

УДК 629.7.064.5.001.24

Группа ДО2

ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

ОСТ 1 00151-88

МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВИАЦИОННЫЕ

Методы расчета
количественных показателей безотказности

На 54 страницах

ОКП 7553

Дата введения 1 июля 1989 г.

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт распространяется на авиационные вращающиеся электрические машины с радиальными шарикоподшипниками мощностью не менее 1 Вт (генераторы, электродвигатели, преобразователи) и устанавливает методы расчета количественных показателей безотказности (вероятности безотказной работы и средней наработки на отказ) этих машин на этапе проектирования.

Приведенные методы расчета количественных показателей безотказности распространяются также на аналогичные по конструкции электрические машины, используемые в изделиях специального назначения (в том числе наземных).

Издание официальное



Перепечатка воспрещена

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие методы позволяют:

- 1) оценить соответствие расчетных показателей безотказности электрической машины требованиям технического задания (ТЗ);
- 2) выявить наименее надежные узлы и элементы конструкции электрической машины с целью разработки мероприятий по повышению показателей безотказности электрической машины в целом;
- 3) выбрать вариант конструкции электрической машины или отдельных узлов;
- 4) определить необходимые исходные данные для расчета показателей безотказности по видам отказов систем генерирования, электроснабжения или приводов, в состав которых входит электрическая машина.

1.2. Блочная структура расчета обеспечивает итерационную процедуру выбора вариантов конструкции узлов и электрической машины в целом.

Если расчетные показатели безотказности окажутся ниже заданных, то оценивается влияние отдельных составных частей на безотказность электрической машины в целом и разрабатываются необходимые меры по обеспечению заданной надежности, после чего производится повторный проверочный расчет.

1.3. Расчет количественных характеристик показателей безотказности электрической машины необходимо производить в следующем порядке:

- 1) анализируются влияния отказов составных частей на работоспособность электрической машины в целом применительно к определенным условиям, режиму и продолжительности работы;
- 2) составляется формула расчета;
- 3) вычисляются количественные показатели безотказности составных частей электрической машины;
- 4) вычисляются количественные показатели безотказности по видам отказов;
- 5) вычисляются количественные показатели безотказности электрической машины в целом, которые сравниваются с заданными в ТЗ.

1.4. К методам повышения показателей безотказности электрической машины относятся:

- 1) совершенствование составных частей;
- 2) облегчение режимов и условий работы составных частей;
- 3) резервирование;
- 4) правильное установление сроков службы, частоты проверок и регламентных работ.

№ ИЗМ.
№ ИЗВ

5813

НВ № Дубликата
НВ. № подлинника

1.5. Источниками информации для расчета количественных показателей безотказности электрической машины в целом являются показатели безотказности ее составных частей.

Исходные данные для определения количественных показателей безотказности составных частей электрической машины:

- 1) ТЗ на данную электрическую машину;
- 2) чертежи;
- 3) расчетные формуляры;
- 4) действующая техническая документация;
- 5) статистические данные об отказах аналогичных электрических машин, выявленных при эксплуатации.

2. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

2.1. Расчет вероятности безотказной работы электрической машины ($P_{3M}(t)$) при условии независимости отказов ее составных частей производится по формуле

$$P_{3M}(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t), \quad (1)$$

где m – число составных частей;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -й составной части ($i = 1, 2, \dots, m$) электрической машины;

t – расчетное время работы электрической машины (1 ч полета, 1 полет, ресурс и т.д.), ч.

2.2. Средняя наработка на отказ (T_0) в часах определяется по формулам:

$$T_0 = \frac{t}{1 - P_{3M}(t)} \text{ при } P > 0,99; \quad (2)$$

$$T_0 = \frac{t}{\ln \frac{1}{P_{3M}(t)}} \text{ при } P \leq 0,99. \quad (3)$$

2.3. При расчете рассматриваются:

- 1) шарикоподшипниковые опоры;
- 2) обмотки;
- 3) встроенные выпрямительные устройства;
- 4) щеточно-коллекторные узлы;
- 5) элементы защиты и прочие узлы и детали.

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв. № Дубликата
Инв. № подлинника

2.4. Расчет показателей безотказности расцепителя, электромагнитной муфты торможения и других элементов, выполняющих роль защиты при отказе электрической машины или обеспечивающих нормальное нерабочее состояние электрической машины (λ_{3j}), производится по формулам:

$$\lambda_{3j} = \sum_{i=1}^{m_j} \lambda_{ji}, \quad (4)$$

где λ_{ji} – интенсивность отказов i -го элемента защиты j -го типа при условии независимости отказов ($i = 1, 2, \dots, m_j$);

m_j – число элементов в защите j -го типа; ($j = 1, 2, \dots, m_g$);

$$P_{3j}(t_p) = e^{-\lambda_{3j} t_p}, \quad (5)$$

где $P_{3j}(t_p)$ – вероятность безотказной работы элемента защиты j -го типа за назначенный ресурс t_p .

3. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР

3.1. Вероятность безотказной работы шарикоподшипниковых опор электрической машины ($P_w(t)$) определяется по формуле

$$P_w(t) = \prod_{i=1}^{m_w} P_{wi}(t), \quad (6)$$

где $P_{wi}(t)$ – вероятность безотказной работы i -й шарикоподшипниковой опоры ($i = 1, 2, \dots, m_w$), определяемая по формуле

$$P_{wi}(t) = P_i(L_p) P_{i,CM} P_i(r_p > 0), \quad (7)$$

где $P_i(L_p)$ – вероятность невозникновения усталостного разрушения i -го шарикоподшипника,

$P_{i,CM}$ – вероятность безотказной работы шарикоподшипников, отказ которых происходит по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств;

$P_i(r_p > 0)$ – вероятность обеспечения рабочего внутреннего зазора i -го шарикоподшипника;

m_w – число шарикоподшипниковых опор электрической машины ($m_w = 1; 2$).

Инв. № Дубликата	5813
Инв. № подлинника	

3.1.1. Вероятность невозникновения усталостного разрушения i -го шарикоподшипника ($P_i(L_p)$) за время последнего полета в течение наработки L_p , определяется по формуле

$$P_i(L_p) = e^{-0,743 \left[\left(\frac{L_{pT}}{L_{H_i}} - 0,25 \right)^{1,11} - \left(\frac{L_{pT} - L_p}{L_{H_i}} - 0,25 \right)^{1,11} \right]}. \quad (8)$$

Если $\frac{L_{pT}}{L_{H_i}} \leq 0,25$, то $P_i(L_p) = 1$,
где L_p — наработка шарикоподшипников за время полета в циклах вращения, определяемая по формуле

$$L_p = 60 \sum_{j=1}^N n_j t_j, \quad (9)$$

где N — число типовых режимов работы электрической машины за время полета;

n_j — частота вращения электрической машины в j -м типовом режиме работы ($j = 1, 2, \dots, N$), об/мин;

t_j — длительность j -го типового режима работы в данном интервале, ч;

L_{pT} — наработка шарикоподшипников, соответствующая техническому ресурсу электрической машины, до 1-го ремонта в циклах вращения, определяемая по формуле

$$L_{pT} = L_p \frac{T_{1p}}{t_1}, \quad (10)$$

где T_{1p} — технический ресурс электрической машины до первого ремонта, ч;

t_1 — наработка в интервале времени полета, ч;

L_{H_i} — номинальная 90 %-ная расчетная долговечность i -го шарикоподшипника электрической машины в циклах вращения, определяемая по формуле

$$L_{H_i} = a_{23} \left(\frac{C_i}{Q_i} \right)^3 \cdot 10^6, \quad (11)$$

где a_{23} — коэффициент, характеризующий совместное влияние качества металла деталей и условий эксплуатации на долговечность шарикоподшипника;

C_i — динамическая грузоподъемная сила i -го шарикоподшипника, Н;

Q_i — динамическая эквивалентная нагрузка i -го шарикоподшипника, Н.

Инв. № ИЭМ.
Инв. № ИЭВ.

5813

Инв. № Дубликата
Инв. № подлинника

Для шарикоподшипников, изготавливаемых по ЕТУ-100, значения коэффициента a_{23} в зависимости от класса точности выбираются в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Класс точности шарикоподшипника	a_{23}
0	1,5
2	4,0
4	
5	3,0
6	

Динамическая грузоподъемная сила (C) в Ньютонах для радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников, диаметр которых не превышает 25,4 мм, вычисляется по формуле

$$C = f_c (m_{r,k} \cos \alpha)^{0,7} Z^{\frac{2}{3}} d_w^{1,8}, \quad (12)$$

где f_c – коэффициент, зависящий от геометрии деталей шарикоподшипника, точности их изготовления и материала, выбираемый по табл. 2 в зависимости от типа шарикоподшипника и значения соотношения $\frac{d_w \cos \alpha}{D_0}$;

$m_{r,k}$ – число рядов тел качения в шарикоподшипнике;

α – номинальный угол контакта шарикоподшипника (для радиальных шарикоподшипников $\alpha = 0^\circ, \dots, 0^\circ$;

Z – число тел качения в одном ряду шарикоподшипника;

d_w – диаметр шарика, мм;

D_0 – диаметр окружности центров комплекта шариков, мм.

Таблица 2

$\frac{d_w \cos \alpha}{D_0}$	f_c	$\frac{d_w \cos \alpha}{D_0}$	f_c
0,05	467,0	0,22	596,0
0,06	491,0	0,24	590,0
0,07	511,0	0,26	582,0
0,08	529,0	0,28	572,0
0,09	544,0	0,30	560,2
0,10	556,0	0,32	548,0
0,12	575,0	0,34	533,0
0,14	589,0	0,36	517,0
0,16	596,0	0,38	500,0
0,18	599,0	0,40	483,0
0,20	599,0		

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв. №: Дубликата
Инв. № подлинника

Динамическая эквивалентная нагрузка (Q) для радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников определяется по формуле

$$Q = (R_R X V + R_a Y) K_B K_T, \quad (13)$$

где R_R – радиальная нагрузка на шарикоподшипник, Н;

X – коэффициент динамической радиальной нагрузки;

V – коэффициент вращения колец относительно вектора нагрузки ($V = 1,0$ – при вращении внутреннего кольца, $V = 1,2$ – при вращении наружного кольца);

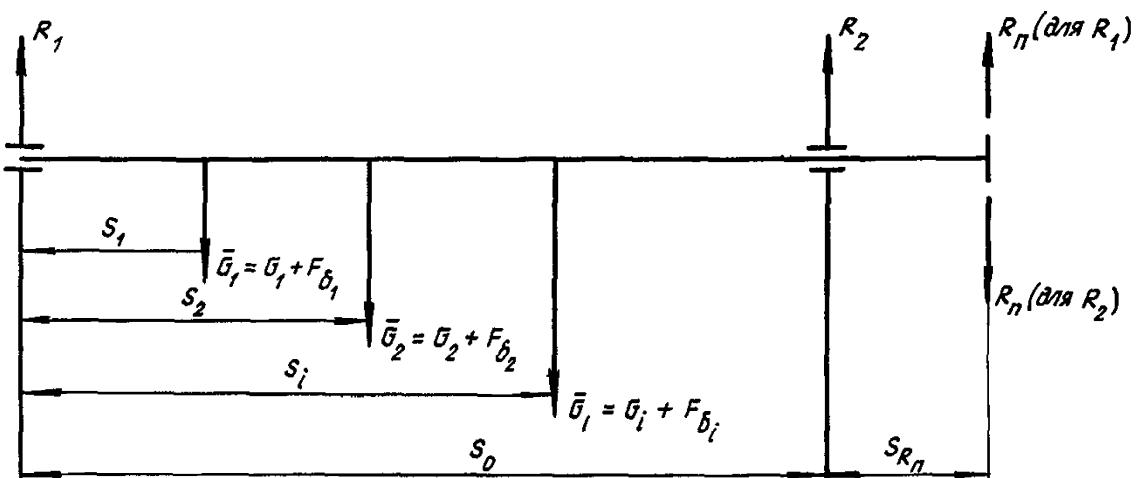
R_a – осевая нагрузка на шарикоподшипник, Н;

Y – коэффициент динамической осевой нагрузки;

K_B – коэффициент безопасности;

K_T – коэффициент, учитывающий влияние температурного режима.

3.1.1.1. Для определения радиальных нагрузок на шарикоподшипники производится анализ конструкции ротора электрической машины и составляется схема радиальных нагрузок в соответствии с чертежом.



Анализ производится при условии, что нагрузки действуют сосредоточенно.

Указанная схема учитывает наиболее распространенный вариант конструкции авиационных электрических машин с двумя шарикоподшипниками опорами, а для четырех шарикоподшипниковых опор необходимо изменить схему и произвести расчет соответственно для четырех реакций в опорах.

При определении нагрузок от элементов ротора (якоря, индуктора) необходимо учитывать силу одностороннего магнитного притяжения (ОМП).

В результате анализа определяются:

1) состав элементов ротора (якорь, индуктор);

2) нагрузки от элементов ротора (масса элемента – G_1, G_2, \dots, G_l ; значение силы ОМП – $F_{\delta_1}, F_{\delta_2}, \dots, F_{\delta_l}$; суммарная нагрузка – $(\bar{G}_1 = G_1 + F_{\delta_1}, \bar{G}_2 = G_2 + F_{\delta_2}, \dots, \bar{G}_l = G_l + F_{\delta_l})$);

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

3) координата точек приложения суммарных нагрузок от элементов ротора (s_1, s_2, \dots, s_r) .

При расчете значений реакций R_1 и R_2 в опорах вала направление реакции передачи R_2 учитывается при условии наиболее неблагоприятного случая, а именно:

вертикально вверх - при расчете R_1 ;

вертикально вниз - при расчете R_2 .

Расчет значений R_p производится только в случае передачи вращения посредством зубчатых шестерен или упругой муфты.

В случае шлицевого или шпоночного соединения между ведущим и ведомым валом значение $R_n = 0$.

