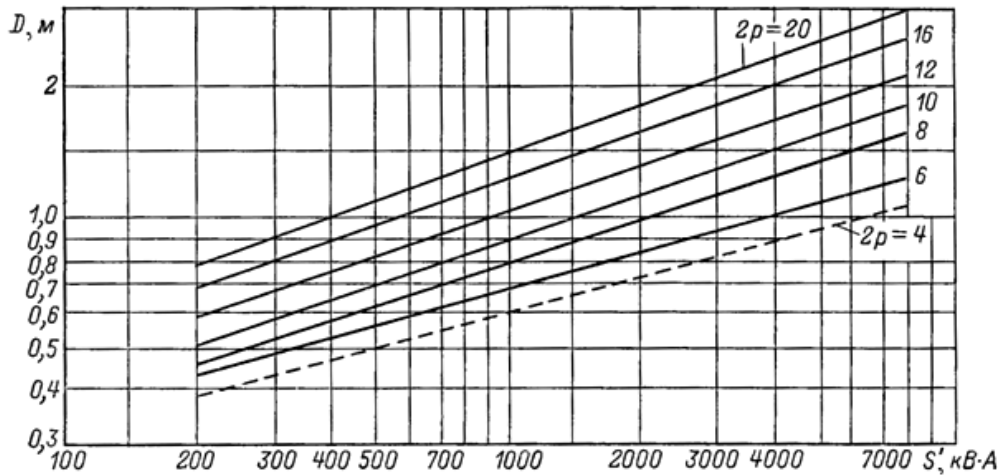


Рис. 2. К определению диаметра  $D$  в зависимости от расчетной мощности  $S'$

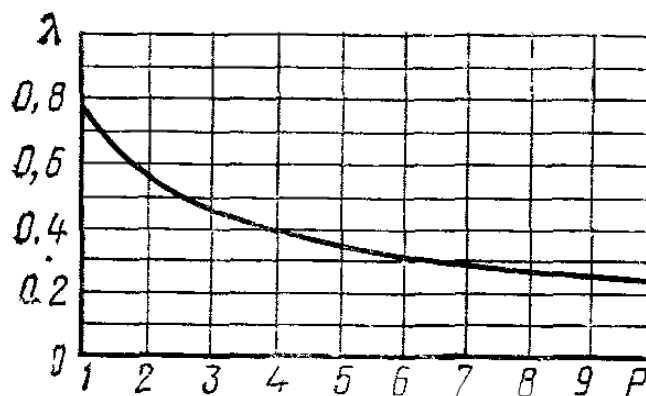


Рис. 3. К определению соотношения  $\lambda = \frac{l}{D}$  в зависимости от числа пар полюсов  $p$

Однако нет четкого представления о том, каким образом выбор того или иного значения величин  $l$  и  $D$ , а так же их соотношения  $\frac{l}{D}$  повлияет на выходные характеристики ЭМ, как, к примеру, изменится напряжение на выходе генератора, если при фиксированной величине  $D$  уменьшить активную длину до такого значения, когда соотношение  $\frac{l}{D}$  уже не будет являться оптимальным.

Методики проектирования цилиндрических ЭМ весьма сложны, громоздки и содержат достаточно большое количество параметров, значение которых следует выбирать из рекомендуемого диапазона на основании данных, накопленных за долгие годы проектирования подобных ЭМ (синхронных, асинхронных и т.д.). Ниже будут рассмотрены только синхронные генераторы, для которых, в частности, чисто аналитически невозможно определить зависимость выходного напряжения от изменения активной длины  $l$ , диаметра расточки якоря  $D$  или их соотношения  $\lambda = \frac{l}{D}$ .

Для установления этой зависимости были проведены исследования методом компьютерного моделирования с использованием программы Ansys Maxwell 16, которая позволяет производить анализ электромагнитных устройств, в том числе вращающихся ЭМ.

Исследования проводились на моделях синхронных генераторов, внешний вид которых представлен на рисунке 4.

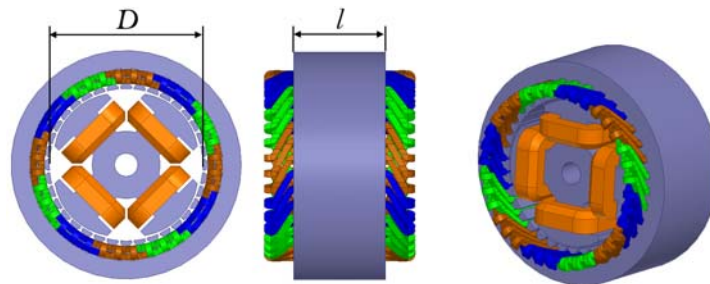


Рис. 4. Модель синхронного трехфазного генератора

Все исследованные модели были получены из одной исходной путем изменения основных размеров и параметров, которые должны пересчитываться в зависимости от основных размеров (например, при создании модели генератора с увеличенным размером диаметра  $D$  пропорционально этому изменению увеличивались ширина и высота пазов магнитопровода якоря, а также ширина и высота проводников обмотки якоря и др.).

