УДК 629.7.064.5.001.24

Группа Д02

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).

Инв. № дубликата

5813

Инв. № подлинника

№ изм.

№ изм

Издание официальное ★

Перепечатка воспрещена

gost.e-ecolog.ru

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
Инв. № подлинника | Инв. № дубликата

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 ($P_{ЭМ}(t)$) при условии независимости отказов ее составных частей производится по формуле

$$P_{ЭМ}(t) = \prod_{i=1}^{m} P_i(t), \qquad (1)$$

где m – число составных частей;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-й составной части ($i = 1,2,\ldots,m$) 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:

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

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

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 ($\lambda_{з_j}$), производится по формулам:

$$\lambda_{з_j} = \sum_{i=1}^{m_j} \lambda_{j_i}, \qquad (4)$$

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

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

$$P_{з_j}(t_p) = e^{-\lambda_{з_j} t_p}, \qquad (5)$$

где $P_{з_j}(t_p)$ – 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 ($P_ш(t)$) определяется по формуле

$$P_ш(t) = \prod_{i=1}^{m_ш} P_{ш_i}(t), \qquad (6)$$

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

$$P_{ш_i}(t) = P_i(L_p) P_{i_{см}} P_i(r_p > 0), \qquad (7)$$

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

$P_{i_{см}}$ – 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;

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

Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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

$$P_i(L_p) = e^{-0{,}143\left[\left(\frac{L_{pT}}{L_{Hi}}-0{,}25\right)^{1{,}11}-\left(\frac{L_{pT}-L_p}{L_{Hi}}-0{,}25\right)^{1{,}11}\right]}. \qquad (8)$$

Если $\frac{L_{pT}}{L_{Hi}} \leq 0{,}25$, то $P_i(L_p) = 1$,

где L_p – наработка шарикоподшипников за время полета в циклах вращения, определяемая по формуле

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

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

n_j – частота вращения электрической машины в j -м типовом режиме работы ($j = 1, 2, \ldots, N$), 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

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

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

t_1 – наработка в интервале времени полета, ч;

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

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

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.

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

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

$$C = f_c \left(m_{т.к} \cos\alpha\right)^{0,7} Z^{\frac{2}{3}} d_w^{1,8}, \qquad (12)$$

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 $\frac{d_w \cos\alpha}{D_0}$;

$m_{т.к}$ – число рядов тел качения в шарикоподшипнике;

α – номинальный угол контакта шарикоподшипника (для радиальных шарикоподшипников $\alpha \approx 0^\circ), \ldots^\circ$;

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. Инв. № дубликата Инв № подлинника 5813

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

$$Q = (R_R XV + R_a Y) K_б K_т, \qquad (13)$$

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);

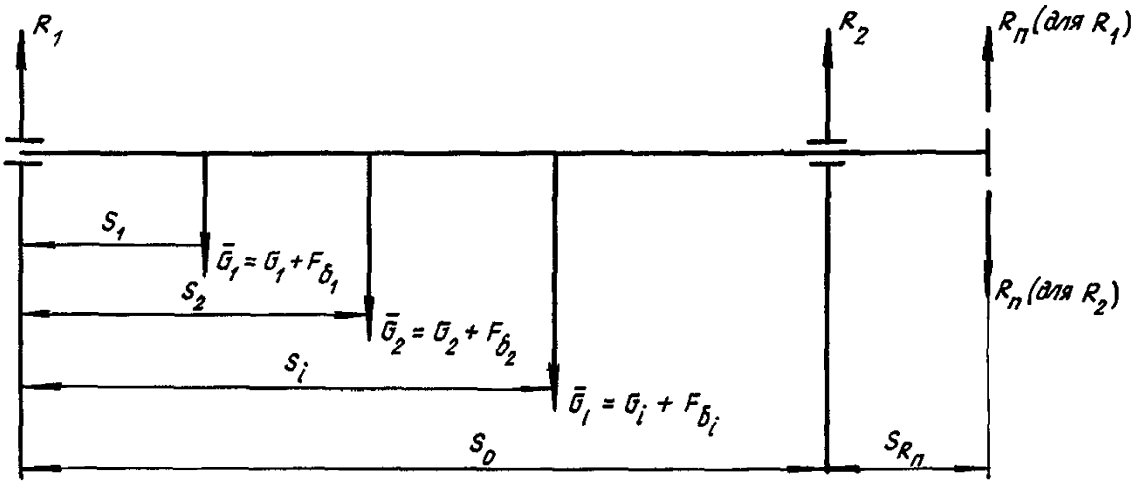
R_a – осевая нагрузка на шарикоподшипник, Н;

Y – коэффициент динамической осевой нагрузки;

$K_б$ – коэффициент безопасности;

$K_т$ – 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 шарикоподшипниковыми 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 – $G_1, G_2, \ldots, G_i$; значение силы ОМП – $F_{б_1}, F_{б_2}, \ldots, F_{б_i}$; суммарная нагрузка – $(\bar{G}_1 = G_1 + F_{б_1}, \bar{G}_2 = G_2 + F_{б_2}, \ldots, \bar{G}_i = G_i + F_{б_i})$;

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

3) координата точек приложения суммарных нагрузок от элементов ротора $(S_1, S_2, .. , S_i)$.

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

вертикально вверх – при расчете R_1;

вертикально вниз – при расчете R_2.

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

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

Сила реакции передачи $(R_п)$ в Ньютонах определяется по формуле

$$R_п = K_п \frac{M_н}{r_д} \cdot 10^3, \qquad (14)$$

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

$M_н$ – номинальный вращающий момент, Н·мм;

$r_д$ – радиус делительной окружности шестерен или окружности кулачков муфты, мм.