Сила реакции передачи (R_7) в Ньютонах определяется по формуле

$$R_n = K_n \frac{M_H}{r_d} \cdot 10^3, \quad (14)$$

где K_n – коэффициент, учитывающий способ передачи вращения (для упругой муфты $K_n = 0,30$, а для зубчатых шестерен $K_n = 1,05$);

M_N – номинальный врачающий момент, Н·мм;

r_d – радиус делительной окружности шестерен или окружности кулачков

Муфты, ММ.

$$M_{\odot} = 95500 \frac{P_H}{\text{d}}$$

для генератора

$$M_H = 95500 \frac{P_2}{\eta \pi},$$

где P_n — номинальная мощность, кВт;

P_2 — активная мощность на выходе, кВт;

η – КПД генератора;

π – средняя частота вращения, об/мин;

$$n = \frac{L_p}{\sum_{i=1}^N t_i}, \quad (15)$$

где $\sum_{i=1}^N t_i$ — суммарное время работы электрической машины во всех режимах, ч.

Расчет значения силы ОМП (F_{δ_1}) в Ньютонах производится при условии жесткого вала и определяется по формуле

$$F_{\delta_j} = K_{\alpha_j} \bar{m}(e_j), \quad (16)$$

где i — количество элементов ротора ($i = 1, \dots, m_p$). Для бесконтактных синхронных генераторов $m_p = 3$;

K_{D_1} — коэффициент, определяемый как значение силы ОМП, возникающей при эксцентрикитете воздушного зазора в 1 мм, Н/мм;

$\bar{m}(e_0)$ – математическое ожидание эксцентризитета воздушного зазора электрической машины, мм.

Расчет значения K_{D_i} производится для каждого элемента ротора по формуле

$$K_{D_i} = \frac{392 \cdot 10^{-3} \alpha_\delta \pi L D B_\delta^2}{K_\delta b_H}, \quad (17)$$

где α_δ – расчетный коэффициент полюсной дуги;

L – активная длина ротора, мм;

D – диаметр ротора, мм;

B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре в эксплуатационном режиме работы машины, Тл;

K_δ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера);

b_H – номинальное значение воздушного зазора, мм.

Математическое ожидание эксцентризитета воздушного зазора ($\bar{m}(e_0)$) электрической машины в миллиметрах определяется по формуле

$$\bar{m}(e_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \bar{m}_i(e_0), \quad (18)$$

где i – количество шарикоподшипников;

$\bar{m}_i(e_0)$ – математическое ожидание эксцентризитета воздушного зазора электрической машины, обусловленного i -й опорой в миллиметрах, определяемое по формуле

$$\bar{m}_i(e_0) = 0,25 \left(\sum_{j=1}^{m_a} \Delta_j + r_{D_i} \right) + 0,21 \left(\sqrt{\sum_{j=1}^{m_B} B_{i(H)}^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^{m_B} B_{i(B)}^2} \right), \quad (19)$$

где m_a – число зазоров, определяющих эксцентризитет;

Δ_j – максимально возможный посадочный зазор между сопрягаемыми поверхностями деталей, мм;

$$\Delta_i = \Delta' - \Delta'', \quad (20)$$

где Δ' – верхнее предельное отклонение на сопрягаемый размер охватывающей детали, мм;

Δ'' – нижнее предельное отклонение на сопрягаемый размер охватываемой детали, мм.

Значения Δ' и Δ'' подставляются в формулу с сохранением своего знака. При отрицательном результате принимается $\Delta_i = 0$,

r_{D_i} – внутренний радиальный зазор шарикоподшипника, мм;

m_B – число рассматриваемых биений ($B_{i(H)}$), относящихся к статору;

$B_{i(H)}$ – максимально возможное биение цилиндрических поверхностей любой детали, относящейся к статору, мм;

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Изв. № Дубликата
Изв. № подлинника

m_B - число рассматриваемых вращающихся биений ($\delta_{i(B)}$), относящихся к ротору;

$\delta_{i(B)}$ - максимально возможное вращающееся биение цилиндрических поверхностей детали, относящейся к ротору, мм.

Значения реакций в опорах (R_1 и R_2) в Ньютонах определяются по формулам:

$$R_1 = \frac{\sum_i^m \bar{G}_i (S_o - S_i) + R_n S_{R_n}}{S_o}; \quad (21)$$

$$R_2 = \frac{\sum_i^m \bar{G}_i S_i + R_n (S_o + S_{R_n})}{S_o}, \quad (22)$$

где m - число элементов ротора;

\bar{G}_i - суммарная нагрузка i -го элемента ротора, Н;

S_o - расстояние между опорами вала ротора, мм;

S_i - координата точки приложения нагрузки i -го элемента ротора, мм;

R_n - сила реакции передачи, Н;

S_{R_n} - координата точки приложения силы реакции передачи, мм.

3.1.1.2. Осевая нагрузка шарикоподшипника (R_a) рассчитывается по формулам:

1) для радиального плавающего подшипника

$$R_{a_n} = \frac{R_R f_{mp}}{2}, \quad (23)$$

где f_{mp} - коэффициент трения "сталь по стали" ($f_{mp} = 0,15$);

2) для фиксированного подшипника

$$R_{a_\phi} = A_{o_1} + 9,81 \cdot G_z, \quad (24)$$

где A_{o_1} - сила поджатия пружины (при наличии в конструкции осевого поджима), Н;

G_z - масса вала и деталей, находящихся на валу, кг.

3.1.1.3. Коэффициенты X и Y для однорядных радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников при условии выполнения соотношения $\frac{R_a}{C_o} \leq 0,014$ применять

$$X = 1; \quad Y = 0,$$

где C_o - статическая радиальная грузоподъемная сила подшипника, Н.

В случае, когда $\frac{R_a}{C_o} > 0,014$, выбор коэффициентов X и Y производится путем сравнения соотношения $\frac{R_a}{R_R}$ с параметром осевого нагружения e , выбираемого по справочнику-каталогу на подшипники качения.

3.1.1.4. Значение коэффициента K_5 берется из расчетного формуляра на данную электрическую машину.

Значения коэффициента K_T , учитывающего влияние температурного режима, выбираются в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

$t_w, ^\circ\text{C}$	K_T	$t_w, ^\circ\text{C}$	K_T
До 100	1,00	200	1,25
125	1,05	225	1,33
150	1,10	250	1,40
175	1,17	-	-

3.1.1.5. При использовании электрической машины в переменных режимах работы, характеризуемых N_H различными значениями эквивалентной нагрузки Q_L и длительности режима L , следует определить эквивалентную приведенную нагрузку (Q_{pp}) в Ньютонах по формуле

$$Q_{np} = \sqrt[3]{\frac{\sum_l N_H Q_l^3 L_l}{\sum_l N_H L_l}}, \quad (25)$$

где ℓ — номер режима нагрузки.

3.1.1.6. В случае, если на предприятии действуют руководящие технические материалы (программы, методики, СТП) по расчетам значений технических параметров электрических машин, используемых при оценке надежности подшипниковых опор (сила одностороннего магнитного притяжения, реакция в опорах) при схемах нагружения, отличных от приведенных в стандарте и др., рекомендуется при работе с настоящим стандартом использовать результаты расчетов по этим руководящим материалам.

3.1.2. Вероятность невозникновения усталостного разрушения шарикоподшипников по причине потери смазкой смазочных свойств $P_{\text{нр}}$ определяется по формуле

$$P_{l_{CM}} = e^{-\frac{t}{T_{l_{CP}}}}, \quad (26)$$

где t – расчетное время работы, ч;

T_{icp} — средняя наработка до отказа шарикоподшипника по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств, ч, определяемая по формуле

$$\tau_{i_{cp}} = \frac{L_{i_{cp}}}{60\pi}, \quad (27)$$

где $L_{i_{cp}}$ - среднее число циклов вращения шарикоподшипников до отказа по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств;

π - средняя частота вращения, об/мин.

$$\lg L_{i_{cp}} = K + \frac{2800}{273 + t_w}, \quad (28)$$

где K - коэффициент, зависящий от типа консистентной смазки;

t_w - температура нагрева шарикоподшипников, $^{\circ}\text{C}$.

В случае, когда температура нагрева шарикоподшипников одинаковая,

$$\rho_{1cm} = \rho_{2cm}.$$

Значения коэффициента K выбираются в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Тип смазки	Значение коэффициента K
ОКБ-122-7 ГОСТ 18179	3,60
ЦИАТИМ-221 ГОСТ 9433	
ВНИИ НП-207 ГОСТ 19774	2,95

3.1.2.1. При жидкой смазке значение ρ_{1cm} в формуле (7) принимается равным 1.

3.1.2.2. При смазке и охлаждении шарикоподшипника посредством жидкого масла в формулу (11) номинальной 90 %-ной расчетной долговечности шарикоподшипника вводится множителем поправочный коэффициент режима трения H_i , зависящий от параметра Λ , характеризующего режим трения.

Параметр Λ определяется по формуле

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a_1}^2 + R_{a_2}^2}}, \quad (29)$$

где R_{a_1} , R_{a_2} - средние квадратические отклонения шероховатостей поверхностей контактирующих тел, мм;

h_{min} - минимальная толщина смазочного слоя в зоне контакта, мм, определяемая по формуле

$$h_{min} = \frac{2,04 f^{0,74} (G U)^{0,74}}{(W')^{0,094}} r_x, \quad (30)$$

Нр. ИЗМ.
Нр. ИЗВ.

5813

Инв. № Адубликата
Инв. № подлинника

где f – коэффициент геометрии шарикоподшипника, определяемый по формуле

$$f = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{r_x}{r_y}}, \quad (31)$$

где r_x – приведенный радиус кривизны шарика по внутреннему кольцу в направлении качения, мм;

r_y – приведенный радиус кривизны шарика по внутреннему кольцу в направлении, перпендикулярном качению, мм;

$$r_x = \frac{d_w}{2} \left(1 - \frac{d_w}{d_{cp}} \right), \quad (32)$$

$$r_y = \frac{d_w r_x}{2 r_x - d_w}, \quad (33)$$

где d_w – диаметр шарика, мм;

r_x – радиус желоба кольца, мм; $r_x = 0,515 d_w$;

d_{cp} – средний диаметр шарикоподшипника, мм, определяемый по формуле

$$d_{cp} = \frac{d + D_{нар}}{2}, \quad (34)$$

где d – посадочный диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;

$D_{нар}$ – посадочный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм;

ξ – коэффициент смазки и материала трущихся поверхностей, определяемый по формуле

$$\xi = \xi_b E', \quad (35)$$

где ξ_b – коэффициент, характеризующий зависимость динамической вязкости смазки от давления (пьезоэффициент вязкости), 1/Па;

E' – приведенный модуль упругости материала трущихся поверхностей, Па;

U – коэффициент вязкости смазки и скорости качения, определяемый по формуле

$$U = \frac{\mu_0 \bar{V}}{E' r_x}, \quad (36)$$

где μ_0 – динамическая вязкость смазки при атмосферном давлении, Па·с;

\bar{V} – полусумма скоростей контактирующих тел качения, мм/с, определяемая по формуле

$$\bar{V} = \frac{\pi n}{120 \cdot d_{cp}} (d_{cp}^2 - d_w^2), \quad (37)$$

где n – средняя частота вращения, об/мин;

w' – коэффициент нагрузки, определяемый по формуле

$$w' = \frac{F \cdot 10^{-6}}{E' r_x^2}, \quad (38)$$

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Изв. №: Дубликата
Изв. №: подлинника

где F - максимальная нагрузка на шарик, Н, определяемая по формуле

$$F = \frac{5Q}{z}, \quad (39)$$

где z - количество шариков подшипника.

Зависимость H_i в функции от параметра Λ , характеризующего режим трения, выбирается в соответствии с табл. 5.

Таблица 5

Λ	H_i
От 0,600 до 0,999	0,9
" 1,000 " 1,499	1,0
" 1,500 " 2,000	1,3
Св. 2,000	1,5

Следует отметить, что при значении $\Lambda < 0,600$ режим смазки считается неудовлетворительным.

3.1.3. Вероятность обеспечения внутреннего зазора шарикоподшипника (P_i , ($r_p > 0$)) определяется по формуле

$$P_i(r_p > 0) = \frac{1}{\sigma(r_p)\sqrt{2\pi}} \int_{r_{p, \text{раб}}}^{r_{p, \text{раб}}} e^{-\frac{[r_p - \bar{m}(r_p)]^2}{2\sigma^2(r_p)}} dr_p = 0,5 + \Phi\left[\frac{\bar{m}(r_p)}{\sigma(r_p)}\right], \quad (40)$$

где $\Phi\left[\frac{\bar{m}(r_p)}{\sigma(r_p)}\right]$ - функция Лапласа;

$\bar{m}(r_p)$ - математическое ожидание рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника, мм;

$\sigma(r_p)$ - среднее квадратическое отклонение рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника, мм.

Математическое ожидание рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника ($\bar{m}(r_p)$) в миллиметрах определяется по формуле

$$\bar{m}(r_p) = \bar{m}(r_0) - \bar{m}(\Delta r_1) - \bar{m}(\Delta r_2) - \bar{m}(\Delta r_3)^*, \quad (41)$$

где $\bar{m}(r_0)$ - математическое ожидание начального внутреннего зазора шарикоподшипника, мм;

$\bar{m}(\Delta r_1)$ - математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от посадочного натяга, мм;

$\bar{m}(\Delta r_2)$ - математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от углового смещения колец, мм;

* Учет составляющей $\bar{m}(\Delta r_3)$ проводить при наличии достоверных данных.