Целью первой серии исследований было определение зависимости изменения выходного напряжения  $\Delta U_\phi$  генератора от изменения активной длины  $\Delta l$ . При этом диаметр расточки якоря  $D$  не менялся. Исследования проводились при частоте вращения  $n=12000$  об/мин, при этом ток в обмотке возбуждения составлял  $I_B=15$  А. Результаты исследований представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1

Результаты исследований серии № 1 при  $D=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$

№	1	2	3	4	5	6
$D$ , мм	60	60	60	60	60	60
$l$ , мм	21	24	27	30	33	36
$\lambda$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$U_\phi$ , В	124,1	141,8	159,6	177,3	195,0	212,8

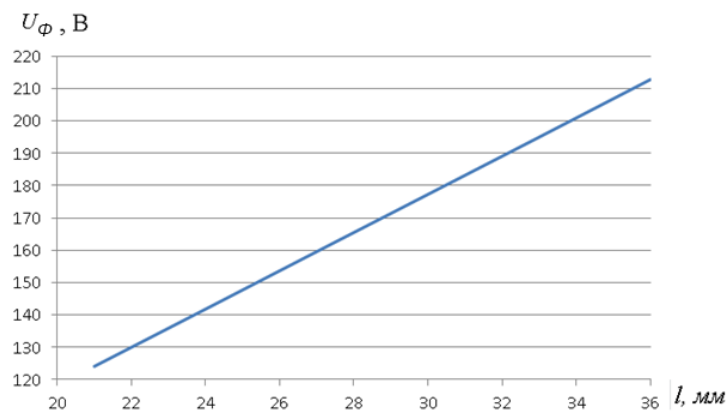


Рис. 5. График зависимости  $U_\phi(l)$  при  $D=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$

Как видно из результатов первой серии исследований, при фиксированном диаметре расточки якоря  $D$  изменение выходного напряжения  $\Delta U_\phi$  пропорционально изменению активной длины  $\Delta l$ :

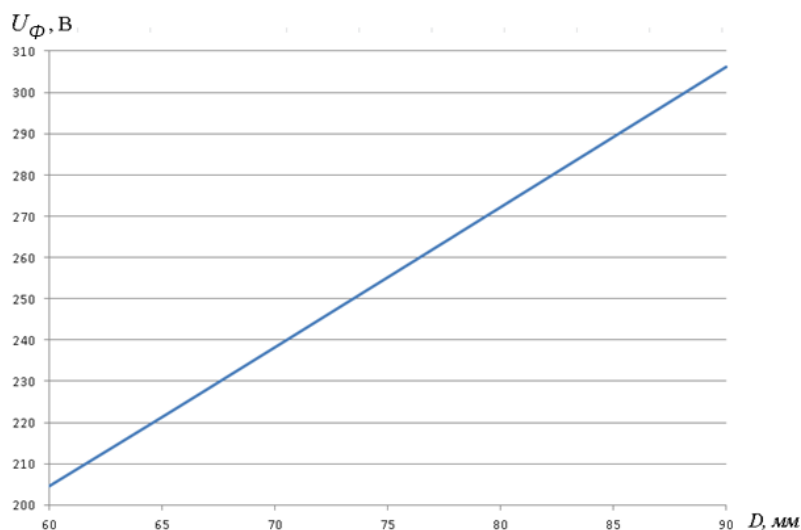
$$\text{при } D=\text{const}: \Delta U_\phi \sim \Delta l. \quad (1)$$

Целью второй серии исследований было определение зависимости изменения выходного напряжения  $\Delta U_\phi$  генератора от изменения диаметра расточки якоря  $\Delta D$  при фиксированной активной длине  $l$ . Исследования проводились при частоте вращения  $n=12000$  об/мин, при этом ток в обмотке возбуждения составлял  $I_B=15$  А. Результаты исследований представлены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2

Результаты исследований серии № 2 при  $l=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$ 

№	1	2	3	4	5	6
$\lambda$	0,58	0,53	0,46	0,44	0,40	0,39
$l$ , мм	35	35	35	35	35	35
$D$ , мм	60	66	75	79	86	90
$U_\phi$ , В	204,6	224,7	255,2	268,8	292,6	306,2

Рис. 6. График зависимости  $U_\phi(D)$  при  $l=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$ 