Номинальный вращающий момент $(M_н)$ определяется по формулам:

для электродвигателя

$$M_н = 95500 \frac{P_н}{n};$$

для генератора

$$M_н = 95500 \frac{P_г}{\eta n},$$

где $P_н$ – номинальная мощность, кВт;

$P_г$ – активная мощность на выходе, кВт;

η – КПД генератора;

n – средняя частота вращения, об/мин;

$$n = \frac{L_p}{60 \sum_{i=1}^{N} t_i}, \qquad (15)$$

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

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

$$F_{б_i} = K_{0_i} \bar{m}(e_0), \qquad (16)$$

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

K_{0_i} – коэффициент, определяемый как значение силы ОМП, возникающей при эксцентриситете воздушного зазора в 1 мм, Н/мм;

№ изм. | № изв. | 5813 | Инв. № дубликата | Инв № подлинника

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

Расчет значения K_{0i} производится для каждого элемента ротора по формуле

$$K_{0i} = \frac{392 \cdot 10^{-3} \alpha_\delta \pi L D B_\delta^2}{K_\delta \delta_H}, \qquad (17)$$

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);

δ_H – номинальное значение воздушного зазора, мм.

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

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

где i – количество шарикоподшипников;

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

$$\bar{m}_i(e_0) = 0{,}25\left(\sum_{i=1}^{m_a} \Delta_i + r_{0_i}\right) + 0{,}21\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{m_б} б_{i(н)}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{m_в} б_{i(в)}^2}\right), \qquad (19)$$

где m_a – число зазоров, определяющих эксцентриситет;

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

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

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_{0i} – внутренний радиальный зазор шарикоподшипника, мм;

$m_б$ – число рассматриваемых биений $(б_{i(н)})$, относящихся к статору;

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

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв № подлинника 5813

m_B – число рассматриваемых вращающихся биений ($Б_{i(B)}$), относящихся к ротору;

$Б_{i(B)}$ – максимально возможное вращающееся биение шилиндрических поверхностей детали, относящейся к ротору, мм.

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

$$R_1 = \frac{\sum_1^m \bar{G}_i (S_0 - S_i) + R_П S_{R_П}}{S_0}; \qquad (21)$$

$$R_2 = \frac{\sum_1^m \bar{G}_i S_i + R_П (S_0 + S_{R_П})}{S_0}, \qquad (22)$$

где m – число элементов ротора;

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

S_0 – расстояние между опорами вала ротора, мм;

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

$R_П$ – сила реакции передачи, Н;

$S_{R_П}$ – координата точки приложения силы реакции передачи, мм.

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

1) для радиального плавающего подшипника

$$R_{a_П} = \frac{R_R f_{mp}}{2}, \qquad (23)$$

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

2) для фиксированного подшипника

$$R_{a_ф} = A_{0_1} + 9{,}81 \cdot G_\Sigma, \qquad (24)$$

где A_{0_1} – сила поджатия пружины (при наличии в конструкции осевого поджима), Н;

G_Σ – 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 $\frac{R_a}{C_0} \leqslant 0{,}014$ применять

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

где C_0 – статическая радиальная грузоподъемная сила подшипника, Н.

В случае, когда $\frac{R_a}{C_0} > 0{,}014$, 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.

Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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

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

Таблица 3

$t_ш$, °С	$K_т$	$t_ш$, °С	$K_т$
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 $N_н$ различными значениями эквивалентной нагрузки Q_l и длительности режима L_l следует определить эквивалентную приведенную нагрузку ($Q_{пр}$) в Ньютонах по формуле

$$Q_{пр} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{l}^{N_н} Q_l^3 L_l}{\sum_{l}^{N_н} L_l}}, \qquad (25)$$

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 $P_{i\,см}$ определяется по формуле

$$P_{i\,см} = e^{-\frac{t}{T_{i\,ср}}}, \qquad (26)$$

где t – расчетное время работы, ч;

$T_{i\,ср}$ – средняя наработка до отказа шарикоподшипника по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств, ч, определяемая по формуле

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

$$T_{1ср} = \frac{L_{iср}}{60n}, \qquad (27)$$

где $L_{1ср}$ – среднее число циклов вращения шарикоподшипников до отказа по причине потери консистентной смазкой смазочных свойств;

n – средняя частота вращения, об/мин.

$$\lg L_{iср} = K + \frac{2800}{273 + t_ш}, \qquad (28)$$

где K – коэффициент, зависящий от типа консистентной смазки;

$t_ш$ – температура нагрева шарикоподшипников, °С.

В случае, когда температура нагрева шарикоподшипников одинаковая, $P_{1см} = P_{2см}$.

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 $P_{1см}$ 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 сомножителем поправочный коэффициент режима трения H_i, зависящий от параметра Λ, характеризующего режим трения.

Параметр Λ определяется по формуле

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

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

$$h_{min} = \frac{2{,}04 f^{0{,}74} (GU)^{0{,}74}}{(W')^{0{,}074}} r_x, \qquad (30)$$

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

где f – коэффициент геометрии шарикоподшипника, определяемый по формуле

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

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;

$$r_x = \frac{d_ш}{2}\left(1 - \frac{d_ш}{d_{ср}}\right), \qquad (32)$$

$$r_y = \frac{d_ш\, r_ж}{2 r_ж - d_ш}, \qquad (33)$$

где $d_ш$ – диаметр шарика, мм;

$r_ж$ – радиус желоба кольца, мм; $r_ж = 0{,}515\, d_ш$;

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

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

где d – посадочный диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;

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

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

$$G = \xi_\beta E', \qquad (35)$$

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

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

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

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

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

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

$$\bar{V} = \frac{\pi n}{120 \cdot d_{ср}}\left(d_{ср}^2 - d_ш^2\right), \qquad (37)$$

где n – средняя частота вращения, об/мин;

W' – коэффициент нагрузки, определяемый по формуле

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

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

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

$$F = \frac{5Q_i}{z}, \qquad (39)$$

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

$$P_i\,(r_p > 0) = \frac{1}{\sigma(r_p)\sqrt{2\pi}} \int_0^{r_{p\max}} e^{-\frac{[r_p - \bar{m}(r_p)]^2}{2\sigma^2(r_p)}}\, dr_p = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{\bar{m}(r_p)}{\sigma(r_p)}\right], \qquad (40)$$

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

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

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.

Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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

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

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

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

$$\bar{m}(\Delta r_1) = \gamma\, \bar{m}(\delta), \tag{43}$$

где γ – коэффициент влияния посадочного натяга;

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

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

$$d_2 = d_{cp} - \frac{d_ш}{2}, \tag{45}$$

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;

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

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;

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

$$\bar{\sigma} = \frac{\delta_{max} + \Delta_{max}}{6}, \tag{48}$$

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

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

№ изм | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

При этом

$$\bar{m}(\Delta r_2) = 0{,}278\, B_y\, \varphi^2_{max}, \qquad (50)$$

где B_y – коэффициент влияния углового смещения, мм;

φ – угловое смещение колец шарикоподшипника, рад;

$$B_y = 12{,}5\,\frac{d^2_{cp}}{d_w}; \qquad (51)$$

$$\varphi_{max} = \frac{4\,\bar{m}(e_0)}{S_0}; \qquad (52)$$

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

где C_T – коэффициент влияния перепада температуры между кольцами шарикоподшипника;

$$C_T = \alpha_T d_ж, \qquad (54)$$

где α_T – коэффициент линейного температурного расширения стали, 1/мм ($\alpha_T = 11\cdot10^{-6}$);

$d_ж$ – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;

$\bar{m}(\Delta t)$ – математическое ожидание перепада температуры между кольцами шарикоподшипника, °С.

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

где Δt_{max}, Δt_{min} – верхнее и нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами, °С.

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

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

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

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

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. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

$$D(r_0) = \frac{(r_{0\,max} - r_{0\,min})^2}{36}; \qquad (58)$$

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

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

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

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

$$D(\Delta r_3) = C_T^2\,D(\Delta t), \qquad (62)$$

где $D(\Delta t)$ – дисперсия величины перепада температуры между кольцами, °С;

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

4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБМОТОК

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

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

где m_0 – число обмоток;

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

$$P_{обм_i}(t)^* = P_{к.з}\,P_{обр}\,P_п = e^{-(\lambda_{к.з} + \lambda_{обр} + \lambda_п)t}, \qquad (65)$$

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

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

$P_п$ – вероятность невозникновения отказа от обрыва паяного контакта;

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

$$\lambda_{к.з} = \lambda_{0\,к.з}\,w\,e^{\alpha_T(\theta_{0c} + \Delta\theta - \theta_п)}, \qquad (66)$$

где $\lambda_{0.к.з}$ – 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

$\alpha_т$ – температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции, $1/^{o}C$;

θ_{oc} – температура охлаждающей среды, ^{o}C;

$\Delta\theta$ – перегрев обмотки относительно температуры окружающей среды при работе, ^{o}C;

$\theta_п$ – предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы, ^{o}C;

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

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

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

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

$\lambda_п$ – интенсивность обрыва паяного контакта, определяемая по формуле

$$\lambda_п = m_п\,\lambda_{опк}, \qquad (67)$$

где $m_п$ – число паяных контактов;

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

$\lambda_{опк} = 0{,}002\cdot10^{-6}$ 1/ч – для паек с механическим закреплением (неподвижных);

$\lambda_{опк} = 0{,}006\cdot10^{-6}$ 1/ч – для паек вращающихся контактов;

$\lambda_{опк} = 0{,}005\cdot10^{-6}$ 1/ч – для обычных паек (неподвижных).

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

Значения w, $m_п$ определяются по конструкторской документации на электрическую машину.

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

Значения $\theta_п$ и $\alpha_т$ выбираются в соответствии с табл. 6.

Таблица 6

Обозначение класса нагревостойкости электроизоляционного материала	Максимально допустимая температура нагрева (длительная) изоляционного материала, ^{o}C	Температурный коэффициент нагревостойкости $\alpha_т$, $1/^{o}C$	Предельно допустимая температура нагрева изоляции $\theta_п$, ^{o}C			
			Срок службы, ч			
			500	1000	10000	20000
А	105	0,060 - 0,090	160	150	115	105
В	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 $\theta_п$ может быть также определено из графика, приведенного в приложении 1.

№ изм. № изв.
Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

Значение величины $\lambda_{0.кз}$ выбирается в соответствии с табл. 7.