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв. № Абраксага
Инв № подшипника

$\bar{m}(\Delta r_3)$ – математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от перепада температуры между кольшами, мм;

$$\bar{m}(r_0) = \frac{r_{0\max} + r_{0\min}}{2}, \quad (42)$$

где $r_{0\max}$ – максимальный начальный внутренний зазор шарикоподшипника, мм;

$r_{0\min}$ – минимальный начальный внутренний зазор шарикоподшипника, мм;

$$\bar{m}(\Delta r_3) = \gamma \bar{m}(\delta), \quad (43)$$

где γ – коэффициент влияния посадочного натяга;

$\bar{m}(\delta)$ – математическое ожидание посадочного натяга, мм;

$$\gamma = \frac{d_2}{d_B} \frac{d^2 - d_1^2}{d_2^2 - d_1^2}; \quad (44)$$

$$d_2 = d_{cp} - \frac{d_w}{2}, \quad (45)$$

где d_B – номинальный посадочный диаметр вала, мм;

d_1 – номинальный внутренний диаметр вала кольцеобразного сечения, мм;

d_2 – условный наружный диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;

$$\bar{m}(\delta) = \bar{\sigma} \left(0,4 e^{-\frac{\bar{m}^2(y)}{2\bar{\sigma}^2}} - 0,00442 \right) + \bar{m}(y) P_U, \quad (46)$$

где $\bar{m}(y)$ – математическое ожидание зазора или натяга, мм;

$\bar{\sigma}$ – среднее квадратическое отклонение зазора или натяга, мм;

P_U – вероятность возникновения натяга при посадке шарикоподшипника;

$$\bar{m}(y) = \frac{\delta_{max} - \Delta_{max}}{2}; \quad (47)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\delta_{max} + \Delta_{max}}{6}, \quad (48)$$

где Δ_{max} – максимальный зазор при посадке шарикоподшипника, мм;

δ_{max} – максимальный натяг при посадке шарикоподшипника, мм.

Вероятность возникновения натяга при посадке шарикоподшипника (P_U) определяется по формуле

$$P_U = \frac{1}{\bar{\sigma} \sqrt{2\pi}} \int_0^{\delta_{max}} e^{-\frac{[\bar{x} - \bar{m}(y)]^2}{2\bar{\sigma}^2}} dx = 0,5 + \Phi \left[\frac{\bar{m}(y)}{\bar{\sigma}} \right]. \quad (49)$$

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв. № Дубликата
Инв. № подлинника

При этом

$$\bar{m}(\Delta r_2) = 0,278 B_y \varphi_{max}^2, \quad (50)$$

где B_y - коэффициент влияния углового смещения, мм;

φ - угловое смещение колец шарикоподшипника, рад;

$$B_y = 12,5 \frac{d_{cp}^2}{d_{sh}}; \quad (51)$$

$$\varphi_{max} = \frac{4\bar{m}(e_o)}{S_o}; \quad (52)$$

$$\bar{m}(\Delta r_3) = C_T \bar{m}(\Delta t), \quad (53)$$

где C_T - коэффициент влияния перепада температуры между кольцами шарикоподшипника;

$$C_T = \alpha_r d_K, \quad (54)$$

где α_r - коэффициент линейного температурного расширения стали, 1/мм ($\alpha_r = 11 \cdot 10^{-6}$);

d_K - диаметр беговой дорожки внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;

$\bar{m}(\Delta t)$ - математическое ожидание перепада температуры между кольцами шарикоподшипника, $^{\circ}\text{C}$.

$$\bar{m}(\Delta t) = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2}, \quad (55)$$

где Δt_{max} , Δt_{min} - верхнее и нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами, $^{\circ}\text{C}$.

Среднее квадратическое отклонение рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника ($\sigma(r_p)$) в миллиметрах определяется по формуле

$$\sigma(r_p) = \sqrt{D(r_p)}, \quad (56)$$

где $D(r_p)$ - дисперсия рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника, мм^2 ;

$$D(r_p) = D(r_0) + D(\Delta r_1) + D(\Delta r_2) + D(\Delta r_3), \quad (57)$$

где $D(r_0)$ - дисперсия начального значения внутреннего зазора шарикоподшипника, мм^2 ;

$D(\Delta r_1)$ - дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора от посадочного натяга, мм^2 ;

$D(\Delta r_2)$ - дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора от углового смещения колец, мм^2 ;

$D(\Delta r_3)$ - дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора от перепада температуры между кольцами, мм^2 .

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв № Дубликата
Инв. № подлинника

$$D(r_o) = \frac{(r_{o\max} - r_{o\min})^2}{36}; \quad (58)$$

$$D(\Delta r_1) = \gamma^2 D(\delta), \quad (59)$$

где $D(\delta)$ – дисперсия посадочного натяга, мм^2 ;

$$D(\delta) = \bar{m}(\delta)[\bar{m}(y) - \bar{m}(\delta)] + \bar{\sigma}_y^2 P_U - 0,00442 \delta_{\max} \bar{\sigma}_y, \quad (60)$$

$$D(\Delta r_2) = 0,028 B_y^2 \varphi_{\max}^4, \quad (61)$$

$$D(\Delta r_3) = C_r^2 D(\Delta t), \quad (62)$$

где $D(\Delta t)$ – дисперсия величины перепада температуры между кольцами, $^{\circ}\text{C}$;

$$D(\Delta t) = \frac{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})^2}{36}. \quad (63)$$

4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБМОТОК

Расчет вероятности безотказной работы обмоток ($P_{обм}(t)$) производится по формуле

$$P_{обм}(t) = \prod_{i=1}^{m_0} P_{обм_i}(t), \quad (64)$$

где m_0 – число обмоток;

$P_{обм_i}(t)$ – вероятность безотказной работы i -й обмотки;

$$P_{обм_i}(t)^* = P_{к.з} P_{обр} P_n = e^{-(\lambda_{к.з} + \lambda_{обр} + \lambda_n)t}, \quad (65)$$

где $P_{к.з}$ – вероятность невозникновения отказа от короткого замыкания обмотки;

$P_{обр}$ – вероятность невозникновения отказа от обрыва обмотки;

P_n – вероятность невозникновения отказа от обрыва паяного контакта;

$\lambda_{к.з}$ – интенсивность коротких замыканий обмоток, 1/ч, определяемая по формуле

$$\lambda_{к.з} = \lambda_{0к.з} w e^{\alpha_r (\theta_{oc} + \Delta\theta - \theta_n)}, \quad (66)$$

где $\lambda_{0к.з}$ – интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости, в зависимости от типа, электрической машины, исполнения обмотки и условий эксплуатации, 1/ч;

w – число витков обмотки;

* Отказы, вызванные износом и старением изоляции в пределах срока службы электрических машин, не учитываются.

№ изм.
№ изв.

5813

Инв. №: Дубликата
Инв. №: подлинника

α_7 - температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции, $1/^\circ\text{C}$;

θ_{oc} - температура охлаждающей среды, $^\circ\text{C}$;

$\Delta\theta$ - перегрев обмотки относительно температуры окружающей среды при работе, $^\circ\text{C}$;

θ_n - предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы, $^\circ\text{C}$;

$\lambda_{обр}$ - интенсивность обрыва обмотки, определяемая:

1) для генераторов $\lambda_{обр} = 2\lambda_{K3}$;

2) для электродвигателей электромеханизмов $\lambda_{обр} = 0,80 \lambda_{K3}$;

3) для трансформаторов $\lambda_{обр} = 0,25 \lambda_{K3}$;

λ_n - интенсивность обрыва паяного контакта, определяемая по формуле

$$\lambda_n = m_n \lambda_{опк}, \quad (67)$$

где m_n - число паяных контактов;

$\lambda_{опк}$ - интенсивность отказов одного паяного контакта, $1/\text{ч}$;

$\lambda_{опк} = 0,002 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - для паяк с механическим закреплением (неподвижных);

$\lambda_{опк} = 0,006 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - для паяк вращающихся контактов;

$\lambda_{опк} = 0,005 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - для обычных паяк (неподвижных).

Значение θ_{oc} берется из ТЗ или ТУ на электрическую машину.

Значения w , m_n определяются по конструкторской документации на электрическую машину.

Значение $\Delta\theta$ берется из теплового расчета электрических машин или из материалов тепловых испытаний опытных образцов.

Значения θ_n и α_7 выбираются в соответствии с табл. 6.

Таблица 6

Инв. № дубликата	Инв. № подлинника	Обозначение класса нагревостойкости электроизоляционного материала	Максимально допустимая температура нагрева (длительная) изоляционного материала, $^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент нагревостойкости α_7 , $1/^\circ\text{C}$	Предельно допустимая температура нагрева изоляции θ_n , $^\circ\text{C}$			
					Срок службы, ч			
					500	1000	10000	20000
5813		A	105	0,060 - 0,090	160	150	115	105
		B	130	0,070 - 0,075	205	190	145	130
		Г	155	0,060 - 0,065	220	205	165	155
		Н	180	0,050 - 0,550	235	225	190	180
		200	200	0,040 - 0,045	260	250	210	200
		220	220	0,035 - 0,040	285	270	225	220

Значение θ_n может быть также определено из графика, приведенного в приложении 1.

Значение величины λ_{OK3} выбирается в соответствии с табл. 7.

Таблица 7

№ изм. № изв.	Вид обмотки	Конструктивное исполнение	Обозначение класса нагревостойкости электроизоляционного материала	Интенсивность отказа одного витка обмотки $\lambda_{\text{OK3}} \cdot 10^6$, 1/ч
	Обмотка возбуждения и ротора переменного тока при коротком замыкании внутри одной из фаз	Катушечная рядовая из круглого и прямоугольного провода на полюсах статора	A B Г Н 200 220	0,03 0,10 0,25 0,15 0,05 -
		Катушечная рядовая из прямоугольного провода вращающаяся	В	0,01
		Катушечная нерядовая из круглого тонкого провода на полюсах статора	A B Г Н 200 220	0,01 0,40 0,10 0,06 -
	Обмотка якоря постоянного тока и ротора переменного тока при коротком замыкании между фазами	Обмотка, распределенная в пазах из прямоугольного провода, шаблонированная	A B Г Н 200 220	0,10 0,03 0,01 0,03 -
5813		Обмотка, распределенная в пазах из круглого провода, всыпная или ручная намотка	A B Г Н 200 220	0,02 0,01 0,05 0,03 -
Изв. № дубликата	Обмотка статора переменного тока	Обмотка, распределенная в пазах из круглого провода, всыпная или ручная намотка	A B Г Н 200 220	0,55 0,04 0,25 0,15 -
Изв. № подлинника				0,30

Продолжение табл. 7

Вид обмотки	Конструктивное исполнение	Обозначение класса нагревостойкости электрической изоляции материала	Интенсивность отказа одного витка обмотки $\lambda_{OK3} \cdot 10^6$, 1/ч
Обмотка статора переменного тока	Обмотка, распределенная в пазах, из прямоугольного провода, шаблонированная	A	1,55
		B	1,00
		Г	0,60
		Н	0,40
		200	0,07
		220	-
Обмотка электромагнитных муфт	Катушечная рядовая из круглого провода	A	0,02
		B	0,02
		Г	0,15
		Н	0,10
		200	-
		220	0,06
	Катушечная рядовая из прямого угольного провода	B	0,25

Для получения видов отказов генератора из-за отказа обмоток необходимо проанализировать, какие виды отказов обмоток приводят к снижению напряжения, короткому замыканию в якоре генератора и т.д., и просуммировать отдельно интенсивности этих видов отказов.

5. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ВСТРОЕННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ОСНОВНОГО ГЕНЕРАТОРА, СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКА ЯКОРЯ ОСНОВНОГО ГЕНЕРАТОРА и т.п.)

5.1. Под встроенным выпрямительным устройством понимается совокупность m_f параллельных цепей, каждая из которых состоит из фазы обмотки, диода и одного или двух паяных контактов в зависимости от типа схемы выпрямления.

5.2. Исходя из формулировки критерия отказа конкретного выпрямительного устройства, т.е. в зависимости от максимального количества фаз, при потере мощности которых выпрямительное устройство исправно, и, используя приемы теории вероятности, составляются формулы для определения вероятности безотказной работы выпрямительного устройства.

№ ИЗМ. / № ИЗВ.

5813

Инв. № дубликата
Инв. № подлинника

5.3. В случае, когда не допустима потеря мощности ни одной из фаз, вероятность безотказной работы выпрямительного устройства ($P_{\delta(0)}(t)$) определяется по формуле

$$P_{\delta(0)}(t) = P_{1\varphi}^{m_\varphi}(t) P_{2\varphi}(t), \quad (68)$$

где m_φ – число фаз в выпрямительном устройстве;

$P_{1\varphi}(t)$ – вероятность отсутствия отказов, приводящих к потере мощности одной фазы, определяемая по формуле

$$P_{1\varphi}(t) = e^{-(\lambda_{\text{обр обм}} + \lambda_\delta + K_1 \lambda_{\text{пр}} + K_2 \lambda_\pi + \lambda_{\text{кз обм}})t}, \quad (69)$$

где $\lambda_{\text{обр обм}}$ – интенсивность обрывов обмотки в одной фазе, 1/ч;

λ_δ – интенсивность отказов диода с учетом режима работы и условий эксплуатации, 1/ч;

K_1 – количество паяк в фазе обмотки;

$\lambda_{\text{пр}}$ – интенсивность обрывов проводов одной обмотки, 1/ч;

K_2 – количество паяк на диодах от одной фазы обмотки;

λ_π – интенсивность обрывов паяных контактов диодов, 1/ч;

$\lambda_{\text{кз обм}_1}$ – интенсивность коротких замыканий обмоток, приводящих к потере мощности одной фазы, 1/ч;

$P_{2\varphi}(t)$ – вероятность отсутствия отказов, приводящих к потере мощности двух фаз, определяемая по формуле

$$P_{2\varphi}(t) = e^{-\lambda_{\text{кз обм}_2} t}, \quad (70)$$

где $\lambda_{\text{кз обм}_2}$ – интенсивность коротких замыканий обмоток между фазами, приводящая к потере мощности двух фаз, 1/ч.

