

Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Вавилов В.Е., Зиннатуллина Г.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЫСОКООБОРОТНЫЙ СИНХРОННЫЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Фундаментальные исследования основополагающих процессов в высоконадежных электромеханических преобразователях энергии для авиакосмической отрасли с целью поиска новых физических принципов для обеспечения максимальной отказоустойчивости и энергоэффективности в настоящее время являются актуальной задачей. Вследствие чего требуется решение научной проблемы в области повышения надежности, энергоэффективности и отказоустойчивости электромеханических преобразователей энергии путем исследования основополагающих процессов в высоконадежных электромеханических преобразователях энергии с целью поиска новых физических принципов для обеспечения максимальной отказоустойчивости и энергоэффективности. Необходимо создание теоретической базы знаний для перехода к технологическому освоению высоконадежных электромеханических преобразователей энергии для авиакосмической отрасли. В данной работе представлены расчеты основных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора мощностью 90 кВт и частотой вращения 65000 об/мин для безредукторных вспомогательных силовых установок. Приведена двухмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах. Приведены формулы для расчета мощности высокооборотного стартер-генератора в стартерном режиме. Проанализированы характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах.

Ключевые слова: установка, синхронный стартер-генератор, моделирование, компьютерное моделирование, Ansys Maxwell, программный комплекс, двухмерная компьютерная модель, исследование высокооборотного синхронного стартер-генератора.

ВВЕДЕНИЕ

Разработки в области создания безредукторных вспомогательных силовых установок (ВСУ) на сегодняшний день являются весьма актуальной задачей. Однако согласно [1] УАП «Гидравлика» впервые продемонстрирована модель новой вспомогательной силовой установки (ВСУ-120) с безредукторной схемой для перспективного ряда летательных аппаратов. Новая установка обеспечила рациональное использование энергетических возможностей самолета, повышение его мощности, эксплуатационных характеристик и снижения массы оборудования на 20%. Создание новой ВСУ-120 с безредукторной схемой решило проблему импортозамещения и обеспечило появление на рынке изделия нового поколения.

Для обеспечения эффективной работы электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), применяемых в авиакосмической отрасли, необходимы разработки новых подходов и способов к обеспечению отказоустойчивости, энергоэффективности и минимальным массогабаритным показателям. Согласно [2] показана возможность создания высоковольтного высокооборотного генератора мощностью 230 кВт и массой 30 кг. Определен проектный облик высокооборотного (частота вращения 50000-70000 об/мин) высоковольтного генератора (выходное линейное напряжение 4 кВ) мощностью 230 кВт с максимальным КПД и минимальными массогабаритными показателями, а также проведены его электромагнитные расчеты и экспериментальные исследования.

В работе [3] представлено аналитическое решение для прогнозирования распределения магнитного поля и характеристик синхронного генератора с высоко-

скоростным постоянным магнитом мощностью 2 кВт. Для анализа распределения магнитного поля применяется теорема о соотношении электромагнитных передаточных. А характеристики получены путем решения уравнения эквивалентной схемы машины с постоянными магнитами для переменной активной нагрузки и рабочей скорости. Аналитические результаты подтверждаются сравнением с нелинейным анализом конечных элементов (FEM) и экспериментальными результатами.

С учетом рассмотренных расчетных параметров различных ЭМПЭ для авиакосмической отрасли, для обеспечения повышенной надежности и меньших массогабаритных показателей требуется разработка и проектирование высокооборотного стартер-генератора для безредукторной ВСУ. Высокооборотный стартер-генератор необходим для обеспечения запуска маршевого двигателя летательного аппарата в режиме стартера, а в режиме генератора – для выработки электроэнергии для питания электрических систем летательного аппарата.

Поэтому целью данной работы является разработка, производство расчетов основных параметров и анализ характеристик высокооборотного синхронного стартер-генератора мощностью 90 кВт и частотой вращения 65000 об/мин методом компьютерного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В РАЗДЕЛЕ RMXPRТ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS MAXWELL

Для получения расчетных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора, опираясь на работы [4-9], производится его расчет в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell. Основные данные для расчета представлены в **табл. 1**.

Таблица 1
Геометрические размеры и параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
1. Частота вращения	об/мин	65000
2. Мощность на валу	кВт	90
3. Количество фаз	-	3
4. Напряжение	В	(200±10)
5. Частота	Гц	(400±20)
6. Количество пазов статора	-	24
7. Число полюсов	-	4
8. Внешний диаметр статора	мм	118
9. Внутренний диаметр статора	мм	71
10. Внешний диаметр ротора	мм	59
11. Внутренний диаметр ротора	мм	30
12. Длина статора	мм	150
13. Длина ротора	мм	150
14. Толщина постоянных магнитов	мм	8,8
15. Воздушный зазор	мм	6

Результаты расчетов представлены в **табл. 2**.