Таблица 7

Вид обмотки	Конструктивное исполнение	Обозначение класса нагревостойкости электроизоляционного материала	Интенсивность отказа одного витка обмотки $\lambda_{0кз} \cdot 10^6$, 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	А	0,03
		В	0,10
		Г	0,25
		Н	0,15
		200	0,05
		220	-
	Катушечная рядовая из прямоугольного провода вращающаяся	В	0,01
	Катушечная нерядовая из круглого тонкого провода на полюсах статора	А	0,01
		В	0,40
		Г	0,10
		Н	0,06
		200	-
		220	-
Обмотка якоря постоянного тока и ротора переменного тока при коротком замыкании между фазами	Обмотка, распределенная в пазах из прямоугольного провода, шаблонированная	А	0,10
		В	0,03
		Г	0,01
		Н	0,03
		200	-
		220	-
	Обмотка, распределенная в пазах из круглого провода, всыпная или ручная намотка	А	0,02
		В	0,01
		Г	0,05
		Н	0,03
		200	-
		220	-
Обмотка статора переменного тока	Обмотка, распределенная в пазах из круглого провода, всыпная или ручная намотка	А	0,55
		В	0,04
		Г	0,25
		Н	0,15
		200	-
		220	0,30

№ изм. | № изв. | 5813 | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника

Продолжение табл. 7

Вид обмотки	Конструктивное исполнение	Обозначение класса нагревостойкости электроизоляционного материала	Интенсивность отказа одного витка обмотки $\lambda_{ок э} \cdot 10^6$, 1/ч
Обмотка статора переменного тока	Обмотка, распределенная в пазах, из прямоугольного провода, шаблонированная	А	1,55
		В	1,00
		Г	0,60
		Н	0,40
		200	0,07
		220	-
Обмотка электромагнитных муфт	Катушечная рядовая из круглого провода	А	0,02
		В	0,02
		Г	0,15
		Н	0,10
		200	-
		220	0,06
	Катушечная рядовая из прямоугольного провода	В	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 (СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ОСНОВНОГО ГЕНЕРАТОРА, СХЕМ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКА ЯКОРЯ ОСНОВНОГО ГЕНЕРАТОРА и т п.)

5.1. Под встроенным выпрямительным устройством понимается совокупность $m_ф$ 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. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

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

$$P_{в(0)}(t) = P_{1ф}^{m_ф}(t)\, P_{2ф}(t), \qquad (68)$$

где $m_ф$ – число фаз в выпрямительном устройстве;

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

$$P_{1ф}(t) = e^{-(\lambda_{обр\ обм} + \lambda_д + K_1\lambda_{пр} + K_2\lambda_п + \lambda_{к\ з\ обм_1})t}, \qquad (69)$$

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

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

K_1 – количество паек в фазе обмотки;

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

K_2 – количество паек на диодах от одной фазы обмотки;

$\lambda_п$ – интенсивность обрывов паяных контактов диодов, 1/ч;

$\lambda_{к\ з\ обм_1}$ – интенсивность коротких замыканий обмоток, приводящих к потере мощности одной фазы, 1/ч;

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

$$P_{2ф}(t) = e^{-\lambda_{к\ з\ обм_2} t}, \qquad (70)$$

где $\lambda_{к\ з\ обм_2}$ – 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 ($P_{в(1)}(t)$) определяется по формуле

$$P_{в(1)}(t) = \left\{P_{1ф}^{m_ф}(t) + m_ф P_{1ф}^{m_ф-1}(t)\left[1 - P_{1ф}(t)\right]\right\} P_{2ф}(t). \qquad (71)$$

5.5. В случае, когда допустима потеря $S_ф$ фаз из $m_ф$ фаз, вероятность безотказной работы выпрямительного устройства ($P_{в(S_ф)}(t)$) определяется по формуле

$$P_{в(S_ф)}(t) \simeq 1 - \left\{C_{m_ф}^{S_ф+1}\left(1 - P_{1ф}(t)\right)^{S_ф+1} + C_{m_ф}^{\left[\frac{S_ф}{2}\right]+1}\left(1 - P_{2ф}(t)\right)^{\left[\frac{S_ф}{2}\right]+1}\right\}, \qquad (72)$$

где $C_{m_ф}^{S_ф+1}$ – число сочетаний из $m_ф$ по $S_ф+1$; $C_{m_ф}^{S_ф+1} = \frac{m_ф!}{(m_ф - S_ф - 1)!(S_ф+1)!}$;

Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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

5.6. Интенсивность отказов выпрямительного устройства определяется следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{в} &= \frac{\ln \frac{1}{P_{в}(t)}}{t} \text{ при } P_{в} \leq 0{,}99; \\ \lambda_{в} &= \frac{1-P_{в}(t)}{t} \text{ при } P_{в} > 0{,}99. \end{aligned}\right\} \quad (73)$$

6. ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА

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

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

где t_2 – время между регламентными работами, ч;

$P_{вн}(t)$ – вероятность невозникновения внезапных отказов щеточно-коллекторного узла, определяемая по формуле

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

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. | Инв № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

Таблица 8

Тип электрической машины	Интенсивность отказов щеткодержателей $\lambda_{щ\,д} \cdot 10^6$, 1/ч	Интенсивность отказов коллектора (контактное кольцо) $\lambda_{кол} \cdot 10^6$, 1/ч	Интенсивность внезапных отказов щетки $\lambda_{вн\,щ} \cdot 10^6$, 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 одномоторный	0,02	0,40	0,30
вращательного движения двухмоторный	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

$$P_{пос}(t_2) = P_{(h_{ост} \geq h_{кр})} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{(h_{ост})}} \int_{h_{кр}}^{h_0} e^{-\frac{[h_{ост} - m(h_{ост})]^2}{2\sigma^2_{(h_{ост})}}} d_{(h_{ост})} =$$

$$= \Phi\left[\frac{h_0 - \bar{m}(h_{ост})}{\sigma_{(h_{ост})}}\right] - \Phi\left[\frac{h_{кр} - \bar{m}(h_{ост})}{\sigma_{(h_{ост})}}\right], \qquad (76)$$

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

$h_{кр}$ – критическая высота щетки, мм;

№ изм. № изв. Инв № дубликата Инв № подлинника 5813

h_0 – первоначальная высота щетки, мм;

Φ – функция Лапласа.