5.4. В случае, когда допустима потеря мощности одной фазы, вероятность безотказной работы выпрямительного устройства ($P_{\delta(1)}(t)$) определяется по формуле

$$P_{\delta(1)}(t) = \left\{ P_{1\varphi}^{m_\varphi}(t) + m_\varphi P_{1\varphi}^{m_\varphi-1}(t) \left[1 - P_{1\varphi}(t) \right] \right\} P_{2\varphi}(t). \quad (71)$$

5.5. В случае, когда допустима потеря s_φ фаз из m_φ фаз, вероятность безотказной работы выпрямительного устройства ($P_{\delta(s_\varphi)}(t)$) определяется по формуле

$$P_{\delta(s_\varphi)}(t) \approx 1 - \left\{ C_{m_\varphi}^{s_\varphi+1} \left(1 - P_{1\varphi}(t) \right)^{s_\varphi+1} + C_{m_\varphi}^{s_\varphi+1} \left(1 - P_{2\varphi}(t) \right)^{s_\varphi+1} \right\}, \quad (72)$$

где $C_{m_\varphi}^{s_\varphi+1}$ – число сочетаний из m_φ по $s_\varphi+1$; $C_{m_\varphi}^{s_\varphi+1} = \frac{m_\varphi!}{(m_\varphi - s_\varphi - 1)! (s_\varphi + 1)!}$;

№ изм.	
№ изм.	

	5813
--	------

Инв. № Дубликата	
Инв. № подлинника	

$\left[\frac{S_{\varphi}}{2} \right]$ - ближайшее целое, не более $\frac{S_{\varphi}}{2}$; $\left[\frac{S_{\varphi}}{2} \right] \leq \frac{S_{\varphi}}{2}$.

5.6. Интенсивность отказов выпрямительного устройства определяется следующим образом:

$$\lambda_B = \begin{cases} \frac{\ln \frac{1}{P_B(t)}}{t} & \text{при } P_B \leq 0,99; \\ \frac{1 - P_B(t)}{t} & \text{при } P_B > 0,99. \end{cases} \quad (73)$$

6. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА

6.1. Вероятность безотказной работы щеточно-коллекторного узла ($P_{щ.к.}$) вследствие износа щеток определяется по формуле

$$P_{щ.к.} = P_{щ.н.}(t) P_{пос.}(t_2), \quad (74)$$

где t_2 - время между регламентными работами, ч;

$P_{щ.н.}(t)$ - вероятность невозникновения внезапных отказов щеточно-коллекторного узла, определяемая по формуле

$$P_{щ.н.}(t) = \prod_{i=1}^{m_{щ.д}} P_{щ.д_i} \prod_{i=1}^{m_{щ}} P_{кол_i} \prod_{i=1}^{m_{щ.н.щ}} P_{вн.щ_i} = e^{-(\lambda_{щ.д} m_{щ.д} + \lambda_{кол} m_{щ} + \lambda_{вн.щ} m_{щ.н.щ}) t}, \quad (75)$$

где $m_{щ.д}$ - число щеткодержателей;

$P_{щ.д_i}$ - вероятность безотказной работы щеткодержателя;

$P_{кол}$ - вероятность безотказной работы коллектора;

$m_{щ}$ - число щеток;

$P_{вн.щ_i}$ - вероятность невозникновения внезапных отказов щетки;

$\lambda_{щ.д}$ - интенсивность отказов щеткодержателя, 1/ч;

$\lambda_{кол}$ - интенсивность отказов коллектора, 1/ч;

$\lambda_{вн.щ}$ - интенсивность внезапных отказов щетки, 1/ч.

Значения $m_{щ.д}$ и $m_{щ}$ определяются по конструкторской документации.

Значения $\lambda_{щ.д}$, $\lambda_{кол}$ и $\lambda_{вн.щ}$ выбираются в соответствии с табл. 8.

№ ИЗМ.

№ ИЗВ.

5813

Инв. № дубликата

Инв. № подлинника

Таблица 8

Тип электрической машины	Интенсивность отказов щеткодержате- лей' $\lambda_{щд} \cdot 10^6$, 1/ч	Интенсивность отказов коллектора (контактное кольцо) $\lambda_{кол} \cdot 10^6$, 1/ч	Интенсивность внезапных отказов щетки $\lambda_{внщ} \cdot 10^6$, 1/ч
Генератор			
постоянного тока	0,20	0,23	0,60
переменного тока	2,00	0,16	0,70
Электромагнитный преобразователь:			
однофазный	3,40	4,60	8,00
трехфазный	0,27	3,10	7,20
Электродвигатель постоянного тока типа:			
МП	0,30	0,70	0,80
МВ	1,40	3,20	4,00
МГП	1,80	3,70	5,20
Электродвигатель электромеханизма:			
поступательного движения	0,06	0,10	0,10
вращательного движения одно- моторный	0,02	0,40	0,30
вращательного движения двух- моторный	0,01	0,20	0,02

К постепенным отказам щеточно-коллекторного узла относится износ щеток. Износ коллектора по сравнению с износом щеток, как показывает опыт эксплуатации, ничтожно мал и поэтому в расчет не принимается.

Вероятность невозникновения постепенных отказов щеточно-коллекторного узла ($P_{пос}(t_2)$) определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 P_{пос}(t_2) = P(h_{ocm} \geq h_{kp}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(h_{ocm})} \int_{h_{kp}}^{h_0} e^{-\frac{(h_{ocm} - \bar{m}(h_{ocm}))^2}{2\sigma^2(h_{ocm})}} d(h_{ocm}) = \\
 &= \Phi\left(\frac{h_0 - \bar{m}(h_{ocm})}{\sigma(h_{ocm})}\right) - \Phi\left(\frac{h_{kp} - \bar{m}(h_{ocm})}{\sigma(h_{ocm})}\right), \quad (76)
 \end{aligned}$$

где h_{ocm} – величина оставшейся части щетки после расчетного времени работы t_2 , мм;

h_{kp} – критическая высота щетки, мм;

№ изм.
№ изв.

5813

Изв № дубликата
Изв № подлинника

h_0 – первоначальная высота щетки, мм;

ϕ – функция Лапласа.

Математическое ожидание $\bar{m}_{(h_{0cm})}$ и среднее квадратическое отклонение величины оставшейся части щетки после расчетного времени работы $\sigma_{(h_{0cm})}$ определяются по формулам:

$$\bar{m}_{(h_{0cm})} = h_0 - \bar{m}_{(h_{UZH})}, \quad (77)$$

$$\sigma_{(h_{0cm})} = \sigma_{(h_{UZH})}, \quad (78)$$

где h_{UZH} – высота износившейся части щетки за расчетное время работы, мм.

Имея зависимость

$$h_{UZH} = V_{UZH} t_2, \quad (79)$$

следует

$$\bar{m}_{(h_{UZH})} = \bar{m}_{(V_{UZH})} t_2, \quad (80)$$

$$\sigma_{(h_{UZH})} = \sigma_{(V_{UZH})} t_2, \quad (81)$$

где V_{UZH} – скорость износа щетки, мм/ч.

Математическое ожидание ($\bar{m}_{(V_{UZH})}$) и среднее квадратическое отклонение скорости износа щеток ($\sigma_{(V_{UZH})}$) определяются по формулам:

$$\bar{m}_{(V_{UZH})} = 10^4 a_1 j_p + a_2 t_{u4} + 10^{-3} a_3 V_0 + 10^{-2} a_4 F_0 + a_5 \gamma_K + a_6 B_K; \quad (82)$$

$$\sigma_{(V_{UZH})} = 0,2 \bar{m}_{(V_{UZH})}, \quad (83)$$

где j_p – поверхностная плотность силы тока под щеткой, А/см²;

t_{u4} – температура щетки, °C;

V_0 – окружная скорость частоты вращения ротора, мм/с;

F_0 – давление на щетку, Па;

γ_K – степень коммутации;

B_K – биение коллектора, мм;

$a_1 - a_6$ – коэффициенты влияния на величину износа щеток.

Значения h_0 , j_p и F_0 определяются из расчетных формуляров, чертежей на электрические машины.

Значения t_2 и h_{kp} определяются из технических условий.

Значение V определяется для каждой электрической машины по заданному в ТЗ циклу вращения.

Значения t_{u4} , γ_K и B_K устанавливаются по данным испытаний.

Значения коэффициентов $a_1 - a_6$ выбираются в соответствии с табл. 9.

В случае отсутствия коэффициентов влияния для определенного типа щеток берутся средние значения этих коэффициентов

6.2. Если необходимо получить более точные значения вероятности безотказной работы щеток, допустимо применение распределения Вейбулла-Гнеденко, параметры которого определяются по имеющейся статистике.

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Изв № дубликата
Изв № подлинника

Таблица 9

Тип электрической машины	Обозначение марки щетки				
		α_5		α_6	
		н/ле	на высоте	на земле	на высоте
Генератор	МГС-5	$2,0^{-3}$	$7,30 \cdot 10^{-3}$	$8,70 \cdot 10^{-1}$	$8,80 \cdot 10^{-1}$
	МГС-7	$6,0^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$8,20 \cdot 10^{-1}$	$5,10 \cdot 10^{-1}$
	МГС-7И	$7,0^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$8,60 \cdot 10^{-1}$	$9,20 \cdot 10^{-1}$
	Г-24	$6,0^{-3}$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-1}$	$1,70 \cdot 10^{-1}$
	Г-27	$6,0^{-3}$	-	$3,00 \cdot 10^{-1}$	-
Электродвигатель		$2,0^{-3}$	$5,62 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-1}$	$5,58 \cdot 10^{-1}$
	МГС-5	$2,0^{-4}$		$0,20 \cdot 10^{-1}$	
		$3,0^{-3}$		$2,10 \cdot 10^{-2}$	
	МГС-8	$6,0^{-2}$		$3,60 \cdot 10^{-1}$	
	Г-21А	$1,0^{-3}$		$1,80 \cdot 10^{-2}$	
Преобразователь		$2,0^{-3}$	-	$1,00 \cdot 10^{-1}$	-
	МГС-8	$5,0^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$2,10 \cdot 10^{-1}$
	Г-27	$7,0^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$1,70 \cdot 10^{-1}$
	МГС-7	$2,0^{-5}$	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$
	МГС-7И	$8,0^{-4}$	$13,40 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$
		$6,0^{-4}$	$6,00 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$

№ 434
№ 436.

5813

Исп. № Абракадара
Исп. № подлинника

6.3. Допускается использование для расчета вероятности возникновения отказов щеточно-коллекторного узла других математических моделей при наличии достаточного объема статистики при различных условиях эксплуатации.

6.4. Интенсивность отказов щеточно-коллекторного узла ($\lambda_{щ.к}$) определяется следующим образом:

$$\lambda_{щ.к} = \frac{\ln \frac{1}{P_{щ.к}}}{t} \quad \text{при } P_{щ.к} \leq 0,99; \quad (84)$$

$$\lambda_{щ.к} = \frac{1 - P_{щ.к}}{t} \quad \text{при } P_{щ.к} > 0,99. \quad (85)$$

6.5. Средняя наработка на отказ щеточно-коллекторного узла ($T_{щ.к}$) в часах определяется по формуле

$$T_{щ.к} = \frac{t}{\ln \frac{1}{P_{щ.к}}} \quad \text{при } P_{щ.к} \leq 0,99; \quad (86)$$

$$T_{щ.к} = \frac{t}{1 - P_{щ.к}} \quad \text{при } P_{щ.к} > 0,99. \quad (87)$$

7. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРОЧИХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

7.1. Вероятность безотказной работы прочих узлов и деталей (электромагнитных муфт торможения, сцепления-торможения, редуктора, обгонных и храповых муфт, клеммных панелей, соединителей электрических и т.д.), не имеющих резервирования ($P_{пр}(t)$), определяется по формуле

$$P_{пр}(t) = e^{-\sum_{i=1}^{m_{пр}} \lambda_{пр} t}, \quad (88)$$

где $m_{пр}$ – число прочих узлов и деталей.

В случае наличия резервирования $P_{пр}(t)$ определяется исходя из структурных схем соединения прочих узлов и деталей

7.2. Средние значения интенсивностей отказов прочих узлов и деталей приведены в табл. 10.

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Изв № Дубликата
Изв. № подлинника

Таблица 10

Наименование прочих узлов и элементов, входящих в электрическую машину	Интенсивность отказов $\lambda_{pr} \cdot 10^6$, 1/ч
Электромагнитная муфта торможения*	0,15
Электромагнитная муфта сцепления-торможения	2,00
Редуктор*	1,50
Обгонная муфта*	0,30
Храповая муфта*	0,20
Клеммная панель	0,50
Расцепитель	0,40

* Уточненные значения интенсивности отказов для конкретных конструктивных исполнений могут быть определены по соответствующим методикам, действующим на предприятии.

Допускается при расчетах новых электрических машин использовать имеющиеся данные по интенсивностям отказов прочих узлов, не вошедших в табл. 10, например, блоков трансформаторов тока, жиклеров, уплотнений и т.д. Интенсивность отказов электрических соединителей рассчитывается в соответствии с Единым справочником по интенсивностям отказов.

7.3. При наличии материалов по результатам сопоставления эксплуатационных и расчетных показателей безотказности по отдельным узлам электрической машины допускается при расчетах вводить поправочные коэффициенты к расчетной интенсивности отказов этих узлов:

$$\lambda_i = K_g \lambda_{p_i}, \quad (89)$$

где K_g – эксплуатационный поправочный коэффициент;

λ_{p_i} – расчетная интенсивность отказов i -го узла электрической машины, 1/ч.