Таблица 2
Результаты расчетов высокооборотного синхронного стартер-генератора в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
Общие сведения		
1. Номинальная выходная мощность	кВт	90
2. Номинальный коэффициент мощности	-	0,85
3. Тип коэффициента мощности	-	индуктивный
4. Номинальное напряжение	В	200
5. Число полюсов	-	4
6. Частота	-	2166,67
7. Положение ротора	-	внутреннее
8. Рабочая температура	°C	140
Данные по статору		
9. Количество пазов статора	-	24
10. Внешний диаметр статора	мм	118
11. Внутренний диаметр статора	мм	71
12. Ширина паза B_{S2}	мм	9,22
13. Высота паза H_{S2}	мм	13
14. Высота шлица H_{S0}	мм	1
15. Ширина шлица B_{S0}	мм	4

16. Верхняя ширина зубца	мм	4
17. Нижняя ширина зубца	мм	4
18. Коэффициент укладки сердечника статора	-	0,92
19. Длина статора	мм	150
20. Тип стали	-	2421
21. Расчетная толщина клина	мм	0,72
22. Количество параллельных ветвей	-	1
23. Количество проводников в пазу	-	2
24. Средний шаг катушки	-	5
25. Количество жил в проводнике	-	841
26. Диаметр провода	мм	0,2
27. Площадь паза	мм ²	130,288
28. Конечная площадь паза	мм ²	122,434
29. Ограниченный коэффициент заполнения паза	%	55
30. Коэффициент заполнения паза статора	%	54,952
31. Длина полуоборота катушки	мм	235,668

Данные по ротору

32. Минимальный воздушный зазор	мм	6
33. Длина ротора	мм	150
34. Внешний диаметр ротора	мм	59
35. Внутренний диаметр ротора	мм	30
36. Тип стали	-	30HGSА
37. Длина ротора	мм	150
38. Максимальная толщина постоянных магнитов	мм	8,8
39. Ширина магнитов	мм	40,04
40. Тип магнита	-	vacomax

Данные по магниту

41. Остаточная индукция	Тл	1,03
42. Коэрцитивная сила	кА/м	650
43. Максимальная плотность энергии	кДж/м ³	167,375
44. Относительная проницаемость отдачи	-	1,26
45. Индукция размагничивания	Тл	0,4

Расход материалов

46. Плотность меди	кг/м ³	8900
47. Плотность постоянного магнита	кг/м ³	7800
48. Плотность стали сердечника статора	кг/м ³	7872
49. Плотность стали сердечника ротора	кг/м ³	7872
50. Вес меди	кг	2,65
51. Вес постоянного магнита	кг	1,18

52. Вес стали сердечника статора	кг	4,18
53. Вес стали сердечника ротора	кг	1,18
54. Общий вес	кг	9,21
Устойчивое состояние параметров		
55. Коэффициент обмотки статора	-	0,933
56. D-осевое реактивное сопротивление X_{ad}	Ом·м	0,122
57. Q-осевое реактивное сопротивление X_{aq}	Ом·м	0,122
58. D-осевое реактивное сопротивление $X_1 + X_{ad}$	Ом·м	0,261
59. Q-осевое реактивное сопротивление $X_1 + X_{aq}$	Ом·м	0,305
60. Реактивное сопротивление рассеяния якоря X_1	Ом·м	0,139
61. Реактивное сопротивление нулевой последовательности X_0	Ом·м	0,091
62. Фазовое сопротивление якоря R_1	Ом·м	0,0037
63. Фазовое сопротивление якоря при 20°C	Ом·м	0,0025
Магнитные данные без нагрузки		
64. Магнитная индукция в зубцах статора	Тл	1,139
65. Магнитная индукция в ярме статора	Тл	1,527
66. Магнитная индукция в ярме ротора	Тл	1,627
67. Магнитная индукция в воздушном зазоре	Тл	0,417
68. Магнитная индукция в магнитах	Тл	0,596
69. Коэффициент потока утечки	-	1
70. Длина цепи ярма статора	мм	0,304
71. Длина цепи ярма ротора	мм	0,404
72. Фундаментальное среднеквадратическое линейное напряжение	В	334,076
73. Момент затяжки	Н·м	0,232
Магнитные данные под нагрузкой		
74. Сопротивление	Ом	0,321
75. Индуктивность	Гн	1,46e-005
76. Линейное напряжение	В	219,402
77. Среднеквадратическое значение линейного тока	А	334,007
78. Среднеквадратическое значение фазного напряжения	В	127,26
79. Тепловая нагрузка	А ² /мм ³	908,655
80. Удельная электрическая нагрузка	А/мм	71,87