Как видно из результатов второй серии исследований, при фиксированной активной длине  $l$  изменение выходного напряжения  $\Delta U_\phi$  пропорционально изменению диаметра расточки якоря  $\Delta D$ :

$$\text{при } l=\text{const}: \Delta U_\phi \sim \Delta D. \quad (2)$$

Целью третьей серии исследований было определение зависимости изменения выходного напряжения  $\Delta U_\phi$  генератора от одновременного изменения диаметра расточки якоря  $\Delta D$  и активной длины  $\Delta l$ , причем при изменении значений  $D$  и  $l$  их соотношение  $\lambda = \frac{l}{D}$  в исследованных моделях было одинаковым. Исследования проводились при частоте вращения  $n=12000$  об/мин, при этом ток в обмотке возбуждения составлял  $I_B=15$  А. Результаты исследований представлены в таблице 3 и на рисунке 7.

Таблица 3

Результаты исследований серии № 2 при  $\lambda=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$ 

№	1	2	3	4	5	6
$\lambda$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$l$ , мм	21	23,1	26,25	27,65	30,1	31,5
$D$ , мм	60	66	75	79	86	90
$D^2$ , мм <sup>2</sup>	3600	4356	5625	6241	7396	8100
$U_\phi$ , В	124,1	148,2	187,2	212,8	255,3	279,6

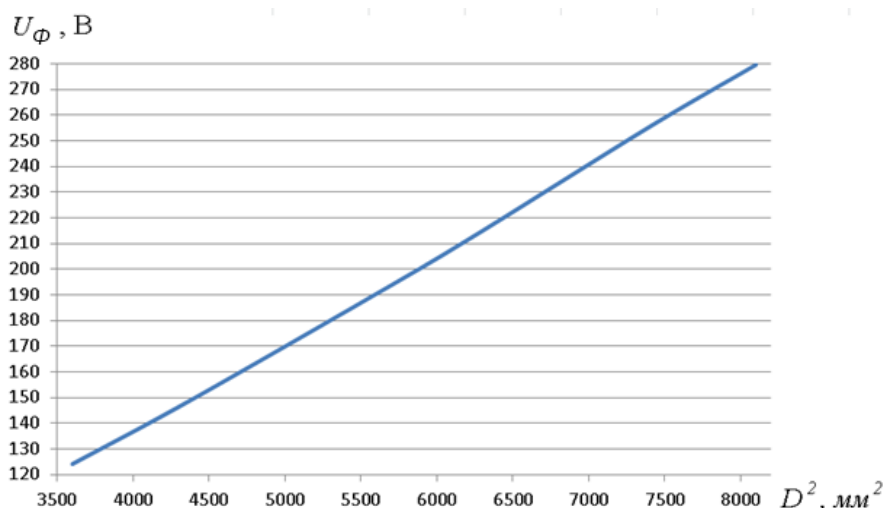


Рис. 7. График зависимости  $U_{\phi}(D^2)$  при  $\lambda=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$

Как видно из результатов третьей серии исследований, при постоянном значении соотношения  $\lambda = \frac{l}{D}$  изменение выходного напряжения  $\Delta U_{\phi}$  пропорционально изменению квадрата диаметра расточки якоря  $\Delta D^2$ :

$$\text{при } \lambda=\text{const}: \Delta U_{\phi} \sim \Delta D^2. \tag{3}$$

Целью четвертой серии исследований было определение зависимости изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\phi}$  генератора от изменения частоты вращения ротора  $\Delta n$ . Исследования проводились на одной модели генератора при токе в обмотке возбуждения, равном  $I_B=15 \text{ A}$  и  $I_B=30 \text{ A}$ . Результаты исследований представлены в таблице 4 и на рисунке 8.

Таблица 4

Результаты исследований серии № 2 при  $D=\text{const}$ ,  $l=\text{const}$

	$n=6000 \text{ об/мин}$		$n=8000 \text{ об/мин}$		$n=10000 \text{ об/мин}$		$n=12000 \text{ об/мин}$	
	$I_B=15 \text{ A}$	$I_B=30 \text{ A}$	$I_B=15 \text{ A}$	$I_B=30 \text{ A}$	$I_B=15 \text{ A}$	$I_B=30 \text{ A}$	$I_B=15 \text{ A}$	$I_B=30 \text{ A}$
$D, \text{ мм}$	78	78	78	78	78	78	78	78
$l, \text{ мм}$	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
$\lambda$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$U_{\phi}, \text{ В}$	105,0	118,2	140,0	157,6	175,0	197	209,9	236,3