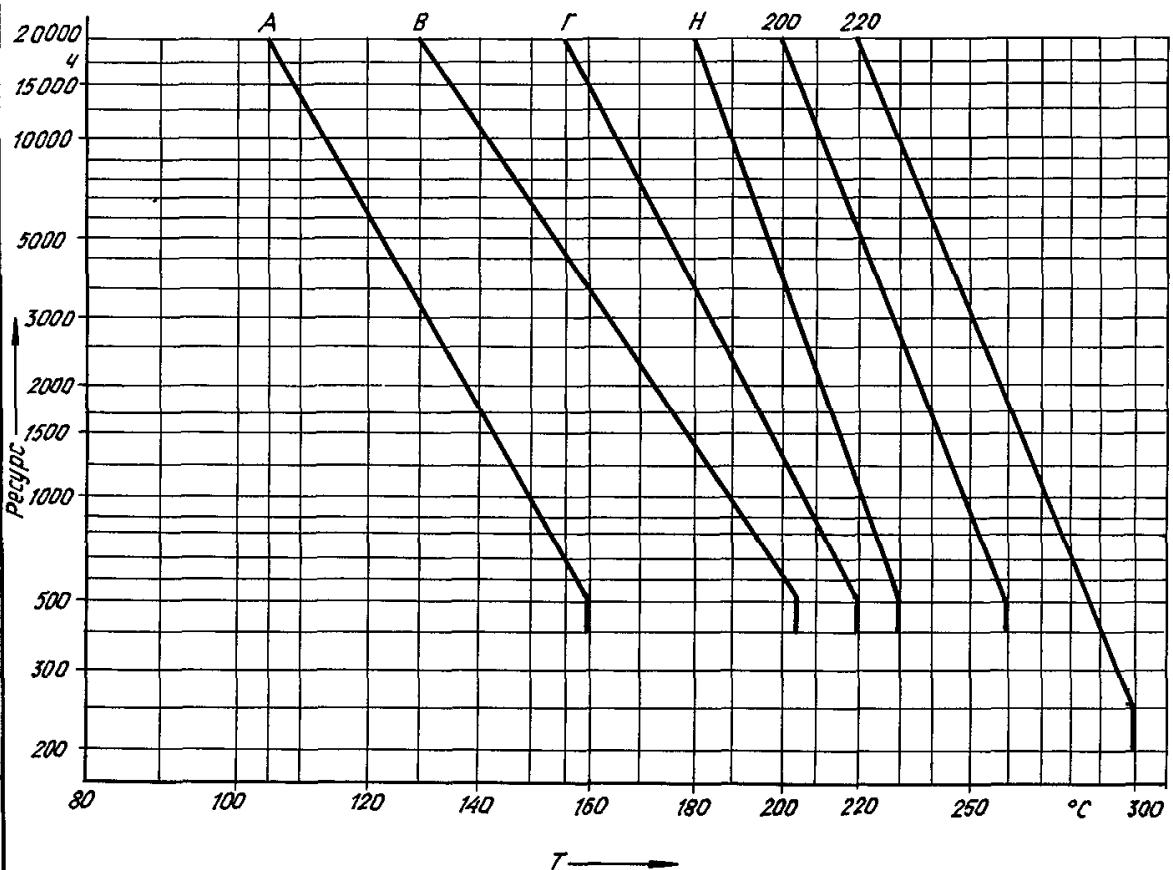
7.4. Пример расчета показателей безотказности электрической машины приведен в приложении 2.

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рекомендуемое

ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ θ_n ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ
ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕСУРСА ИЗДЕЛИЯ



Инв. № Аддиката	
Инв. № подлинника	5813

№ изм.	
№ изм.в.	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Справочное

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ
ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Вероятность безотказной работы генератора в соответствии с ТЗ должна быть определена за 1 ч работы и составлять $P_{3M} \geq 0,99996$.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРА

2.1. По структуре генератор состоит из трех электромашинных агрегатов, двух шарикоподшипников, вращающегося блока диодов и обмоточных элементов.

2.2. В конструктивном исполнении обмоточный узел состоит из пяти обмоток: якоря и возбуждения основного генератора, якоря и возбуждения возбудителя, якоря подвозбудителя.

Класс нагревостойкости электроизоляционного материала обмоток – С.

2.3. По конструктивному исполнению:

обмотка якоря основного генератора – распределенная в пазах из прямоугольного провода;

обмотка возбуждения основного генератора – катушечная рядовая из круглого провода;

обмотка возбуждения возбудителя – катушечная рядовая из круглого провода;

обмотка якоря возбудителя – распределенная в пазах из круглого провода;

обмотка якоря подвозбудителя – распределенная в пазах из круглого провода.

2.4. Шарикоподшипниковый узел состоит из двух опорных шарикоподшипников – радиальных и закрытого типа.

Соединение между ведущим и ведомым валом – шлицевое.

2.5. Вращающийся блок диодов соединен в однополупериодную схему.

2.6. Охлаждение генератора воздушное путем продува забортным воздухом

2.7. Общая формула для расчета данного генератора

$$P_{3M}(t) = P_{ш}(t) P_{обM}(t) P_{БK}(t). \quad (90)$$

Инв № дубликата	5813
Инв № подлинника	

3. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ
ШАРИКОПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА

3.1. Исходные данные:

- | | |
|-------------------------------|---|
| $m_w = 2$ | - число шарикоподшипниковых узлов в машине; |
| $N = 1$ | - число типовых режимов работы электрической машины за время полета; |
| $t = 1 \text{ ч}$ | - время полета; |
| $\pi_j = 8000 \text{ об/мин}$ | - частота вращения электрической машины в j -м типовом режиме работы; |
| $T_{1p} = 3000 \text{ ч}$ | - технический ресурс машины до первого ремонта; |
| $t = 3000 \text{ ч}$ | - длительность типового режима работы в данном интервале; |
| $m_{TK_1} = 1$ | - число рядов тел качения в 1-м шарикоподшипнике; |
| $m_{TK_2} = 1$ | - число рядов тел качения во 2-м шарикоподшипнике; |
| $d_{w_1} = 12,70 \text{ мм}$ | - диаметр шарика 1-го шарикоподшипника; |
| $d_{w_2} = 11,11 \text{ мм}$ | - диаметр шарика 2-го шарикоподшипника; |
| $\alpha_1 = 0^\circ$ | - номинальный угол контакта 1-го шарикоподшипника; |
| $\alpha_2 = 0^\circ$ | - номинальный угол контакта 2-го шарикоподшипника; |
| $Z_1 = 9$ | - число тел качения в одном ряду 1-го шарикоподшипника; |
| $Z_2 = 9$ | - число тел качения в одном ряду 2-го шарикоподшипника; |
| $D_{01} = 60,0 \text{ мм}$ | - диаметр окружности центров комплекта шариков 1-го шарикоподшипника; |
| $D_{02} = 53,5 \text{ мм}$ | - диаметр окружности центров комплекта шариков 2-го шарикоподшипника; |
| $G_1 = 10,8 \text{ кг}$ | - масса ротора основного генератора; |
| $G_2 = 1,9 \text{ кг}$ | - масса ротора возбудителя; |
| $G_3 = 0,5 \text{ кг}$ | - масса ротора подвозбудителя; |
| $l = 3$ | - количество элементов ротора, дающих нагрузку на шарикоподшипник; |
| $S_1 = 97,5 \text{ мм}$ | - координата точки приложения нагрузки ротора основного генератора; |
| $S_2 = 162,5 \text{ мм}$ | - координата точки приложения нагрузки ротора возбудителя; |
| $S_3 = 207 \text{ мм}$ | - координата точки приложения нагрузки ротора подвозбудителя; |
| $\alpha_{d_1} = 0,658$ | - расчетный коэффициент полюсной дуги основного генератора; |
| $\alpha_{d_2} = 0,677$ | - расчетный коэффициент полюсной дуги возбудителя; |
| $\alpha_{d_3} = 0,546$ | - расчетный коэффициент полюсной дуги подвозбудителя; |
| $D_1 = 164,6 \text{ мм}$ | - диаметр ротора основного генератора; |
| $D_2 = 165,0 \text{ мм}$ | - диаметр ротора возбудителя; |
| $D_3 = 84,2 \text{ мм}$ | - диаметр ротора подвозбудителя; |
| $L_1 = 78 \text{ мм}$ | - активная длина ротора основного генератора; |

№ изм.
№ изб.

5813

Инв. № дубликата
Инв. № подлинника

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

- $L_2 = 17$ мм – активная длина ротора возбудителя;
 $L_3 = 14$ мм – активная длина ротора подвозбудителя;
 $B_{\delta_1} = 1,0450$ Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре основного генератора в наиболее длительном режиме работы;
 $B_{\delta_2} = 0,3092$ Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре возбудителя в наиболее длительном режиме работы;
 $B_{\delta_3} = 0,3500$ Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре подвозбудителя в наиболее длительном режиме работы;
 $\delta_1 = 0,7$ мм – номинальное значение воздушного зазора основного генератора;
 $\delta_2 = 0,5$ мм – номинальное значение воздушного зазора возбудителя;
 $\delta_3 = 0,4$ мм – номинальное значение воздушного зазора подвозбудителя;
 $K_{\delta_1} = 1,129$ – коэффициент воздушного зазора основного генератора;
 $K_{\delta_2} = 1,085$ – коэффициент воздушного зазора возбудителя;
 $K_{\delta_3} = 1,065$ – коэффициент воздушного зазора подвозбудителя;
 $m_{a_1} = 2$ – число зазоров, определяющих эксцентрикитет для 1-го шарикоподшипника;
 $m_{a_2} = 3$ – число зазоров, определяющих эксцентрикитет для 2-го шарикоподшипника;
 Δ' – верхнее предельное отклонение на сопрягаемый размер охватывающей детали;
 Δ'' – нижнее предельное отклонение на сопрягаемый размер охватываемой детали.

Для 1-го шарикоподшипника фиксированного:

$$\begin{aligned}\Delta'_{11} &= 0,018 \text{ мм}, \\ \Delta''_{11} &= 0,009 \text{ мм}, \\ \Delta'_{12} &= 0, \\ \Delta''_{12} &= 0,011 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Для 2-го шарикоподшипника плавающего:

$$\begin{aligned}\Delta'_{21} &= 0,018 \text{ мм}, \\ \Delta''_{21} &= 0,027 \text{ мм}, \\ \Delta'_{22} &= 0, \\ \Delta''_{22} &= 0,011 \text{ мм}, \\ \Delta'_{23} &= 0,046 \text{ мм}, \\ \Delta''_{23} &= 0,029 \text{ мм}; \\ r_{01} &= 0,051 \text{ мм} \quad - \text{внутренний радиальный зазор 1-го шарикоподшипника}; \\ r_{02} &= 0,051 \text{ мм} \quad - \text{внутренний радиальный зазор 2-го шарикоподшипника}; \\ m_{\delta_1} &= 1 \quad - \text{число рассматриваемых биений, относящихся к статору,} \\ &\quad \text{для 1-го шарикоподшипника}; \\ m_{\delta_2} &= 2 \quad - \text{число рассматриваемых биений, относящихся к статору,} \\ &\quad \text{для 2-го шарикоподшипника};\end{aligned}$$

№ изм	
№ изв	

5813

Инв № дубликата	
Инв. № подлинника	

- $C_{D_2} = 13700$ Н - статическая радиальная грузоподъемная сила 2-го шарикоподшипника;
 $K_{r_1} = 1,05$ - коэффициент, учитывающий влияние температурного режима 1-го шарикоподшипника;
 $K_{r_2} = 1,00$ - коэффициент, учитывающий влияние температурного режима 2-го шарикоподшипника;
 $X_1 = 1$ - коэффициент динамической радиальной нагрузки 1-го шарикоподшипника;
 $X_2 = 1$ - коэффициент динамической радиальной нагрузки 2-го шарикоподшипника;
 $V_1 = 1$ - коэффициент вращения колец относительно вектора нагрузки 1-го шарикоподшипника;
 $V_2 = 1$ - коэффициент вращения колец относительно вектора нагрузки 2-го шарикоподшипника;
 $\gamma_1 = 0$ - коэффициент динамической осевой нагрузки 1-го шарикоподшипника;
 $\gamma_2 = 0$ - коэффициент динамической осевой нагрузки 2-го шарикоподшипника;
 $K = 3,6$ - коэффициент, зависящий от типа консистентной смазки,
 $r_{0max_1} = 0,051$ мм - максимальный начальный внутренний зазор 1-го шарикоподшипника;
 $r_{0max_2} = 0,051$ мм - максимальный начальный внутренний зазор 2-го шарикоподшипника;
 $r_{0min_1} = 0,033$ мм - минимальный начальный внутренний зазор 1-го шарикоподшипника;
 $r_{0min_2} = 0,033$ мм - минимальный начальный внутренний зазор 2-го шарикоподшипника;
 $d_f^1 = 40$ мм - номинальный посадочный диаметр вала для 1-го шарикоподшипника;
 $d_f^2 = 35$ мм - номинальный посадочный диаметр вала для 2-го шарикоподшипника;
 $d_f^{(3)} = 32,5$ мм - номинальный внутренний диаметр полого вала для 1-го шарикоподшипника;
 $d_f^{(2)} = 27,0$ мм - номинальный внутренний диаметр полого вала для 2-го шарикоподшипника;
 $d_w_1 = 12,70$ мм - диаметр шарика 1-го шарикоподшипника,
 $d_w_2 = 11,11$ мм - диаметр шарика 2-го шарикоподшипника;
 $\Delta_{max_1} = 0,027$ мм - максимальный зазор при посадке 1-го шарикоподшипника,
 $\Delta_{max_2} = 0,027$ мм - максимальный зазор при посадке 2-го шарикоподшипника;
 $b_{max_1} = 0,008$ мм - максимальный натяг при посадке 1-го шарикоподшипника;

- $\delta_{max_2} = 0,008 \text{ мм}$ – максимальный натяг при посадке 2-го шарикоподшипника;
 $d_{cp_1} = 60,0 \text{ мм}$ – средний диаметр 1-го шарикоподшипника;
 $d_{cp_2} = 53,5 \text{ мм}$ – средний диаметр 2-го шарикоподшипника;
 $d_{x_1} = 47,300 \text{ мм}$ – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца 1-го шарикоподшипника;
 $d_{x_2} = 42,387 \text{ мм}$ – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца 2-го шарикоподшипника;
 $\Delta t_{max_1} = 15 {}^\circ\text{C}$ – верхнее возможное значение перепада температуры между кольцами 1-го шарикоподшипника;
 $\Delta t_{max_2} = 15 {}^\circ\text{C}$ – верхнее возможное значение перепада температуры между кольцами 2-го шарикоподшипника;
 $\Delta t_{min_1} = 5 {}^\circ\text{C}$ – нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами 1-го шарикоподшипника;
 $\Delta t_{min_2} = 10 {}^\circ\text{C}$ – нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами 2-го шарикоподшипника;
 $t_w = 120 {}^\circ\text{C}$ – температура нагрева шарикоподшипника.