81. Плотность тока	А/мм ²	12,64
82. Потери в стали	Вт	1084,59
83. Потери в меди	Вт	1253,83
84. Полные потери	Вт	2238,41
85. Входная мощность	кВт	107,721
86. Выходная мощность	кВт	110,060
87. КПД	%	97,87
88. Частота вращения	об./мин	65000
89. Номинальный крутящий момент	Н·м	16,16
90. Ток короткого замыкания	А	748,772

Анализ результатов расчета в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell показал, что выходные параметры высокооборотного синхронного starter-генератора соответствуют заданным параметрам. Выходная мощность составляет 110 кВт, линейный ток 334 А, фазное напряжение 127 В, КПД 97,87%.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ПРИ 2D-МОДЕЛИРОВАНИИ

Разработанная двухмерная модель высокооборотного синхронного starter-генератора представлена на рис. 1.

В ходе исследования двухмерной модели были рассмотрены характеристики высокооборотного синхронного starter-генератора, которые представлены на рис. 2-5.

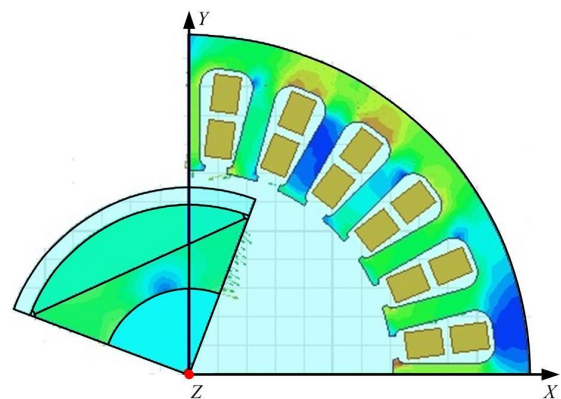


Рис. 1. Двухмерная модель высокооборотного синхронного starter-генератора

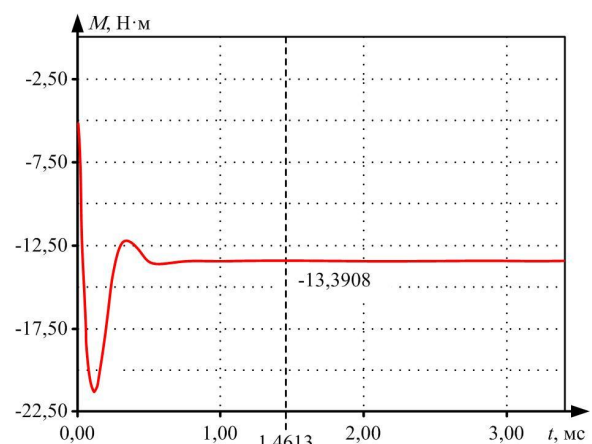


Рис. 2. Зависимость крутящего момента ротора от времени

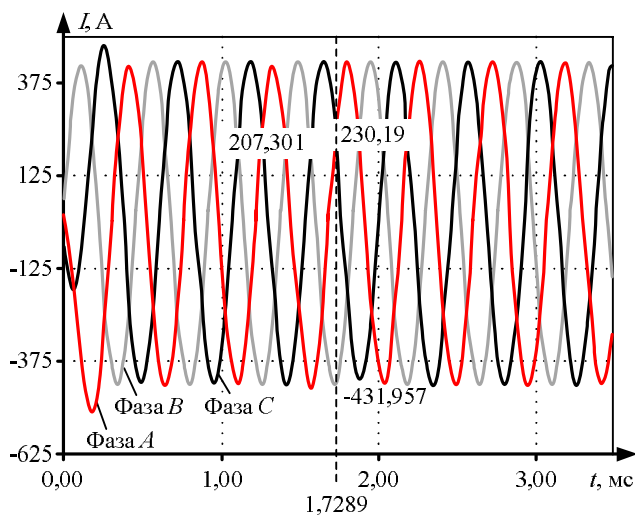


Рис. 3. Зависимость токов в фазах A, B, C от времени

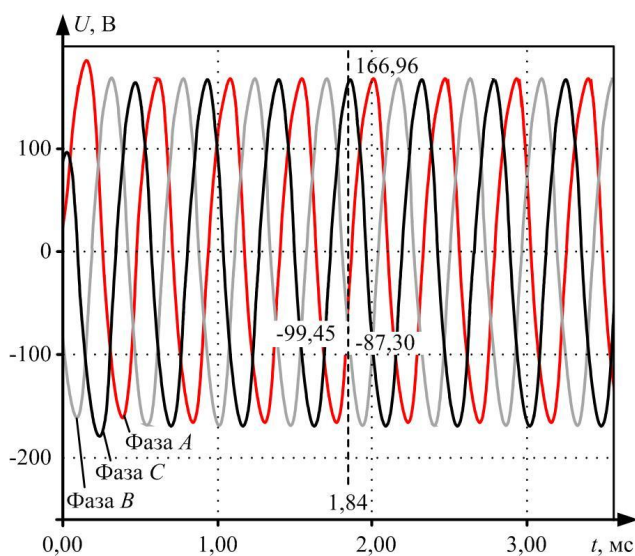


Рис. 4. Зависимость индуцированного напряжения от времени

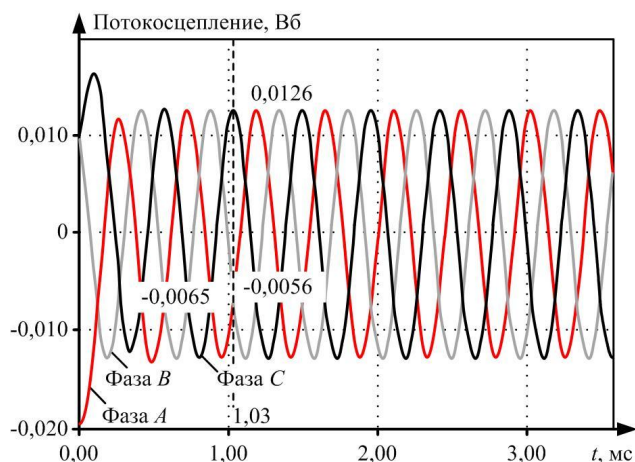


Рис. 5. Зависимость потокосцепления от времени

Значение крутящего момента при значении времени $t=1,46$ мс равно $-13,39$ Н.

Значение токов в фазах A, B, C при значении времени $t=1,72$ мс равно соответственно 207, -431, 230 А.

Значение индуцированного напряжения в фазах A, B, C при значении времени $t=1,84$ мс равно соответственно -87,30 В, -99,45 В, 166,96 В.

Значение потокосцепления в фазах A, B, C при значении времени $t=1,03$ мс равно соответственно -6,5, -5,6, 12,6 мВб.