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

$$\bar{m}_{(h_{ост})} = h_0 - \bar{m}_{(h_{изн})}, \quad (77)$$

$$\sigma_{(h_{ост})} = \sigma_{(h_{изн})}, \quad (78)$$

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

Имея зависимость

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

следует

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

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

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

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

$$\bar{m}_{(V_{изн})} = 10^{4} a_1 j_п + a_2 t_щ + 10^{-3} a_3 V_0 + 10^{-2} a_4 F_0 + a_5 \gamma_K + a_6 Б_K; \quad (82)$$

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

где $j_п$ – поверхностная плотность силы тока под щеткой, А/см^2;

$t_щ$ – температура щетки, °С;

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

F_0 – давление на щетку, Па;

γ_K – степень коммутации;

$Б_K$ – биение коллектора, мм;

a_1-a_6 – коэффициенты влияния на величину износа щеток.

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

Значения t_1 и $h_{кр}$ определяются из технических условий.

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

Значения $t_щ$, γ_K и $Б_K$ 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. Инв № дубликата Инв № подлинника 5813

Таблица 9

Тип электрической машины	Обозначение марки щетки	a_5		a_6	
		ниле	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	$6,0^{-3}$	-	$3,00 \cdot 10^{-1}$	-
		$2,0^{-3}$	$5,62 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-1}$	$5,58\ 10^{-1}$
Электродвигатель	МГС-5	$2,0^{-4}$	-	$0,20 \cdot 10^{-1}$	-
	МГС-7	$3,0^{-3}$		$2,10 \cdot 10^{-2}$	
	МГС-8	$6,0^{-2}$		$3,60\ 10^{-1}$	
	Г-21А	$1,0^{-3}$		$1,80\ 10^{-2}$	
		$2,0^{-3}$	-	$1,00\ 10^{-1}$	-
Преобразователь	МГС-8	$5,0^{-4}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$2,10 \cdot 10^{-1}$
	Г-27	$7,0^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$1,70\ 10^{-1}$
	МГС-7	$2,0^{-5}$	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$
	МГС-7И	$8,0^{-4}$	$13,40 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$
		$6,0^{-4}$	$6,00 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^{-1}$

№ изм | № изв.

Инв. № дубликата | 5813

Инв. № 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:

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

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

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

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

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

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

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

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.
Инв. № дубликата 5813
Инв. № подлинника

Таблица 10

Наименование прочих узлов и элементов, входящих в электрическую машину	Интенсивность отказов $\lambda_{пр} \cdot 10^6$, 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:

$$\lambda_i = K_э \lambda_{p_i}, \qquad (89)$$

где $K_э$ – эксплуатационный поправочный коэффициент;

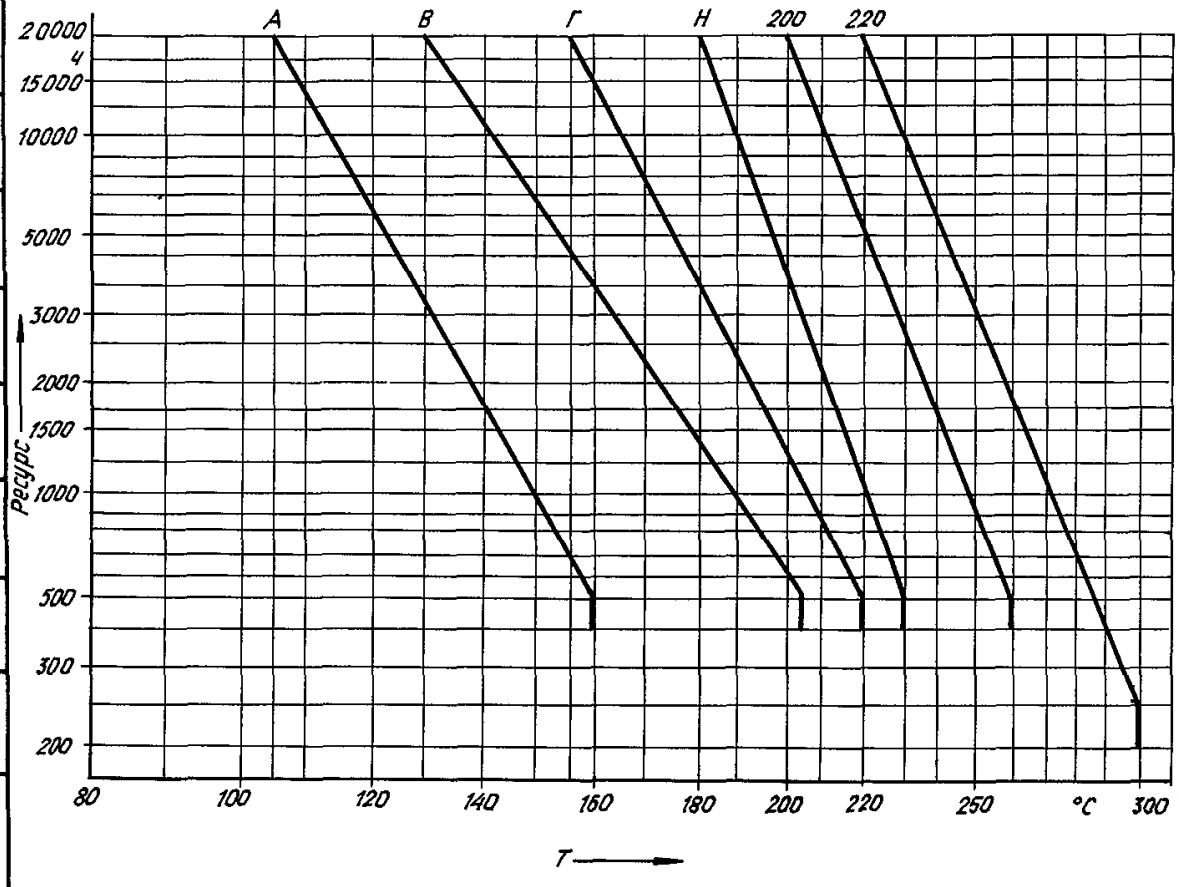
λ_{p_i} – расчетная интенсивность отказов i-го узла электрической машины, 1/ч.