3.2. Вероятность невозникновения усталостного разрушения шарикоподшипника определяется по формуле (8)

$$P_i(L_p) = e^{-0,143 \left[\left(\frac{L_{pT}}{L_{H_i}} - 0,25 \right)^{1,11} - \left(\frac{L_{pT} - L_p}{L_{H_i}} - 0,25 \right)^{1,11} \right]}$$

3.3. Наработка шарикоподшипников в течение расчетного времени определяется по формуле (9)

$$L_p = 60 \sum_{j=1}^N n_j t_j,$$

$$L_p = 60 \cdot 8000 \cdot 3000 = 1440000000 \text{ циклов вращения.}$$

3.4. Наработка шарикоподшипников в течение технического ресурса генератора до 1-го ремонта определяется по формуле (10)

$$L_{pT} = L_p \frac{T_{1p}}{t_1},$$

$$L_{pT} = 144 \cdot 10^7 \frac{3000}{1} = 4,32 \cdot 10^{12} \text{ циклов вращения.}$$

3.5. Математическое ожидание эксцентриситета воздушного зазора определяется по формулам (18) и (19)

$$\bar{m}(e_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_a} m_i(e_0),$$

$$\bar{m}_i(e_0) = 0,25 \left(\sum_{i=1}^{m_a} \Delta_i + r_{0i} \right) + 0,21 \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{m_B} b_{i(H)}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{m_B} b_{i(B)}^2} \right).$$

№ АУДИКата	
№ ИЗВ.	

5813

Изв. № АУДИКата	
Изв. № подлинника	

Максимально возможный посадочный зазор определяется по формуле (20)

$$\Delta_i = \Delta'_i - \Delta''_i$$

(Δ проставляется в формулу с учетом знаков).

Для 1-го шарикоподшипника $m_{\Delta_1} = 2$

$$\Delta_i = \Delta'_i - \Delta''_i = 0,018 + 0,009 = 0,027 \text{ мм.}$$

$$\Delta_{12} = \Delta'_{12} - \Delta''_{12} = 0 + 0,011 = 0,011 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника $m_{\Delta_2} = 3$

$$\Delta_{21} = \Delta'_{21} - \Delta''_{21} = 0,018 + 0,009 = 0,027 \text{ мм.}$$

$$\Delta_{22} = \Delta'_{22} - \Delta''_{22} = 0 + 0,011 = 0,011 \text{ мм.}$$

$$\Delta_{23} = \Delta'_{23} - \Delta''_{23} = 0,046 + 0,029 = 0,075 \text{ мм}$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(e_o) = 0,25 \cdot (0,027 + 0,011 + 0,051) + 0,21 \left(\sqrt{(0,03)^2} + \sqrt{(0,05)^2} \right) = 0,0390500 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$m_2(e_o) = 0,25 \cdot (0,027 + 0,011 + 0,075 + 0,051) + 0,21 \left(\sqrt{(0,03)^2 + (0,03)^2} + \sqrt{(0,05)^2} \right) = 0,0604095 \text{ мм.}$$

$$m(e_o) = \frac{1}{2} (0,03905 + 0,0604095) = 0,04972975 \text{ мм.}$$

3.6. Жесткость силы одностороннего магнитного притяжения определяется по формуле (17)

$$K_{D_i} = \frac{392 \cdot 10^{-3} \alpha_D \pi L_i (B_{D_i})^2 D}{K_{\delta_i} \delta_{H_i}}.$$

Для основного генератора:

$$K_{D_1} = 392 \cdot 10^{-3} \frac{0,658 \pi 164,6 78 (1,0450)^2}{1,129 \cdot 0,7} = 14669,0000 \text{ Н/мм.}$$

Для возбудителя:

$$K_{D_2} = 40 \cdot 10^{-3} \frac{0,677 \pi 165,17 (0,3092)^2}{1,085 \cdot 0,5} = 420,5432 \text{ Н/мм.}$$

Для подвозбудителя:

$$K_{D_3} = 392 \cdot 10^{-3} \frac{0,546 \cdot \pi \cdot 84,2 \cdot 14 \cdot (0,3500)^2}{1,065 \cdot 0,4} = 232,5782 \text{ Н/мм.}$$

3.7. Значение силы ОМП определяется по формуле (16)

$$F_{\delta_i} = K_{D_i} \bar{m}(e_o).$$

Инв. № дубликата	
Инв. № подлинника	5813

Для основного генератора:

$$F_{\delta_1} = 14669,0 \cdot 0,04972975 = 729,4860 \text{ Н.}$$

Для возбудителя

$$F_{\delta_2} = 420,5432 \cdot 0,04972975 = 20,9135 \text{ Н.}$$

Для подвозбудителя.

$$F_{\delta_3} = 232,57826 \cdot 0,04972975 = 11,5660 \text{ Н.}$$

Результаты анализа оформляются в соответствии с табл. 11.

Таблица 11

Наименование элемента ротора	Нагрузка от элемента ротора, Н			Координата точки приложения суммарной нагрузки S_i , мм
	от массы ротора	значение силы ОМП	суммарная нагрузка \bar{G}_i	
Основной генератор	108	729,4860	837,4860	97,5
Возбудитель	19	20,9135	39,9135	162,5
Подвозбудитель	5	11,5660	16,5660	208,0

3.8. Значение реакций в опорах определяется по формулам (21) и (22)

Для 1-го шарикоподшипника

$$R_1 = \frac{\sum_i^m \bar{G}_i (S_0 - S_i) + R_n S_{R_n}}{S_0}.$$

Так как соединение вала шлицевое, то $R_n = 0$.

$$R_1 = \frac{837,486(257,5 - 97,5) + 39,9135(257,5 - 162,5)}{257,5} + \\ + \frac{16,566(257,5 - 207)}{257,5} = 538,3940 \text{ Н.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$R_2 = \frac{\sum_i^m G_i S_i + R_n (S_0 + S_{R_n})}{S_0},$$

$$R_2 = \frac{837,486 \cdot 97,5 + 39,9135 \cdot 162,5 + 16,566 \cdot 207}{257,5} = 355,6160 \text{ Н.}$$

3.9. Расчет осевой нагрузки R_a определяется по формулам (23) и (24).

Для радиального плавающего подшипника:

$$R_{a_n} = \frac{R_R f_{mp}}{2},$$

$$R_{a_n} = 355,616 \frac{0,15}{2} = 26,6712 \text{ Н.}$$

Для фиксированного шарикоподшипника:

$$R_{a_\phi} = A_{01} + 9,81 \cdot G_\Sigma,$$

№ дубликата
№ подлинника

5813

Изв. № дубликата
Изв. № подлинника

$$R_{a\phi} = 0 + 133,4 = 133,4 \text{ Н.}$$

3.10. Динамическая эквивалентная нагрузка для радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников определяется по формуле (13)

$$Q = (R_R X V + R_a Y) K_b K_T.$$

Если $\frac{R_a}{C_0} \leq 0,014$ ($C_0 = 17800 \text{ Н}$), то $X = 1$; $Y = 0$.

$$V_1 = 1; \quad V_2 = 1.$$

$K_{T_1} = 1,05$ (фиксированный шарикоподшипник);

$K_{T_2} = 1,0$ (плавающий шарикоподшипник).

Для 1-го шарикоподшипника. $Q_1 = (R_1 X V_1 + R_a Y) K_b K_{T_1}$,

$$Q_1 = (538,394 \cdot 1 \cdot 1 + 133,4 \cdot 0) \cdot 1,129 \cdot 1,05 = 638,239 \text{ Н.}$$

Для 2-го шарикоподшипника: $Q_2 = (R_2 X V_2 + R_a Y) K_b K_{T_2}$

$$Q_2 = (35,5616 \cdot 1 \cdot 1 + 2,66712 \cdot 0) \cdot 1,129 \cdot 1 = 40,149 \text{ Н}$$

3.11. Динамическая грузоподъемная сила радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников, диаметр шарика которых не превышает 25,4 мм, определяется по формуле (12)

$$C = f_c (m_{r,k} \cos \alpha)^{0,7} Z^{\frac{2}{3}} d_w^{1,8};$$

$$f_c = 59,9.$$

$$C_1 = f_c (m_{r,k} \cos \alpha_1)^{0,7} Z_1^{\frac{2}{3}} d_{w_1}^{1,8}; \quad \alpha = 0^\circ;$$

$$C_1 = 59,9 (1 \cdot \cos 0^\circ)^{0,7} \cdot 9^{\frac{2}{3}} \cdot 12,7^{1,8} = 250684,5 \text{ Н.}$$

$$C_2 = f_c (m_{r,k} \cos \alpha_2)^{0,7} Z_2^{\frac{2}{3}} d_{w_2}^{1,8}$$

$$C_2 = 59,9 (1 \cdot \cos 0^\circ)^{0,7} \cdot 9^{\frac{2}{3}} \cdot 11,11^{1,8} = 197045,3 \text{ Н.}$$

3.12. Номинальная расчетная долговечность шарикоподшипников определяется по формуле (11)

$$L_{H_i} = C_{23} \left(\frac{C_i}{Q_i} \right)^3 \cdot 10^6.$$

Для 1-го шарикоподшипника

$$L_{H_1} = 3,0 \left(\frac{250684,500}{638,239} \right)^3 \cdot 10^6 = 1,81780 \cdot 10^{14} \text{ циклов вращения.}$$

Для 2-го шарикоподшипника

$$L_{H_2} = 3,0 \left(\frac{197045,3}{401,49} \right)^3 \cdot 10^6 = 3,54646 \cdot 10^{14} \text{ циклов вращения}$$

3.13. Вероятность невозникновения усталостного разрушения i -го шарикоподшипника за время последнего полета определяется по формуле (8)

$$P_i(L_p) = e^{-0,143 \left[\left(\frac{L_{H_i}}{L_p} - 0,25 \right)^{1,11} - \left(\frac{L_{B_i} - L_p}{L_p} - 0,25 \right)^{1,11} \right]}.$$

№ изм.	
№ изм.	

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

Если $\frac{L_p}{L_{H_1}} \leq 0,25$, то $P_1(L_p) = 1$.

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\frac{L_p}{L_{H_1}} = \frac{1,44 \cdot 10^9}{1,8178 \cdot 10^{14}} = 7,9216635 \cdot 10^{-6} < 0,25;$$

$$P_1(L_p) = 1.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\frac{L_p}{L_{H_2}} = \frac{1,44 \cdot 10^9}{3,54646 \cdot 10^{14}} = 4,0603869 \cdot 10^{-6} < 0,25;$$

$$P_2(L_p) = 1.$$

3.14. Вероятность обеспечения внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (40)

$$P_1(r_p > 0) = \frac{1}{\sigma(r_p)\sqrt{2\pi}} \int_0^{r_{p_{max}}} e^{-\frac{(r_p - \bar{m}(r_p))^2}{2\sigma^2(r_p)}} dr_p = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{m}(r_p)}{\sigma(r_p)}\right).$$

3.15. Математическое ожидание начального внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (42)

$$\bar{m}(r_o) = \frac{r_{o_{max}} + r_{o_{min}}}{2}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(r_o) = \frac{0,051 + 0,033}{2} = 0,042 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$m_2(r_o) = \frac{0,051 + 0,033}{2} = 0,042 \text{ мм.}$$

3.16. Условный наружный диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника определяется по формуле (45)

$$d_2 = d_{cp} - \frac{d_w}{2}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$d_2(1) = 60 - \frac{12,7}{2} = 53,650 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$d_2(2) = 53,5 - \frac{11,1}{2} = 47,945 \text{ мм.}$$

3.17. Коэффициент влияния посадочного натяга определяется по формуле (44)

$$\gamma = \frac{d_2}{d_o} \cdot \frac{d_o^2 - d_1^2}{d_2^2 - d_1^2}.$$

№ изм.
№ изв.