МОЩНОСТЬ ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ

Предлагается рассмотреть мощность высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме, основываясь на моменте, развиваемом на валу турбины безредукторной ВСУ. Уравнение для момента на валу турбины во время запуска:

$$M_{\Sigma t} = M_t + M_o + M_j, \quad (1)$$

где M_t – момент турбины; M_o – момент сопротивления; M_j – избыточный момент для преодоления инерционного момента.

Момент сопротивления возникает из-за сил трения, а также сопротивления газа, которые проявляются при раскрутке турбины безредукторной ВСУ. Избыточный момент для преодоления инерционного момента возникает в связи с тем, что вал турбины обладает собственным моментом инерции, который также необходимо преодолеть при его раскрутке. Стоит отметить, что для расчета момента инерции вала турбины безредукторной ВСУ существует конечная формула. В целом избыточный момент можно определить по обобщенной формуле:

$$M_j = J_p \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где J_p – полярный момент инерции вала турбины.

Для получения числового значения полярного момента инерции вала турбины можно использовать следующее выражение:

$$J_{pt} = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (3)$$

где d – диаметр вала турбины.

То есть для получения числового значения избыточного момента необходимо знать диаметр вала турбины, а также числовое значение углового ускорения вала. Для оценки мощности стартер-генератора в стартерном режиме при пуске предлагается брать максимально развиваемое значение углового ускорения вала при пуске. Отдельно рассмотрим момент турбины. Момент турбины определяется мощностью турбины, то есть

$$M_t = \frac{W_t}{\omega_t}, \quad (4)$$

где W_t – мощность турбины; ω_t – частота вращения турбины, при которой ВСУ выходит на режим малого газа.