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

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Рекомендуемое

ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ $\theta_п$ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕСУРСА ИЗДЕЛИЯ



№ изм
№ изв.
Инв. № дубликата
Инв № подлинника
5813

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 $P_{ЭМ} \geqslant 0{,}99996$.

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

$$P_{ЭМ}(t) = P_{Ш}(t)\, P_{ОБМ}(t)\, P_{В\,К}(t). \qquad (90)$$

№ изм. | № изв. | 5813 | Инв № дубликата | Инв № подлинника

3. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА

3.1. Исходные данные:

$m_ш = 2$ – число шарикоподшипниковых узлов в машине;

$N = 1$ – число типовых режимов работы электрической машины за время полета;

$t = 1$ ч – время полета;

$n_j = 8000$ об/мин – частота вращения электрической машины в j-м типовом режиме работы;

$T_{1р} = 3000$ ч – технический ресурс машины до первого ремонта;

$t = 3000$ ч – длительность типового режима работы в данном интервале;

$m_{тк_1} = 1$ – число рядов тел качения в 1-м шарикоподшипнике;

$m_{тк_2} = 1$ – число рядов тел качения во 2-м шарикоподшипнике;

$d_{ш_1} = 12{,}70$ мм – диаметр шарика 1-го шарикоподшипника;

$d_{ш_2} = 11{,}11$ 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;

$D_{01} = 60{,}0$ мм – диаметр окружности центров комплекта шариков 1-го шарикоподшипника;

$D_{02} = 53{,}5$ мм – диаметр окружности центров комплекта шариков 2-го шарикоподшипника;

$G_1 = 10{,}8$ кг – масса ротора основного генератора;

$G_2 = 1{,}9$ кг – масса ротора возбудителя;

$G_3 = 0{,}5$ кг – масса ротора подвозбудителя;

$i = 3$ – количество элементов ротора, дающих нагрузку на шарикоподшипник;

$S_1 = 97{,}5$ мм – координата точки приложения нагрузки ротора основного генератора;

$S_2 = 162{,}5$ мм – координата точки приложения нагрузки ротора возбудителя;

$S_3 = 207$ мм – координата точки приложения нагрузки ротора подвозбудителя;

$\alpha_{\partial_1} = 0{,}658$ – расчетный коэффициент полюсной дуги основного генератора;

$\alpha_{\partial_2} = 0{,}677$ – расчетный коэффициент полюсной дуги возбудителя;

$\alpha_{\partial_3} = 0{,}546$ – расчетный коэффициент полюсной дуги подвозбудителя;

$D_1 = 164{,}6$ мм – диаметр ротора основного генератора;

$D_2 = 165{,}0$ мм – диаметр ротора возбудителя;

$D_3 = 84{,}2$ мм – диаметр ротора подвозбудителя;

$L_1 = 78$ мм – активная длина ротора основного генератора;

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

L_2 = 17 мм – активная длина ротора возбудителя;

L_3 = 14 мм – активная длина ротора подвозбудителя;

B_{δ_1} = 1,0450 Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре основного генератора в наиболее длительном режиме работы;

B_{δ_2} = 0,3092 Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре возбудителя в наиболее длительном режиме работы;

B_{δ_3} = 0,3500 Тл – магнитная индукция в воздушном зазоре подвозбудителя в наиболее длительном режиме работы;

δ_1 = 0,7 мм – номинальное значение воздушного зазора основного генератора;

δ_2 = 0,5 мм – номинальное значение воздушного зазора возбудителя;

δ_3 = 0,4 мм – номинальное значение воздушного зазора подвозбудителя;

K_{δ_1} = 1,129 – коэффициент воздушного зазора основного генератора;

K_{δ_2} = 1,085 – коэффициент воздушного зазора возбудителя;

K_{δ_3} = 1,065 – коэффициент воздушного зазора подвозбудителя;

m_{a_1} = 2 – число зазоров, определяющих эксцентриситет для 1-го шарикоподшипника;

m_{a_2} = 3 – число зазоров, определяющих эксцентриситет 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:

Δ'_{11} = 0,018 мм,

Δ''_{11} = 0,009 мм,

Δ'_{12} = 0,

Δ''_{12} = 0,011 мм.

Для 2-го шарикоподшипника плавающего:

Δ'_{11} = 0,018 мм,

Δ''_{21} = 0,027 мм,

Δ'_{22} = 0,

Δ''_{22} = 0,011 мм,

Δ'_{23} = 0,046 мм,

Δ''_{23} = 0,029 мм;

r_{01} = 0,051 мм – внутренний радиальный зазор 1-го шарикоподшипника;

r_{02} = 0,051 мм – внутренний радиальный зазор 2-го шарикоподшипника;

$m_{б_1}$ = 1 – число рассматриваемых биений, относящихся к статору, для 1-го шарикоподшипника;

$m_{б_2}$ = 2 – число рассматриваемых биений, относящихся к статору, для 2-го шарикоподшипника;

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813

$Б_{1(н)}$ = 0,03 мм – максимально возможное биение цилиндрических поверхностей любой детали, относящейся к статору, для 1-го шарикоподшипника;