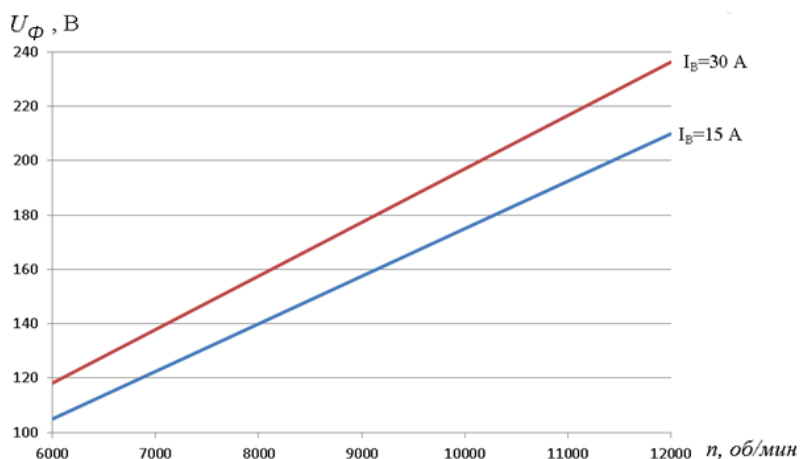


Рис. 8. График зависимости  $U_{\phi}(n)$  при  $D=\text{const}$ ,  $l=\text{const}$

Как видно из результатов четвертой серии исследований, изменение выходного напряжения  $\Delta U_{\phi}$  пропорционально изменению частоты вращения ротора:

$$\text{при } D=\text{const}, l=\text{const}: \Delta U_{\phi} \sim \Delta n. \tag{4}$$

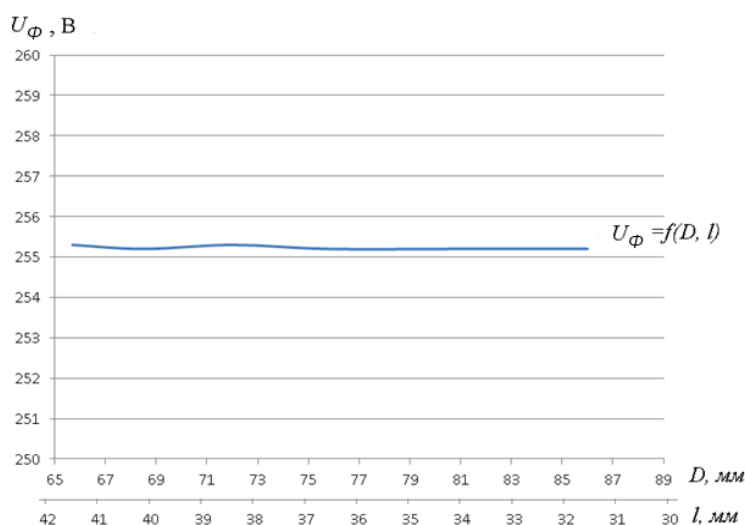
Целью пятой серии исследований было определение зависимости изменения выходного

напряжения  $U_\phi$  генератора от одновременного изменения диаметра расточки якоря  $D$  и активной длины  $l$ , причем при изменении значений  $D$  и  $l$  их произведение в исследованных моделях было одинаковым. Исследования проводились при частоте вращения  $n=12000$  об/мин, при этом ток в обмотке возбуждения составлял  $I_B=15$  А. Результаты исследований представлены в таблице 5 и на рисунке 9.

Таблица 5

Результаты исследований серии № 2 при  $(D \cdot l)=\text{const}$ ,  $n=\text{const}$

№	1	2	3	4	5	6
$\lambda$	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
$D$ , мм	65,7	68,5	72	75,8	80,5	86,0
$l$ , мм	39,4	37,7	36	34,1	32,2	30,1
$D \cdot l$ , мм <sup>2</sup>	2588,58	2582,45	2592	2584,78	2592,1	2588,6
$U_\phi$ , В	255,3	255,2	255,3	255,2	255,2	255,2

Рис. 9. График зависимости  $U_\phi(D, l)$  при  $D \cdot l = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ 

Как видно из результатов пятой серии исследований, при одинаковом значении произведения диаметра расточки якоря  $D$  и активной длины  $l$   $D \cdot l = \text{const}$  и постоянной частоте вращения ротора  $n = \text{const}$  выходное напряжение  $U_\phi$  не меняется:

$$\text{при } D \cdot l = \text{const}, n = \text{const}: U_\phi = \text{const}. \quad (5)$$

Исходя из полученных зависимостей (1)–(5), следует вывод о том, что выходное напряжение генератора пропорционально величине диаметра расточки якоря  $D$ , активной длины  $l$  и частоты вращения  $n$ :

$$U_\phi \sim D \cdot l \cdot n. \quad (6)$$

В [3] приведена формула определения расчетной мощности ЭМ:

$$S' = \frac{D^2 l' n A B_\delta a' k_\phi k_{OB}}{6,1 \cdot 10^7}, \quad (7)$$

где  $S'$  – расчетная мощность ЭМ,  $D$  – диаметр расточки якоря (внутренний диаметр статора),  $l'$  – расчетная активная длина,  $n$  – частота вращения ротора,  $A$  – линейная нагрузка,  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре,  $a'$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия,  $k_\phi$  – коэффициент формы ЭДС,  $k_{OB}$  – обмоточный коэффициент.