Частота вращения турбины, при которой безредукторная ВСУ выходит на режим малого газа, является определенной величиной для конкретной ВСУ. Мощность турбины можно определить по следующей формуле:

$$W = mc_p T_{02} \left(\Pi_k^{\frac{k-1}{k\eta_p}} - 1 \right), \quad (5)$$

где m – расход воздуха через безредукторную ВСУ; c_p – теплоемкость воздуха; T_{02} – температура на входе в безредукторную ВСУ; Π_k – степень повышения давления в турбине; k – показатель адиабаты; η_p – политропический КПД процесса сжатия.

Для проведения расчета мощности высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме величину расхода воздуха m следует принимать для режима малого газа безредукторной ВСУ. Теплоемкость воздуха и политропический КПД процесса сжатия являются табличными данными. Для безредукторной ВСУ температура на входе в двигатель принимается равной $T_{02}=288,15$ К. Для проведения расчетов обычно принимают показатель адиабаты $k=1,4$. В свою очередь, степень повышения давления в турбине Π_k варьируется от 1,5 до 20.

Момент сопротивления M_0 нецелесообразно рассчитывать отдельно, так как этот момент достаточно мал и учесть его можно более простым способом. Поэтому предлагается учитывать момент сопротивления при расчете момента турбины M_t . Для этого необходимо поделить полученный момент турбины на КПД узлов, за счет которых образуется сопротивление вращению (например, подшипники качения, привода агрегатов и др.). Для расчетов можно принять $\eta_0 = 0,97...0,98$. Тогда получим следующее:

$$M_t + M_o = \frac{W_t}{\omega_t \eta_0}. \quad (6)$$

По предложенной методике можно получить численное значение мощности высокооборотного синхронного стартер-генератора при расположении его на валу турбины. Также это имеет важное практическое значение в случае разбиения высокооборотного синхронного стартер-генератора на две машины. Например, одна из машин работает только в режиме генератора, а вторая представляет собой стартер-генератор. Таким образом, можно получить минимальную мощность, которую должна обеспечивать машина, выполняющая роль стартер-генератора, при условии, что задана совокупная мощность высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ В РАЗДЕЛЕ RMXprt ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS MAXWELL

Основные данные для расчета представлены в табл. 3.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Анализ результатов расчета в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell показал, что выходные параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме соответствуют заданным параметрам. Выходная мощность составляет 91 кВт, линейный ток 338 А, КПД – 97,7%.

Таблица 3
Геометрические размеры и параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора для расчета в стартерном режиме

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
1. Частота вращения	об/мин	30000
2. Мощность на валу	кВт	90
3. Количество фаз	-	3
4. Напряжение	В	270
5. Частота	Гц	(400±20)
6. Количество пазов статора	-	24
7. Число полюсов	-	4
8. Внешний диаметр статора	мм	118
9. Внутренний диаметр статора	мм	71
10. Внешний диаметр ротора	мм	59
11. Внутренний диаметр ротора	мм	30
12. Длина статора	мм	150
13. Длина ротора	мм	150
14. Толщина постоянных магнитов	мм	8,8
15. Воздушный зазор	мм	6

Таблица 4
Результаты расчетов высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
Общие сведения		
1. Номинальная выходная мощность	кВт	90
2. Тип нагрузки	-	постоянная частота вращения
3. Номинальное напряжение	В	270
4. Число полюсов	-	4
5. Положение ротора	-	внутреннее
6. Рабочая температура	°C	140
Данные по статору		
9. Количество пазов статора	-	24
10. Внешний диаметр статора	мм	118
11. Внутренний диаметр статора	мм	71
12. Ширина паза B_{S2}	мм	9,22
13. Высота паза H_{S2}	мм	13
14. Высота шлица H_{S0}	мм	1
15. Ширина шлица B_{S0}	мм	4

16. Верхняя ширина зубца	мм	4
17. Нижняя ширина зубца	мм	4
18. Коэффициент укладки сердечника статора	-	0,92
19. Длина статора	мм	150
20. Тип стали	-	2421
21. Расчетная толщина клина	мм	0,72
22. Количество параллельных ветвей	-	1
23. Количество проводников в пазу	-	2
24. Средний шаг катушки	-	5
25. Количество жил в проводнике	-	1147
26. Диаметр провода	мм	0,2
27. Площадь паза	мм ²	130,288
28. Конечная площадь паза	мм ²	122,434
29. Ограниченный коэффициент заполнения паза	%	75
30. Коэффициент заполнения паза статора	%	74,94
31. Длина полуоборота катушки	мм	235,668
Данные по ротору		
32. Минимальный воздушный зазор	мм	6
33. Длина ротора	мм	150
34. Внешний диаметр ротора	мм	59
35. Внутренний диаметр ротора	мм	30
36. Тип стали	-	30HGSА
37. Длина ротора	мм	150
38. Максимальная толщина постоянных магнитов	мм	8,8
39. Ширина магнитов	мм	40,04
40. Тип магнита	-	Vacomax
Данные по магниту		
41. Остаточная индукция	Тл	1,03
42. Коэрцитивная сила	кА/м	650
43. Максимальная плотность энергии	кДж/м ³	167,375
44. Относительная проницаемость отдачи	-	1,26
45. Индукция размагничивания	Тл	0,4
Расход материалов		
46. Плотность меди	кг/м ³	8900
47. Плотность постоянного магнита	кг/м ³	7800
48. Плотность стали сердечника статора	кг/м ³	7872
49. Плотность стали сердечника ротора	кг/м ³	7872
50. Вес меди	кг	3,62