5813

Мнв. № аубликата
Инс. № подлинника

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\gamma_1 = \frac{53,65}{40} \cdot \frac{40^2 - 32,5^2}{53,65^2 - 32,5^2} = 0,400261.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\gamma_2 = \frac{47,945}{35} \cdot \frac{35^2 - 27^2}{47,945^2 - 27^2} = 0,432846.$$

3.18. Математическое ожидание зазора или натяга определяется по формуле (47)

$$\bar{m}(y) = \frac{\delta_{\max} - \Delta_{\max}}{2}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_1(y) = \frac{0,008 - 0,027}{2} = -0,0095 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_2(y) = \frac{0,008 - 0,027}{2} = -0,0095 \text{ мм.}$$

3.19. Среднее квадратическое отклонение зазора или натяга определяется по формуле (48)

$$\bar{\sigma} = \frac{\delta_{\max} + \Delta_{\max}}{6}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{0,008 + 0,027}{6} = 0,0175 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\bar{\sigma}_2 = \frac{0,008 + 0,027}{6} = 0,0175 \text{ мм.}$$

3.20. Вероятность возникновения натяга при посадке шарикоподшипника определяется по формуле (49)

$$P_U = \frac{1}{\bar{\sigma} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\bar{x}} e^{-\frac{(\bar{x} - \bar{m}(y))^2}{2\bar{\sigma}^2}} dx = 0,5 + \Phi\left[\frac{\bar{m}(y)}{\bar{\sigma}}\right].$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$P_{U_1} = 0,5 + \Phi\left[\frac{-0,0095}{0,0175}\right] = 0,293627.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$P_{U_2} = 0,5 + \Phi\left[\frac{-0,0095}{0,0175}\right] = 0,293627.$$

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

3.21. Математическое ожидание посадочного натяга определяется по формуле
(46)

$$\bar{m}(\delta) = \bar{\sigma} \left(0,4 e^{-\frac{\bar{m}^2(y)}{2\bar{\sigma}^2}} - 0,00442 \right) + \bar{m}(y) P_u.$$

Для 1 и 2-го шарикоподшипников:

$$\begin{aligned} \bar{m}(\delta) &= 0,0175 \left(0,4 e^{-\frac{(0,0095)^2}{2 \cdot 0,0175}} - 0,00442 \right) + (-0,0095) 0,29327 = \\ &= 0,0031741551 \text{ мм} \end{aligned}$$

3.22. Математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от посадочного натяга определяется по формуле (43)

$$\bar{m}(\Delta r_1) = \gamma \bar{m}(\delta)$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(\Delta r_1) = 0,400261 \cdot 0,0031741551 = 0,00127049 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника

$$m_2(\Delta r_1) = 0,432846 \cdot 0,0031741551 = 0,00137390 \text{ мм.}$$

3.23. Коэффициент влияния углового смещения определяется по формуле (51)

$$B_y = 12,5 \frac{d_{cp}^2}{d_u}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$B_y = 12,5 \frac{60^2}{12,7} = 3543,307 \text{ мм/рад}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$B_y = 12,5 \frac{53,5^2}{11,11} = 3220,353 \text{ мм/рад}^2.$$

3.24 Угловое смещение колец шарикоподшипника определяется по формуле (52)

$$\varphi_{max} = \frac{4 \bar{m}(e_0)}{S_0}.$$

Для 1 и 2-го шарикоподшипника:

$$\varphi_{max} = \frac{4 \cdot 0,04972975}{257,5} = 0,00077250097 \text{ рад.}$$

3.25. Математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от углового смещения колец определяется по формуле (50)

$$\bar{m}(\Delta r_2) = 0,278 B_y \varphi_{max}^2.$$

№ ИЗМ.
№ ИЗВ.

5813

Инв. № дубликата
Инв. № подлинника

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(\Delta r_2) = 0,278 \cdot 3543,308 (0,000772)^2 = 0,0005878298 \text{ мм}$$

Для 2-го шарикоподшипника

$$m_2(\Delta r_2) = 0,278 \cdot 3220,352 (0,000772)^2 = 0,0005342522 \text{ мм.}$$

3.26. Коэффициент влияния перепада температуры между кольцами шарикоподшипника определяется по формуле (54)

$$C_T = \alpha_T d_X.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$C_{T_1} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 47,3 = 5,20300 \cdot 10^{-4}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$C_{T_2} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 42,387 = 4,66257 \cdot 10^{-4}.$$

3.27. Математическое ожидание перепада температуры между кольцами шарикоподшипника определяется по формуле (55)

$$\bar{m}(\Delta t) = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_1(\Delta t) = \frac{15 + 5}{2} = 10,0 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_2(\Delta t) = \frac{15 + 10}{2} = 12,5 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

3.28. Математическое ожидание величины уменьшения внутреннего зазора шарикоподшипника от перепада температуры между кольцами определяется по формуле (53)

$$\bar{m}(\Delta r_3) = C_T \bar{m}(\Delta t).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(\Delta r_3) = 5,202 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 5,2020000 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$m_2(\Delta r_3) = 4,66257 \cdot 10^{-4} \cdot 12,5 = 5,8282125 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

3.29. Дисперсия начального значения внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (58)

$$D(r_0) = \frac{(r_{0max} - r_{0min})^2}{36}.$$

Для 1 и 2-го шарикоподшипников:

$$D(r_0) = \frac{(0,051 - 0,033)^2}{36} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2.$$

Инв № дубликата	5813
Инв № подлинника	
Инв №	

3.30. Дисперсия посадочного натяга определяется по формуле (60)

$$D(\delta) = \bar{\sigma}(\delta) [\bar{\sigma}(y) - \bar{\sigma}(\delta)] + \bar{\sigma}_y^2 \rho_u - 0,00442 \cdot \delta_{max} \bar{\sigma}_y.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D(\delta) = 0,0031741551 \cdot [-0,0095 - 0,0031741551] + 0,0175^2 \cdot 0,293627 - 0,00492 \cdot 0,008 \cdot 0,0175 = 4,907474 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2.$$

3.31. Дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора от посадочного натяга определяется по формуле (59)

$$D(\Delta r_1) = \gamma^2 D(\delta).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(\Delta r_1) = 0,400261^2 \cdot 4,907474 \cdot 10^{-5} = 7,86221 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(\Delta r_1) = 0,432846^2 \cdot 4,907474 \cdot 10^{-5} = 9,19443 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2.$$

3.32. Дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора от углового смещения колец определяется по формуле (61)

$$D(\Delta r_2) = 0,028 \cdot B_y^2 q_{max}^4.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(\Delta r_2) = 0,028 \cdot 3543,307^2 \cdot (7,7250097 \cdot 10^{-4})^4 = 1,2518990 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(\Delta r_2) = 0,028 \cdot 3220,353^2 \cdot (7,7250097 \cdot 10^{-4})^4 = 1,0340914 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2.$$

3.33. Дисперсия величины перепада температуры между кольцами определяется по формуле (63)

$$D(\Delta t) = \frac{(\Delta t_{max} - \Delta t_{min})^2}{36}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(\Delta t) = \frac{(15 - 5)^2}{36} \approx 2,7770 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(\Delta t) = \frac{(15 - 10)^2}{36} \approx 0,6964 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.34. Дисперсия уменьшения величины внутреннего зазора соответственно от перепада температуры между кольцами определяется по формуле (62)

$$D(\Delta r_3) = C_t^2 D(\Delta t).$$

№ изм.
№ изв.

5813

Исп. № дубликата
Исп. № подлинника

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(\Delta r_3) = (5,203 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 2,7770 \approx 7,5197800 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(\Delta r_3) = (4,66257 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 0,6963 = 1,5096915 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^2.$$

3.35. Математическое ожидание рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (41)

$$\bar{m}(r_p) = \bar{m}(r_0) - \bar{m}(\Delta r_1) - \bar{m}(\Delta r_2) - \bar{m}(\Delta r_3).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_1(r_p) = 0,042 - 0,00127049 - 0,0005878298 - 0,005203 = 0,03493860 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\bar{m}_2(r_p) = 0,042 - 0,0013739 - 0,0005342521 - 0,0058282125 = 0,03426365 \text{ мм.}$$

3.36. Дисперсия рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (57)

$$D(r_p) = D(r_0) + D(\Delta r_1) + D(\Delta r_2) + D(\Delta r_3).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(r_p) = 9 \cdot 10^{-6} + 7,86221 \cdot 10^{-6} + 1,251899 \cdot 10^{-7} + 7,51979 \cdot 10^{-7} = \\ = 1,773337 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(r_p) = 9 \cdot 10^{-6} + 9,19443 \cdot 10^{-6} + 1,0340914 \cdot 10^{-7} + 1,5096915 \cdot 10^{-7} = \\ = 1,844880 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2.$$

3.37. Среднее квадратическое отклонение рабочего внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (56)

$$\sigma(r_p) = \sqrt{D(r_p)}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\sigma_1(r_p) = \sqrt{1,773337 \cdot 10^{-5}} = 0,0042118 \text{ мм.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\sigma_2(r_p) = \sqrt{1,84488 \cdot 10^{-5}} = 0,0042952 \text{ мм.}$$

Вероятность обеспечения внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (40)

$$P_1(r_p > 0) = \frac{1}{\sigma(r_p)\sqrt{2\pi}} \int_{r_{max}}^{r_p} e^{-\frac{[r_p - \bar{m}(r_p)]^2}{2\sigma^2(r_p)}} dr_p = 0,5 + \Phi\left(\frac{\bar{m}(r_p)}{\sigma(r_p)}\right).$$

№ изм.	
№ изв.	

	5813
--	------

Инв. № дубликата	
Инв. № подлинника	

Для 1-го шарикоподшипника

$$P_1(r_p > 0) = 0,5 + \frac{0,03426365}{0,0042118} = 0,99999999999999862.$$

Для 2-го шарикоподшипника

$$P_2(r_p > 0) = 0,5 + \frac{0,03426362}{0,0042952} = 0,999999999999998010.$$

3.38. Вероятность невозникновения усталостного разрушения шарикоподшипников по причине потери смазкой смазочных свойств определяется по формуле (26)

$$P_{i_{cp}} = e^{-\frac{t}{T_{i_{cp}}}}.$$

3.38.1. Среднее число циклов вращения шарикоподшипников до отказа по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств определяется по формуле (28)

$$\lg L_{i_{cp}} = K + \frac{2800}{273 + t_w},$$

$t_{w_1} = 125^{\circ}\text{C}$ – абсолютная температура нагрева 1-го шарикоподшипника;

$t_{w_2} = 100^{\circ}\text{C}$ – абсолютная температура нагрева 2-го шарикоподшипника

$L_{cp} = 4,455 \cdot 10^{25}$ циклов вращения.

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\lg L_{1_{cp}} = 3,6 + \frac{2800}{125 + 273} = 10,63517;$$

$$\lg L_{2_{cp}} = 3,6 + \frac{2800}{100 + 273} = 11,10670;$$

$L_{1_{cp}} = 4,31688 \cdot 10^{10}$ циклов вращения;

$L_{2_{cp}} = 1,27500 \cdot 10^{11}$ циклов вращения.

3.38.2. Средняя наработка до отказа шарикоподшипника по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств определяется по формуле (27)

$$T_{i_{cp}} = \frac{L_{i_{cp}}}{60 \cdot \pi}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$T_{1_{cp}} = \frac{L_{1_{cp}}}{60 \cdot 8000} = \frac{4,31688 \cdot 10^{10}}{60 \cdot 8000} = 89935 \text{ ч.}$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$T_{2_{cp}} = \frac{L_{2_{cp}}}{60 \cdot 8000} = \frac{1,275 \cdot 10^{11}}{60 \cdot 8000} = 266354 \text{ ч.}$$

3.38.3. Вероятность невозникновения усталостного разрушения шарикоподшипников по причине потери смазкой смазочных свойств определяется по формуле (26)

$$P_{i_{cp}} = e^{-\frac{t}{T_{i_{cp}}}}.$$

№ изм.
№ изв.

5813

Инв. №: Дубликата
Инв. № подлинника

Для 1-го шарикоподшипника:

$$P_{1CM} = e^{-\frac{1}{89935}} = 0,999988000$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$P_{2CM} = e^{-\frac{1}{266351}} = 0,999996245.$$

3.39. Вероятность безотказной работы шарикоподшипникового узла определяется по формуле (7)

$$P_w(t) = P_i(L_p) P_{iCM} P_i(r_p > 0).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$P_{w_1} = 1 \cdot 0,9999999999999986 \cdot 0,9999888 = 0,999988799.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$P_{w_2} = 1 \cdot 0,99999999999999809 \cdot 0,999996245 = 0,999996244.$$

3.40. Вероятность безотказной работы шарикоподшипниковых узлов генератора определяется по формуле (6)

$$P_w(t) = \prod_{i=1}^{m_w} P_{w_i}(t) = P_{w_1}(t) P_{w_2}(t).$$

$$P_w(t) = 0,999988799 \cdot 0,999996244 = 0,999985045.$$

4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБМОТОК

4.1. Исходные данные:

$$m_o = 5 \quad - \text{количество обмоток};$$

$\lambda_{OK3(0я02)} = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки якоря основного генератора при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости (класс С);

$\lambda_{OK3(0я02)} = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки возбуждения основного генератора при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости (класс С);

$\lambda_{OK3(0я03д)} = 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ - интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки якоря возбудителя при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости (класс С);

Инв. № дубликата	5813
Инв. № подлинника	

$\lambda_{OK3(об\,возд)}$ = $0,05 \cdot 10^{-6}$ 1/ч - интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки возбуждения возбудителя при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости (класс С);

$\lambda_{OK3(об\,подв)}$ = $0,30 \cdot 10^{-6}$ 1/ч - интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки якоря подвозбудителя при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости (класс С);

$$W_{0Я.02} = 54$$

$$W_{0В.02} = 324$$

- число витков обмотки якоря основного генератора;
- число витков обмотки возбуждения основного генератора;

$$W_{0Я.возд} = 360$$

$$W_{0В.возд} = 1296$$

$$W_{0Я.подв} = 288$$

$$\alpha_r = 0,035$$

- число витков обмотки якоря возбудителя;
- число витков обмотки возбуждения возбудителя;
- число витков обмотки якоря подвозбудителя;
- температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции (класс С);

$$\theta_{0C} = 80^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{0Я.02} = 100^{\circ}\text{C}$$

- температура охлаждающей среды;
- перегрев обмотки якоря основного генератора относительно температуры окружающей среды при работе;

$$\Delta\theta_{0В.02} = 100^{\circ}\text{C}$$

- перегрев обмотки возбуждения основного генератора относительно температуры окружающей среды при работе;

$$\Delta\theta_{0Я.возд} = 70^{\circ}\text{C}$$

- перегрев обмотки якоря возбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$$\Delta\theta_{0В.возд} = 50^{\circ}\text{C}$$

- перегрев обмотки возбуждения возбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$$\Delta\theta_{0Я.подв} = 50^{\circ}\text{C}$$

- перегрев обмотки якоря подвозбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$$\theta_{II} = 250^{\circ}\text{C}$$

- предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы;

$$\lambda_{обр} = 2 \lambda_{K3}$$

$$\lambda_{опк\,0Я.02} = 0,005 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

- интенсивность обрыва обмотки;

$$\lambda_{опк\,0В.02} = 0,006 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

- интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке якоря основного генератора;
- интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке возбуждения основного генератора;

№ ИЗМ.	
№ ИЗВ.	