Примем  $l'=l$ , тогда если рассматривать зависимость расчетной мощности  $S'$  от параметров  $D$ ,  $l$  и  $n$ , то получим:

$$S' \sim D^2 l n. \quad (8)$$

Учитывая, что мощность ЭМ пропорциональна произведению напряжения и тока фазы,

$$S' \sim U_\phi I_\phi, \quad (9)$$

получим:

$$I_{\phi} \sim D. \quad (10)$$

Таким образом, установлено, что номинальный ток фазы прямо пропорционален величине диаметра расточки якоря  $D$ .

На рисунке 10 схематически показано, как исследованные параметры влияют на мощность ЭМ.

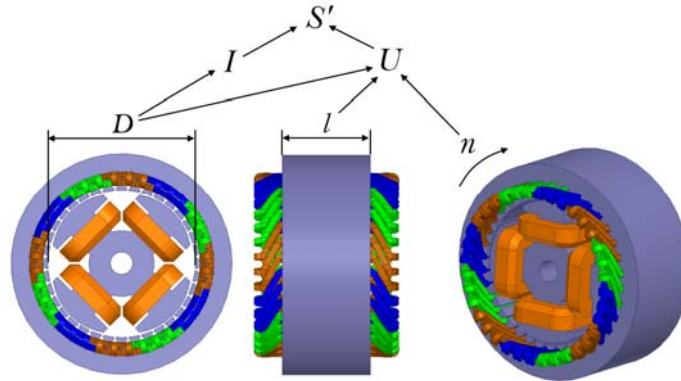


Рис. 10. Влияние параметров  $D$ ,  $l$  и  $n$  на мощность синхронных ЭМ

Исходя из полученных данных, определим зависимость мощности ЭМ от параметров  $D$ ,  $l$  и  $n$ .

Учитывая (1), следует, что:

1) при  $D=\text{const}$ :  $S' \sim l$  (рис. 11); (11)

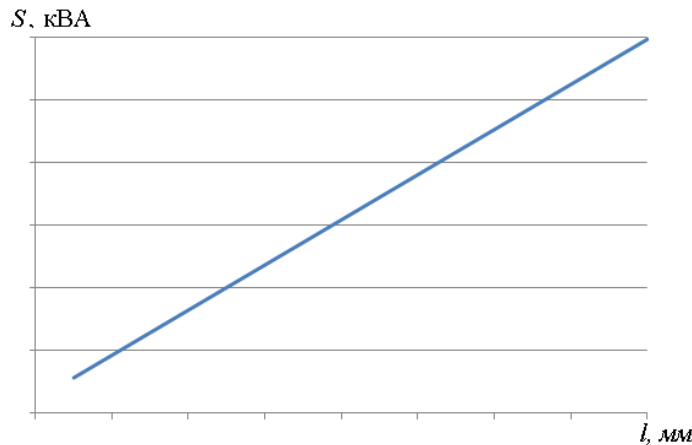


Рис. 11. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от активной длины  $l$  при  $D=\text{const}$

2) при  $D=\text{const}$ :  $S' \sim \lambda$  (рис. 12). (12)

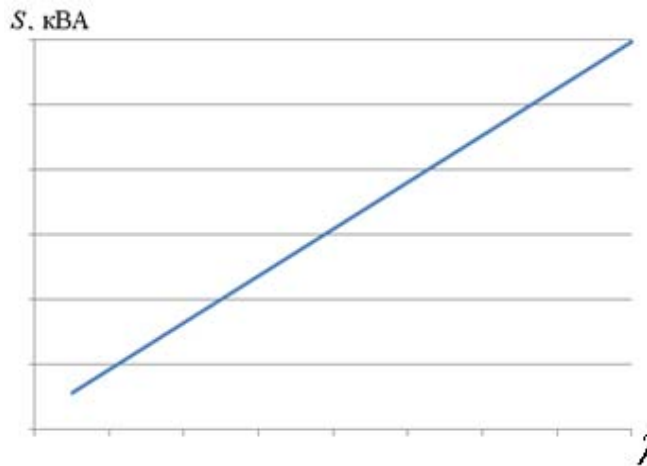


Рис. 12. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от конструктивного коэффициента  $\lambda$  при  $D=\text{const}$