$Б_{2(н)}$ = 0,03 мм – максимально возможное биение цилиндрических поверхностей любой детали, относящейся к статору, для 1-го шарикоподшипника;

$Б'_{2(н)}$ = 0,03 мм – максимально возможное биение цилиндрических поверхностей любой детали, относящейся к статору, для 2-го шарикоподшипника;

$m_в$ = 1 – число рассматриваемых вращающихся биений, относящихся к ротору;

$Б_{1(в)}$ = 0,05 мм – максимально возможное вращающееся биение цилиндрических поверхностей детали, относящейся к ротору, для 1-го шарикоподшипника;

$Б_{2(в)}$ = 0,05 мм – максимально возможное вращающееся биение цилиндрических поверхностей детали, относящейся к ротору, для 2-го шарикоподшипника;

S_0 = 257,5 мм – расстояние между опорами вала ротора;

A_{0_1} = 0 – сила поджатия пружины;

G_Σ = 133,4 кг – масса вала и деталей, находящихся на валу;

$a_{23}^{(1)}$ = 3,0 – коэффициент, характеризующий совместное влияние качества металла деталей и условий эксплуатации на долговечность 1-го шарикоподшипника;

$a_{23}^{(2)}$ = 3,0 – коэффициент, характеризующий совместное влияние качества металла деталей и условий эксплуатации на долговечность 2-го шарикоподшипника;

f_{c_1} = 59,72 – коэффициент, зависящий от геометрии деталей 1-го шарикоподшипника, точности их изготовления и материала;

f_{c_2} = 59,78 – коэффициент, зависящий от геометрии деталей 2-го шарикоподшипника, точности их изготовления и материала;

$K_{п_1}$ = 1,05 – коэффициент, учитывающий способ передачи вращения 1-го шарикоподшипника;

$K_{п_2}$ = 1,05 – коэффициент, учитывающий способ передачи вращения 2-го шарикоподшипника;

$f_{тр_1}$ = 0,15 – коэффициент трения "сталь по стали" для 1-го шарикоподшипника;

$f_{тр_2}$ = 0,15 – коэффициент трения "сталь по стали" для 2-го шарикоподшипника;

C_{0_1} = 17800 Н – статическая радиальная грузоподъемная сила 1-го шарикоподшипника;

№ изм | № изв.
Инв № дубликата | 5813
Инв № подлинника

C_{O_2} = 13700 Н – статическая радиальная грузоподъемная сила 2-го шарикоподшипника;

K_{T_1} = 1,05 – коэффициент, учитывающий влияние температурного режима 1-го шарикоподшипника;

K_{T_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;

Y_1 = 0 – коэффициент динамической осевой нагрузки 1-го шарикоподшипника;

Y_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_6^1 = 40 мм – номинальный посадочный диаметр вала для 1-го шарикоподшипника;

d_6^2 = 35 мм – номинальный посадочный диаметр вала для 2-го шарикоподшипника;

$d_1^{(1)}$ = 32,5 мм – номинальный внутренний диаметр полого вала для 1-го шарикоподшипника;

$d_1^{(2)}$ = 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;

Δ_{max_1} = 0,027 мм – максимальный зазор при посадке 1-го шарикоподшипника,

Δ_{max_2} = 0,027 мм – максимальный зазор при посадке 2-го шарикоподшипника;

δ_{max_1} = 0,008 мм – максимальный натяг при посадке 1-го шарикоподшипника;

№ изм | № изв
Инв № дубликата | 5813
Инв. № подлинника

δ_{max_2} = 0,008 мм – максимальный натяг при посадке 2-го шарикоподшипника;

d_{cp_1} = 60,0 мм – средний диаметр 1-го шарикоподшипника;

d_{cp_2} = 53,5 мм – средний диаметр 2-го шарикоподшипника;

$d_{ж_1}$ = 47,300 мм – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца 1-го шарикоподшипника;

$d_{ж_2}$ = 42,387 мм – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца 2-го шарикоподшипника;

Δt_{max_1} = 15 °С – верхнее возможное значение перепада температуры между кольцами 1-го шарикоподшипника;

Δt_{max_2} = 15 °С – верхнее возможное значение перепада температуры между кольцами 2-го шарикоподшипника;

Δt_{min_1} = 5 °С – нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами 1-го шарикоподшипника;

Δt_{min_2} = 10 °С – нижнее возможное значение перепада температуры между кольцами 2-го шарикоподшипника;

t_w = 120 °С – 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 = 60·8000 3000 = 1 440 000 000 циклов вращения.

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

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

$L_{pT} = 144\cdot10^7 \frac{3000}{1} = 4,32\cdot10^{12}$ циклов вращения.

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

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

$$\bar{m}_i(e_0) = 0,25\left(\sum_{i=1}^{m_a}\Delta_i + r_{0_i}\right) + 0,21\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{m_б} б_{i(н)}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{m_в} б_{i(в)}^2}\right).$$

Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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 $m_{a_1} = 2$

$\Delta_1 = \Delta' - \Delta'' = 0{,}018 + 0{,}009 = 0{,}027$ мм.

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

Для 2-го шарикоподшипника $m_{a_2} = 3$

$\Delta_{21} = \Delta'_{11} - \Delta'_{21} = 0{,}018 + 0{,}009 = 0{,}027$ мм.

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

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

Для 1-го шарикоподшипника:

$m_1(e_0) = 0{,}25 \cdot (0{,}027 + 0{,}011 + 0{,}051) + 0{,}21 \left(\sqrt{(0{,}03)^2} + \sqrt{(0{,}05)^2} \right) =$
$= 0{,}0390500$ мм.