5813

Инв. № дубликата	
Инв. № подлинника	

- $\lambda_{опк\,оя\,возб} = 0,006 \cdot 10^{-6}$ 1/ч - интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке якоря возбудителя;
- $\lambda_{опк\,об\,возб} = 0,005 \cdot 10^{-6}$ 1/ч - интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке возбуждения возбудителя;
- $\lambda_{опк\,оя\,подв} = 0,005 \cdot 10^{-6}$ 1/ч - интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке якоря подвозбудителя;
- $n_{поя\,ог} = 33$ - число паяных контактов обмотки якоря основного генератора;
- $n_{поя\,ог} = 9$ - число паяных контактов обмотки возбуждения основного генератора;
- $n_{поя\,возб} = 43$ - число паяных контактов обмотки якоря возбудителя;
- $n_{поя\,возд} = 13$ - число паяных контактов обмотки возбуждения возбудителя;
- $n_{поя\,подв} = 40$ - число паяных контактов обмотки якоря подвозбудителя.

4.2. Вероятность безотказной работы обмотки определяется по формуле (65)

$$P_{обм_1}(t) = P_{K.3} \cdot P_{обр} \cdot P_{n_1} = e^{-(\lambda_{K.3} + \lambda_{обр} + \lambda_{n_1})t}$$

4.3. Интенсивность коротких замыканий обмоток определяется по формуле (66)

$$\lambda_{K.3} = \lambda_{обр} \cdot w \cdot e^{\alpha_r(\theta_{oc} + \Delta\theta - \theta_n)}$$

Для обмотки якоря основного генератора:

$$\lambda_{K.3} = 0,07 \cdot 10^{-6} \cdot 54 \cdot e^{0,035(80 + 100 - 250)} = 3,26189 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

Для обмотки возбуждения основного генератора

$$\lambda_{K.3} = 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot 324 \cdot e^{0,035(80 + 100 - 250)} = 2,795912 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

Для обмотки якоря возбудителя:

$$\lambda_{K.3} = 0,03 \cdot 10^{-6} \cdot 360 \cdot e^{0,035(80 + 70 - 250)} = 3,261317 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

Для обмотки возбуждения возбудителя:

$$\lambda_{K.3} = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1296 \cdot e^{0,035(80 + 50 - 250)} = 9,717130 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

Для обмотки якоря подвозбудителя:

$$\lambda_{K.3} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 228 \cdot e^{0,035(80 + 50 - 250)} = 1,025690 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

4.4. Интенсивность обрыва обмотки:

1) для генераторов: $\lambda_{обр} = 2 \lambda_{K.3}$;

2) для обмотки якоря основного генератора:

$$\lambda_{обр} = 2 \cdot 3,26189 \cdot 10^{-7} = 6,52378 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

№ ИЗМ	№ ИЗВ.
-------	--------

5813	
------	--

Инв. № дубликата	
Инв. № подлинника	

3) для обмотки возбуждения основного генератора:

$$\lambda_{обр} = 2 \cdot 2,795912 \cdot 10^{-7} = 5,591824 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч};$$

4) для обмотки якоря возбудителя:

$$\lambda_{обр} = 2 \cdot 3,261317 \cdot 10^{-7} = 6,522634 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч};$$

5) для обмотки возбуждения возбудителя:

$$\lambda_{обр} = 2 \cdot 9,71713 \cdot 10^{-7} = 1,9434 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

6) для обмотки якоря подвозбудителя:

$$\lambda_{обр} = 2 \cdot 1,02569 \cdot 10^{-6} = 2,05138 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

4.5. Интенсивность обрыва паяного контакта определяется по формуле (67)

$$\lambda_n = m_n \lambda_{опк}.$$

Для обмотки якоря основного генератора:

$$\lambda_n = 33 \cdot 0,005 \cdot 10^{-6} = 1,65 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

Для обмотки возбуждения основного генератора:

$$\lambda_n = 9 \cdot 0,006 \cdot 10^{-6} = 5,4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}.$$

Для обмотки якоря возбудителя:

$$\lambda_n = 43 \cdot 0,006 \cdot 10^{-6} = 2,58 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

Для обмотки возбуждения возбудителя:

$$\lambda_n = 13 \cdot 0,005 \cdot 10^{-6} = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}.$$

Для обмотки якоря подвозбудителя:

$$\lambda_n = 40 \cdot 0,005 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

4.6. Вероятность безотказной работы i -й обмотки определяется по формуле (65)

$$P_{обр_i}(t) = e^{-(\lambda_{к_3} + \lambda_{обр} + \lambda_n)t}.$$

Для обмотки якоря основного генератора:

$$P_{обр_i}(t) = e^{-(3,26189 \cdot 10^{-7} + 6,52378 \cdot 10^{-7} + 1,65 \cdot 10^{-7}) \cdot 1} =$$

$$= 0,999998856.$$

Для обмотки возбуждения основного генератора

$$P_{обр_i}(t) = e^{-(2,795912 \cdot 10^{-7} + 5,591827 \cdot 10^{-7} + 5,4 \cdot 10^{-8}) \cdot 1} =$$

$$= 0,999999107.$$

№ изм
№ изв.

5813

Инв. № Адубликата
Инв. № подлинника

Для обмотки якоря возбудителя.

$$\rho_{обм}(t) = e^{-(3,261317 \cdot 10^{-7} + 6,522634 \cdot 10^{-7} + 5,4 \cdot 10^{-8}) \cdot t} = \\ = 0,999998763.$$

Для обмотки возбуждения возбудителя:

$$\rho_{обм}(t) = e^{-(9,71713 \cdot 10^{-7} + 1,9434 \cdot 10^{-6} + 6,5 \cdot 10^{-8}) \cdot t} = 0,99999702.$$

Для обмотки якоря подвозбудителя

$$\rho_{обм}(t) = e^{-(1,02569 \cdot 10^{-6} + 2,05138 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-7}) \cdot t} = 0,999996723.$$

4.7. Вероятность безотказной работы всех обмоток:

$$\rho_{обм}(t) = \prod_{i=1}^{m_0} \rho_{обм}(t) = 0,999998856 \cdot 0,999999107 \cdot 0,999998763 \cdot \\ \cdot 0,99999702 \cdot 0,999996723 = 0,999990469.$$

5. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ БЛОКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

5.1. Исходные данные:

$\lambda_{обр обм} = 2 \lambda_{кз обм}$ – интенсивность обрывов обмотки в одной фазе;

$m_f = 6$ – число фаз в выпрямительном устройстве;

$\lambda_d = 0,1 \cdot 10^{-5}$ 1/ч – интенсивность отказов диода с учетом режима работы и условий эксплуатации;

$\lambda_{пр} = 0,02 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность обрывов проводов одной обмотки;

$\lambda_n = 0,006 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность обрывов паяных контактов диодов;

$K_1 = 1$ – количество паяек в фазе обмотки;

$\lambda_{кз обм_1} = 0,01 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность коротких замыканий обмотки;

$K_2 = 2$ – количество паяек на диодах от одной фазы обмотки;

$\lambda_{кз обм_2} = 0,01 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность коротких замыканий обмотки, приводящих к потере мощности 2-х фаз.

5.2. Вероятность отсутствия отказов, приводящих к потере мощности одной фазы, определяется по формуле (69)

$$\rho_{1\varphi}(t) = e^{-(\lambda_{обр обм} + \lambda_d + K_1 \lambda_{пр} + K_2 \lambda_n + \lambda_{кз обм_2})t},$$

$$\rho_{1\varphi}(t) = e^{-(0,02 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 0,006 \cdot 10^{-6} + 0,01 \cdot 10^{-6}) \cdot t} = \\ = 0,999998941.$$

№ ИЗМ.
№ ЧЗВ.

5813

Инв № Дубликата
Инв № подлинника

5.3. Вероятность отсутствия отказов, приводящих к потере мощности двух фаз, определяется по формуле (70)

$$P_{2\varphi}(t) = e^{-\lambda_{K3} \text{ обр}_2 t} = 0,999999996.$$

5.4. Вероятность безотказной работы выпрямительного устройства определяется по формуле (71)

$$P_B(t) = \left\{ P_{1\varphi}^{m\varphi}(t) + \eta_\varphi P_{1\varphi}^{m\varphi-1}(t) [1 - P_{1\varphi}(t)] \right\} P_{2\varphi}(t),$$

$$P_B(t) = \left\{ (0,999998941)^6 + 6(0,999998941)^5 [1 - 0,999998941] \right\} \times$$

$$\times 0,999999996 = 0,99999888.$$

5.5. Интенсивность отказов выпрямительного устройства определяется по формуле (73)

$$\lambda_B = \frac{1 - P_B(t)}{t},$$

$$\text{при } P_B > 0,99 \quad \lambda_B = \frac{1 - 0,9999988}{1} = 1,1191 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

6. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ РАСЦЕПИТЕЛЯ

6.1. Исходные данные:

$\lambda_{окзр} = 0,06 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ – интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки расцепителя при рабочей температуре обмотки, соответствующей предельно допустимой для данного класса нагревостойкости;

$W_p = 150$ – число витков обмотки расцепителя;

$\alpha_p = 0,035 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ – температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции;

$\theta_{oc} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура охлаждающей среды;

$\Delta\theta_p = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – перегрев обмотки относительно температуры окружающей среды при работе;

$\theta_n = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы.

Для электромеханизмов:

$\lambda_{обр} = 0,8 \lambda_{K3}$ – интенсивность обрыва обмотки;

$\lambda_{опк} = 0,005 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ – интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке расцепителя;

$m_p = 2$ – число паяных контактов.

№ изм.
№ изв.

5813

Изв. № дубликата
Изв. № подлинника

6.2. Интенсивность коротких замыканий обмотки определяется по формуле (66)

$$\lambda_{K3} = \lambda_{OK3} w e^{\alpha_r(\theta_{OC} + \Delta\theta - \theta_n)},$$

$$\lambda_{K3} = 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot 150 e^{0,035(80 + 50 - 250)} = 1,3496 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

6.3. Интенсивность обрыва обмотки расцепителя для электромеханизмов и электромуфт

$$\lambda_{обрp} = 0,8 \lambda_{K3p} = 0,8 \cdot 1,3496 \cdot 10^{-7} = 1,07967 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

6.4. Интенсивность обрыва паяного контакта определяется по формуле (67)

$$\lambda_{n_p} = m_{n_p} \lambda_{опк_p} = 2 \cdot 0,005 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч.}$$

6.5. Вероятность безотказной работы расцепителя определяется по формуле (65)

$$P_{обрp}(t) = e^{-(1,3496 \cdot 10^{-7} + 1,07967 \cdot 10^{-7} + 1 \cdot 10^{-8}) \cdot t} = 0,999999747.$$

6.6. Интенсивность отказов расцепителя:

$$\lambda_p = \lambda_{K3} + \lambda_{обрp} + \lambda_{n_p} = 2,529 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

7. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ БТТ

7.1. Исходные данные:

$\lambda_{OK3} = 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ – интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки БТТ;

$w_{str} = 750$ – число витков обмотки;

$\alpha = 0,035$ – температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции;

$\theta_{OC} = 80^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей среды;

$\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$ – перегрев обмотки относительно температуры окружающей среды.

Для трансформаторов:

$\lambda_{обрp} = 0,25 \lambda_{K3} \text{ 1/ч}$ – интенсивность обрыва обмотки;

$\lambda_{опк} = 0,005 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ – интенсивность отказов одного паяного контакта;

$m = 10$ – число паяных контактов;

$\theta_n = 250^\circ\text{C}$ – предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы.

7.2. Интенсивность коротких замыканий обмоток определяется по формуле (66)

$$\lambda_{K3} = 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 750 e^{0,035(80 + 40 - 250) \cdot 1} = 3,9627 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

7.3. Интенсивность обрыва обмотки для трансформаторов

$$\lambda_{обрp} = 0,25 \lambda_{K3} = 9,925 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч.}$$

№ изм.	
№ изв.	

Инв. № дубликата	5813
------------------	------

Инв. № подлинника	
-------------------	--

7.4. Интенсивность обрыва паяного контакта определяется по формуле (67)

$$\lambda_n = m_n \lambda_{опк} = 10 \cdot 0,005 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч.}$$

7.5. Вероятность безотказной работы БТТ:

$$P_{без\ БТТ}(t) = e^{-(\lambda_{х,3} + \lambda_{обр} + \lambda_n)t} = 0,999999454.$$

8. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА

$$P_{3H}(t) = 0,999985045 \cdot 0,99999888 \cdot 0,999990469 \cdot 0,999999747 \times \\ \times 0,999999454 = 0,999973603.$$

9. РАСЧЕТ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ

Средняя наработка на отказ определяется по формуле

$$T_o = \frac{1}{1 - P_{3H}} = 37000 \text{ ч.}$$

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетные значения вероятности бесотказной работы 0,9997 соответствуют заданным в ТЗ требованиям ($P = 0,9996$).

№ 13М.
№ 13Б.

5813

Инв. № Аудитората
Инв. № подлинника

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. УТВЕРЖДЕН Министерством
ЗАРЕГИСТРИРОВАН ЦГО
за № 100 от 10.01.89
2. ВЗАМЕН ОСТ 1 00151-81
3. ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Обозначение НТД, на которые дана ссылка	Номер пункта
ГОСТ 9433-80	3.1.2
ГОСТ 18179-72	3.1.2
ГОСТ 19774-74	3.1.2

Инв. № дубликата	№ ИЗМ.
Инв. № подлинника	5813

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

Номер изменения	Номер листа (страницы)				Номер документа	Подпись	Дата внесения изм.	Дата введения изм.
	измененного	заменившего	нового	аннулированного				