При этом  $U_{\text{фном}} \sim l$  ( $U_{\text{фном}} \sim \lambda$ ),  $I_{\text{фном}} = \text{const}$

Учитывая (2), следует, что:

1) при  $l=\text{const}$ :  $S' \sim \lambda$  (рис. 13); (13)

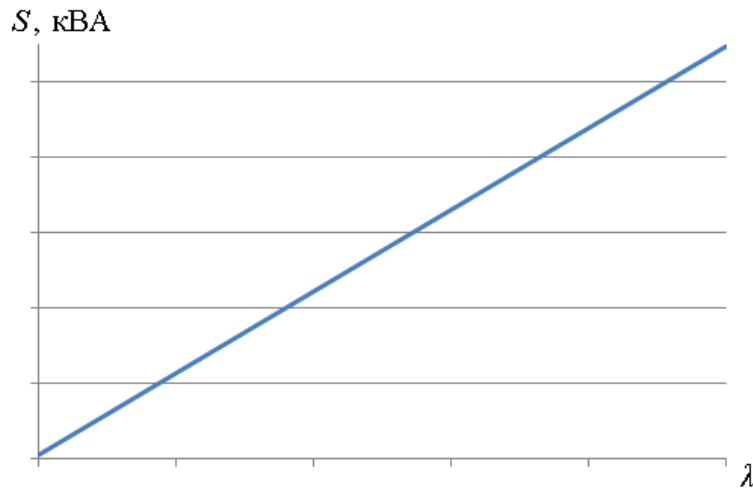


Рис. 13. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от конструктивного коэффициента  $\lambda$  при  $l=\text{const}$

2) при  $l=\text{const}$ :  $S' \sim D^2$  (рис. 14). (14)

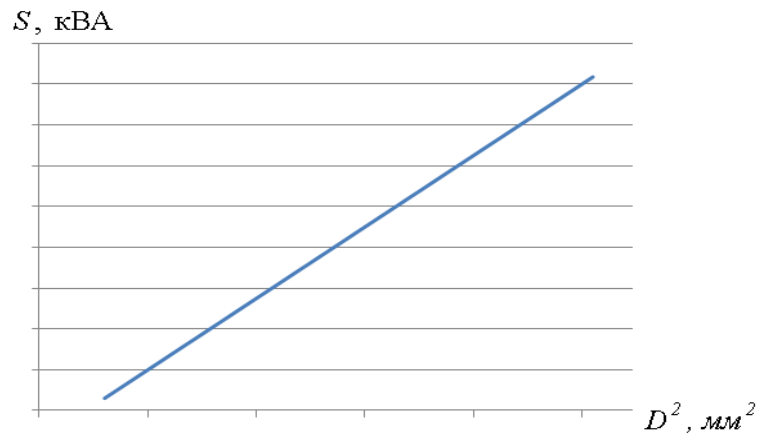


Рис. 14. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от диаметра расточки якоря  $D$  при  $l=\text{const}$   
При этом  $U_{\text{ном}} \sim D$ ,  $I_{\text{ном}} \sim D$

Учитывая (3), следует, что:

при  $\lambda=\text{const}$ :  $S' \sim D^3$  (рис. 15). (15)

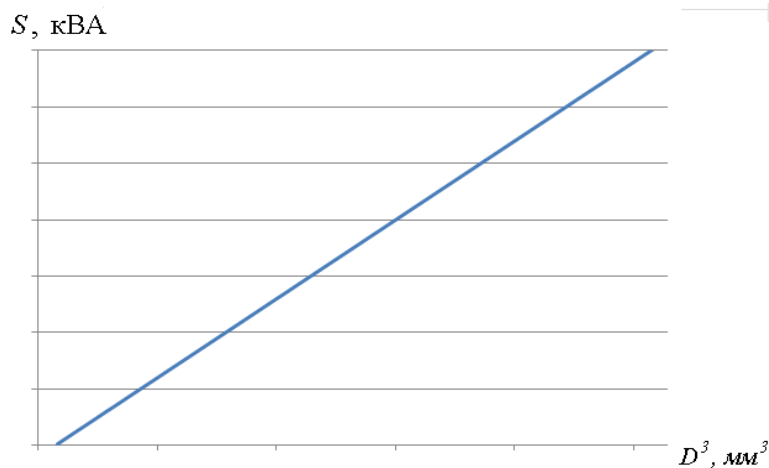


Рис. 15. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от диаметра расточки якоря  $D$  при  $\lambda=\text{const}$   
При этом  $U_{\text{ном}} \sim D^2$ ,  $I_{\text{ном}} \sim D$