51. Вес постоянного магнита	кг	1,18
52. Вес стали сердечника статора	кг	4,18
53. Вес стали сердечника ротора	кг	1,18
54. Общий вес	кг	10,18
Устойчивое состояние параметров		
55. Коэффициент обмотки статора	-	0,933
56. Фазовое сопротивление якоря R1	Ом·м	0,0027
57. Фазовое сопротивление якоря при 20°C	Ом·м	0,0018
Магнитные данные без нагрузки		
58. Магнитная индукция в зубцах статора	Тл	1,21
59. Магнитная индукция в ярме статора	Тл	1,526
60. Магнитная индукция в ярме ротора	Тл	1,627
61. Магнитная индукция в воздушном зазоре	Тл	0,417
62. Магнитная индукция в магнитах	Тл	0,596
63. Коэффициент потока утечки	-	1
64. Длина цепи ярма статора	мм	0,304
65. Длина цепи ярма ротора	мм	0,404
66. Фундаментальное среднеквадратическое линейное напряжение	В	334,076
67. Момент затяжки	Н·м	0,232
Магнитные данные под нагрузкой		
68. Средний входной ток	А	338,748
69. Среднеквадратичный ток якоря	А	361,01
70. Тепловая нагрузка	А ² /мм ³	778,332
71. Удельная электрическая нагрузка	А/мм	77,68
72. Плотность тока	А/мм ²	10,01
73. Потери в стали	Вт	1024,38
74. Потери в меди	Вт	1073,98
75. Полные потери	Вт	2098,36
76. Входная мощность	кВт	89,363
77. Выходная мощность	кВт	91,462
78. КПД	%	97,70
79. Частота вращения	об/мин	30000
80. Номинальный крутящий момент	Н·м	28,44

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО
СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ
РЕЖИМЕ ПРИ 2D-МОДЕЛИРОВАНИИ

В ходе исследования двухмерной модели были рассмотрены характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме, которые представлены на **рис. 6-9**.

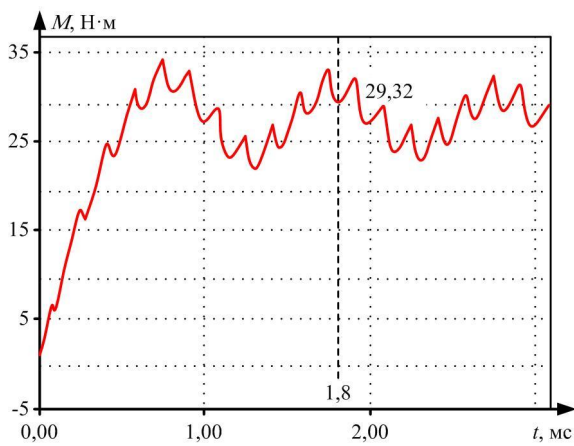


Рис. 6. Зависимость крутящего момента ротора от времени

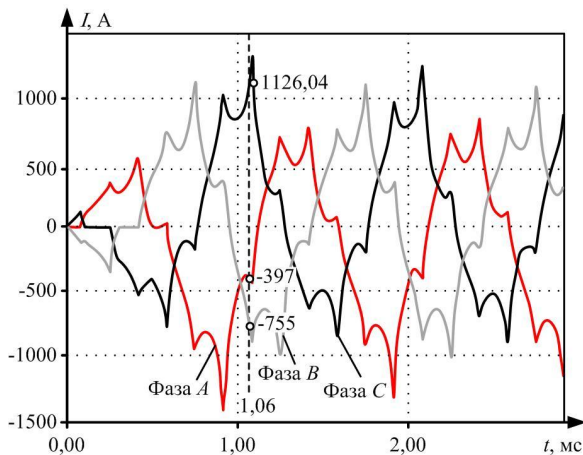


Рис. 7. Зависимость токов в фазах А, В, С от времени

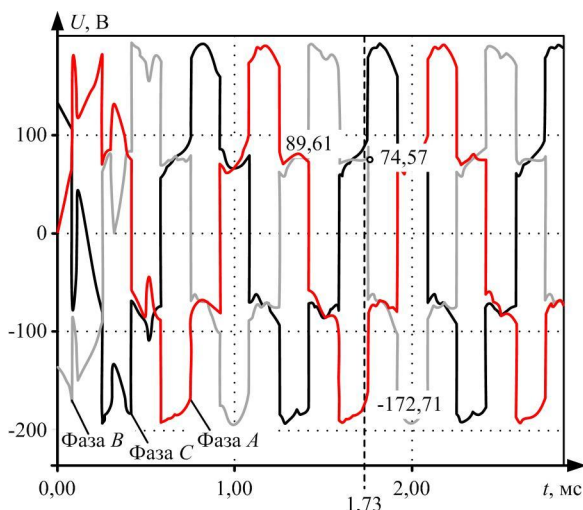


Рис. 8. Зависимость индуцированного напряжения от времени

Значение крутящего момента при значении времени $t=1,8$ мс равно 29,32 Н·м.

Значение токов в фазах А, В, С при значении времени $t=1,06$ мс равно соответственно -397, -755, 1126 А.

Значение индуцированного напряжения в фазах А, В, С при значении времени $t=1,73$ мс равно, соответственно -172,01, 74,57, 89,61.

Значение потокосцепления в фазах А, В, С при значении времени $t=1,42$ мс равно соответственно 25,8, -13,1, -14,5 мВб.

Полученная в результате моделирования трехмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора представлена на рис. 10.

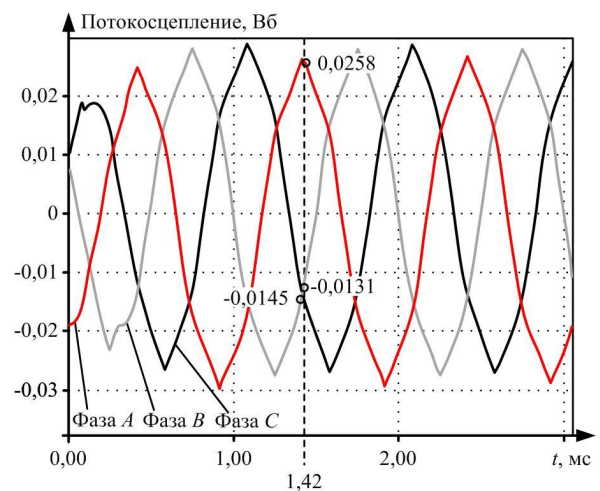


Рис. 9. Зависимость потокосцепления от времени

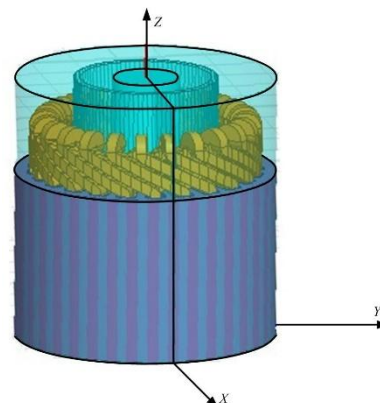


Рис. 10. Трехмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы был разработан высокооборотный синхронный стартер-генератор, работающий в генераторном и стартерном режимах для безредукторных ВСУ. Произведен расчет основных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора. Выполнено двухмерное моделирование высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах. Приведены формулы для расчета мощности высокооборотного стартер-генератора в стартерном режиме. Исследованы характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах при двухмерном моделировании.