Учитывая (4), следует, что:

при  $D=\text{const}$ ,  $l=\text{const}$ :  $S' \sim n$  (рис. 16). (16)

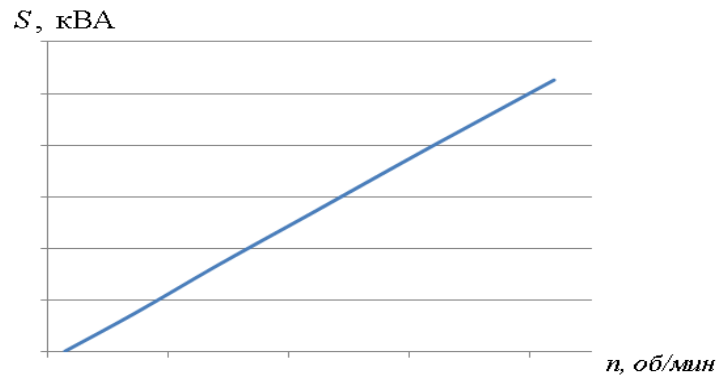


Рис. 16. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от частоты вращения ротора при  $D=\text{const}$ ,  $l=\text{const}$   
 При этом  $U_{\text{ном}} \sim n$ ,  $I_{\text{ном}} = \text{const}$

Учитывая (5), следует, что:

1) при  $D \cdot l = \text{const}$  ( $D^2 \lambda = \text{const}$ ),  $n = \text{const}$ :  $S' \sim D$  (рис. 17); (17)

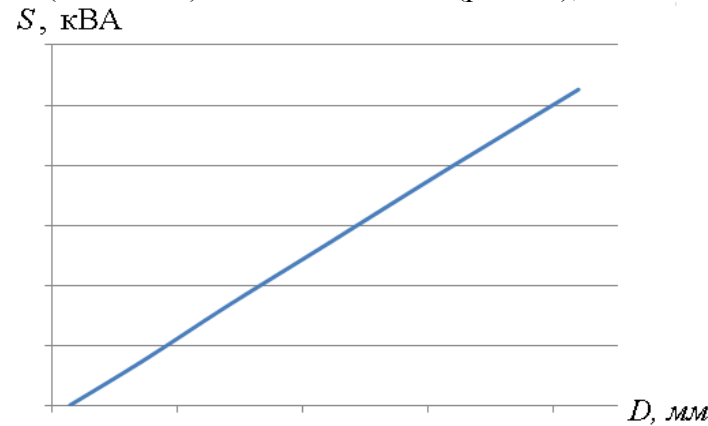


Рис. 17. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от диаметра расточки якоря  $D$  при  $D \cdot l = \text{const}$

2) при  $D \cdot l = \text{const}$  ( $D^2 \lambda = \text{const}$ ),  $n = \text{const}$ :  $S' \sim \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$  (рис. 18). (18)

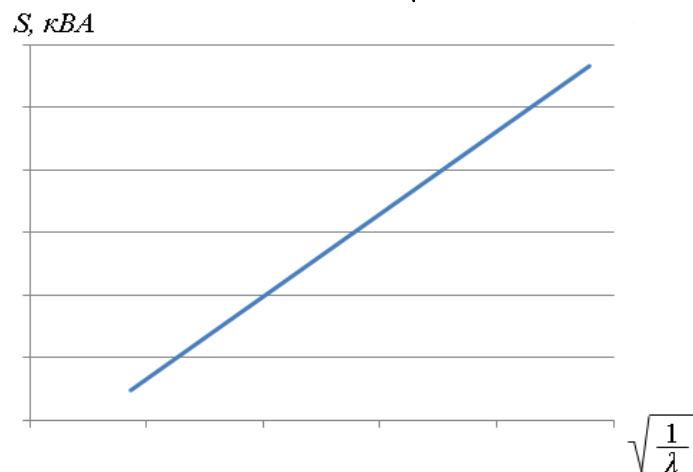


Рис. 18. Зависимость расчетной мощности  $S'$  от конструктивного коэффициента  $\lambda$  при  $D \cdot l = \text{const}$   
 При этом  $U_{\text{ном}} = \text{const}$ ,  $I_{\text{ном}} \sim D$

Полученные зависимости (1)–(18) позволяют:

– производить сравнительный анализ ЭМ с разным соотношением основных размеров и работающих при разной частоте вращения;

– облегчить проектирование ЭМ (серий ЭМ), так как становится возможным производить расчет (облегчить расчет) новых машин на основе уже известных без необходимости проектирования «с чистого листа»;

– производить массогабаритную оптимизацию, определяя изменение расчетной мощности, тока и напряжения при изменении основных размеров ЭМ и частоты вращения ротора.