Выполненные расчеты и проектирование показали возможность создания высокооборотного синхронного стартер-генератора с уменьшенными массогабаритными показателями, мощностью 90 кВт, частотой вращения 65000 об/мин, работающего в стартерном и генераторном режимах с КПД 97,7 и 97,87% для безредукторных ВСУ. С учетом параметров, полученных при расчете, можно заключить, что высокооборотный синхронный стартер-генератор является высоконадежным, максимально отказоустойчивым и энергоэффективным для применения в безредукторных ВСУ. Проведенные в работе расчеты и исследования обеспечивают подход к проектированию высокооборотных синхронных стартер-генераторов в генераторном и стартерном режимах для авиакосмической отрасли, что определяет перспективы создания более электрических самолетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Складов И.Е., Пантелеев О.К. Авиационное оборудование [Электронный ресурс] // Рубрика «Двигателестроение»: [сайт]. [2019]. URL: <http://www.aviaport.ru> (дата обращения: 09.09.19).
2. Высоковольтный высокооборотный генератор для автономных систем / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №4(7). С. 1387-1392.
3. Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Won-Kyu Oh. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method - Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 8-11th June 2007, pp. 868-873.
4. Сугробов А. М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. М.: Изд-во МЭИ, 2012. 302 с.
5. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). М.: Изд-во МЭИ, 2006. 336 с.
6. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Коэффициент полезного действия высокоскоростных электро-механических преобразователей энергии с высокоэффективными постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2 (538). С. 12-19.
7. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola I. Power limits of High Speed Multimegawatt Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 73-82.
8. Uzhegov N., Nerg N., Pyrhonen J. Design of 6-slot 2-pole High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings // International Conference on Electrical Machines ICEM, Berlin, Germany, September 2014, pp. 2525-2530.
9. Saban M., Gonzalez-Lopez D., Bailey C. Test procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines // IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 1769-1777

Поступила в редакцию 08 октября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

HIGH-SPEED SYNCHRONOUS STARTER-GENERATOR FOR NON-GEAR AUXILIARY POWER PLANTS

Flur R. Ismagilov

D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>.

Alexander A. Gerasin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Ufa, Russia

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Engineering), Leading Research Scientist, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>.

Guzel S. Zinnatullina

Engineer, a Post-graduate student of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: zinnatullina95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9254-8369>.

One of the most urgent tasks nowadays is to carry out fundamental research of fundamental processes in highly reliable electromechanical energy converters for the aerospace industry in order to find new physical principles to ensure maximum fault tolerance and energy efficiency. As a result, it is necessary to solve scientific problem in the field of improving the reliability, energy efficiency and fault tolerance of electromechanical energy converters by studying the fundamental processes in highly reliable electromechanical energy converters in order to find new physical principles to ensure maximum failure resistance and energy efficiency. It is necessary to develop a theoretical knowledge base for the transition to the technological development of highly reliable electromechanical energy converters for the aerospace industry.

This paper presents the calculations of the main parameters of a 90 kW high-speed synchronous starter-generator with the rotational speed of 65,000 rpm for gearless auxiliary power plants. A two-dimensional model of a high-speed synchronous starter-generator in the generator and starter modes is given. Formulas are given for calculating the power of a high-speed starter-generator in the starter mode. The characteristics of a high-speed synchronous starter-generator in the generator and starter modes are analyzed.

Keywords: high-speed synchronous starter-generator, auxiliary power unit, gearless auxiliary power unit, synchronous starter-generator, modeling, computer simulation, Ansys Maxwell, software package, two-dimensional computer model, research of high-speed synchronous starter-generator.

REFERENCES

1. Sklyarov I.E., Panteleev O.K. Aviation equipment. Engine design. Available at: <http://www.aviaport.ru> (accessed 09.09.19). (In Russian)
2. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Bekuzin V.I., Aiguzina V.V. High-voltage high-speed generator for autonomous systems. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 4(7), pp. 1387-1392. (In Russian)
3. Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Won-Kyu Oh. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method – Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 8-11th June 2007, pp. 868-873.
4. Sugrobov A.M., Rusakov A.M. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin avtonomnykh ob'ektov* [Design of electric machines of

- autonomous objects]. Moscow, Publishing House MPEI, 2012, 302 pp. (In Russian).
5. Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaja i srednjaja moshhnost')* [Valve electric motors and the drive based on them (low and medium power)]. Moscow, Publishing House MPEI, 2006, 336 pp. (In Russian).
 6. Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E. Efficiency coefficient of high-speed electro-mechanical energy converters with highly coercive permanent magnets. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no. 2(538), pp. 12-19. (In Russian)
 7. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola I. Power limits of High Speed Multimegawatt Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol. 26, no. 1, pp.73-82.
 8. Uzhegov N., Nerg N., Pyrhonen J. Design of 6-slot 2-pole High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings. *International Conference on Electrical Machines ICEM*, Berlin, Germany, September 2014, pp. 2525-2530.
 9. Saban M., Gonzalez-Lopez D., Bailey C. Test procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 1769-1777.

Высокооборотный синхронный стартер-генератор для безредукторных вспомогательных силовых установок / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, В.Е. Вавилов, Г.С. Зиннатуллина // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 19-27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27)

Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Vavilov V.E., Zinnatullina G.S. High-Speed Synchronous Starter-Generator for Non-Gear Auxiliary Power Plants. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 19-27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27)