Если сравнивать несколько ЭМ с разными значениями параметров  $S'$ ,  $D$ ,  $l$  и  $n$ , то при условии, что все машины имеют одинаковые коэффициенты  $k_{OB}$ ,  $k_{\Phi}$  и изготовлены по одинаковым технологиям и из одних и тех же материалов, а также исключая прочие факторы, влияющие на результаты электромагнитного преобразования при одинаковых условиях работы (линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре, охлаждение, среда, в которой работает машина и т.д.), то, анализируя полученные зависимости (1)–(18), можно сделать следующие выводы:

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $D$ , но разные  $l$  (а значит, и разные  $\lambda$ ), не могут иметь одинаковые  $S'$  и одинаковые  $U_{\Phi ном}$  при одной и той же частоте вращения ротора  $n$ , при этом ЭМ, у которой  $l$  больше (у которой  $\lambda$  больше), имеет большее значение  $U_{\Phi ном}$ ;

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $l$ , но разные  $D$  (а значит, и разные  $\lambda$ ), не могут иметь одинаковые  $S'$  и одинаковые  $U_{\Phi ном}$  при одной и той же частоте вращения ротора  $n$ , при этом ЭМ, у которой  $D$  больше (у которой  $\lambda$  меньше), имеет большее значение  $U_{\Phi ном}$  и большее значение  $S'$ ;

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $\lambda$ , но разные  $D$  (а значит, и разные  $l$ ), не могут иметь одинаковые  $S'$  и одинаковые  $U_{\Phi ном}$  при одной и той же частоте вращения ротора  $n$ , при этом ЭМ, у которой  $D$  больше (у которой  $l$  меньше), имеет большее значение  $U_{\Phi ном}$  и большее значение  $S'$ ;

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $l$  и одинаковые параметры  $D$  (а значит, и одинаковые  $\lambda$ ), имеют одинаковые  $S'$  и одинаковые  $U_{\Phi ном}$  на одной и той же частоте вращения ротора  $n$ , при этом если увеличить (уменьшить) частоту вращения ротора в  $k$  раз, то параметры  $S'$  и  $U_{\Phi ном}$  обеих машин увеличатся (уменьшатся) в  $k$  раз;

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $U_{\Phi ном}$ , но разные  $\lambda$ , не могут иметь одинаковые  $S'$  при одной и той же частоте вращения ротора  $n$ , при этом ЭМ, у которой  $\lambda$  больше, имеет меньшее значение расчетной мощности  $S'$ , и наоборот – при одинаковых  $U_{\Phi ном}$ , но разных  $\lambda$ , большую мощность имеет та ЭМ, у которой  $\lambda$  меньше;

– две ЭМ, имеющие одинаковые параметры  $S'$ , но разные  $\lambda$ , не могут иметь одинаковые  $U_{\Phi ном}$  при одинаковой частоте вращения ротора  $n$ , при этом ЭМ, у которой  $\lambda$  больше, имеет большее значение  $U_{\Phi ном}$ ;

– две ЭМ, для которых выбраны одинаковые значения линейной нагрузки  $A$ , индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$ , коэффициентов  $a'$ ,  $k_{OB}$ ,  $k_{\Phi}$  и частоты вращения ротора  $n$ , не могут иметь одинаковые значения параметров  $S'$  и  $U_{\Phi ном}$  при разных значениях параметров  $\lambda$  и  $D$ . На этапе проектирования ЭМ при произвольном выборе  $\lambda$  задача по нахождению диаметра  $D$ , при котором одновременно обеспечиваются требуемые значения  $S'$  и  $U_{\Phi ном}$ , не всегда имеет решение, так как из трех заданных параметров  $S'$ ,  $U_{\Phi ном}$  и  $\lambda$  (или  $S'$ ,  $U_{\Phi ном}$  и  $D$ ) один всегда является избыточным.

#### Примечания:

1. Пахомин С.А. Проектирование синхронных генераторов: учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. С. 8.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высш. шк., 1982. С. 32.
3. Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2006. С. 18.

#### References:

1. Pakhomin S.A. Designing of synchronous generators: a manual on the course project for Electromechanics. Novocherkassk: YuRGU, 2007. P. 8.
2. Balagurov V.A. Designing of special electrical AC machines. M.: Vyssh. Shk., 1982. P. 32.
3. Goldberg O.D., Sviridenko I.S. Designing of electrical machines. M.: Vyssh. Shk., 2006, P. 18.