Для 2-го шарикоподшипника:

$m_2(e_0) = 0{,}25 \cdot (0{,}027 + 0{,}011 + 0{,}075 + 0{,}051) + 0{,}21 \left(\sqrt{(0{,}03)^2 + (0{,}03)^2} + \right.$
$\left. + \sqrt{(0{,}05)^2} \right) = 0{,}0604095$ мм.

$m(e_0) = \frac{1}{2} (0{,}03905 + 0{,}0604095) = 0{,}04972975$ мм.

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

$$K_{0_i} = \frac{392 \cdot 10^{-3} \alpha_\delta \pi L_i (B_{\delta_i})^2 D}{K_{\delta_i} b_{H_i}}.$$

Для основного генератора:

$$K_{0_1} = 392 \cdot 10^{-3} \frac{0{,}658 \ \pi \ 164{,}6 \ 78 \ (1{,}0450)^2}{1{,}129 \cdot 0{,}7} = 14669{,}0000 \text{ Н/мм}.$$

Для возбудителя:

$$K_{0_2} = 40 \ 10^{-3} \frac{0{,}677 \ \pi \ 165{,}17 \ (0{,}3092)^2}{1{,}085 \ 0{,}5} = 420{,}5432 \text{ Н/мм}.$$

Для подвозбудителя:

$$K_{0_3} = 392 \cdot 10^{-3} \frac{0{,}546 \cdot \pi \cdot 84{,}2 \cdot 14 \cdot (0{,}3500)^2}{1{,}065 \ 0{,}4} = 232{,}5782 \text{ Н/мм}.$$

3.7. Значение силы ОМП определяется по формуле (16)

$$F_{\delta_i} = K_{0_i} \bar{m}(e_0).$$

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

Для основного генератора:

$F_{б_1}$ = 14669,0·0,04972975 = 729,4860 Н.

Для возбудителя

$F_{б_2}$ = 420,5432·0,04972975 = 20,9135 Н.

Для подвозбудителя.

$F_{б_3}$ = 232,57826·0,04972975 = 11,5660 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

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

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

$$R_1 = \frac{837,486(257,5 - 97,5) + 39,9135(257,5 - 162,5)}{257,5} +$$

$$+ \frac{16,566(257,5 - 207)}{257,5} = 538,3940 \text{ Н}.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

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

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

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

Для радиального плавающего подшипника:

$$R_{a_п} = \frac{R_R f_{тр}}{2},$$

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

Для фиксированного шарикоподшипника:

$$R_{a_ф} = A_{0_1} + 9,81 \cdot G_\Sigma,$$

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

$R_{a\phi} = 0 + 133,4 = 133,4$ Н.

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

$$Q = (R_R X V + R_a Y) K_Б K_T .$$

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

$V_1 = 1$; $V_2 = 1$.

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

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

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

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

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

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

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

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

$f_c = 59,9$.

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

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

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

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

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

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

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)

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

Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

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

Для 1-го шарикоподшипника:

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

$$P_1\,(L_p) = 1.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

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

$$P_2\,(L_p) = 1.$$

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

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

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

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

Для 1-го шарикоподшипника:

$$m_1(r_0) = \frac{0{,}051 + 0{,}033}{2} = 0{,}042 \text{ мм}.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$m_1(r_0) = \frac{0{,}051 + 0{,}033}{2} = 0{,}042 \text{ мм}.$$

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

$$d_2 = d_{cp} - \frac{d_ш}{2}.$$

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)

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

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

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)

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

Для 1-го шарикоподшипника:

$$P_{u_1} = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{-0{,}0095}{0{,}0175}\right] = 0{,}293627.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$P_{u_2} = 0{,}5 + \Phi\left[\frac{-0{,}0095}{0{,}0175}\right] = 0{,}293627.$$

№ изм. № изв. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

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:

$$\bar{m}(\delta) = 0{,}0175\left(0{,}4\,e^{-\frac{(0{,}0095)^2}{2\cdot 0{,}0175}} - 0{,}00442\right) + (-0{,}0095)\,0{,}29327 =$$

$$= 0{,}0031741551 \text{ мм}$$

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)

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

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. Инв. № дубликата Инв. № подлинника 5813

Для 1-го шарикоподшипника:

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

Для 2-го шарикоподшипника

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

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

$$C_T = \alpha_T d_ж .$$

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:

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

Для 2-го шарикоподшипника

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

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:

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

Для 2-го шарикоподшипника:

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

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

№ изм. № изв. 5813 Инв № дубликата Инв № подлинника

3.30. Дисперсия посадочного натяга определяется по формуле (60)

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

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D(\delta) = 0{,}0031741551 \cdot \left[-0{,}0095 - 0{,}0031741551\right] + 0{,}0175^2 \cdot 0{,}293627 -$$

$$- 0{,}00492 \cdot 0{,}008 \cdot 0{,}0175 = 4{,}907474 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2.$$

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)

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

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:

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

Для 2-го шарикоподшипника:

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

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 | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника

Для 1-го шарикоподшипника:

$$D_1(\Delta r_3) = (5{,}203\cdot10^{-4})^2\cdot2{,}7770 \approx 7{,}5197800\cdot10^{-7} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(\Delta r_3) = (4{,}66257\cdot10^{-4})^2\cdot0{,}6963 = 1{,}5096915\cdot10^{-7} \text{ мм}^2.$$

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:

$$D_1(r_p) = 9\cdot10^{-6} + 7{,}86221\cdot10^{-6} + 1{,}251899\cdot10^{-7} + 7{,}51979\cdot10^{-7} =$$
$$= 1{,}773337\cdot10^{-5} \text{ мм}^2.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$D_2(r_p) = 9\cdot10^{-6} + 9{,}19443\cdot10^{-6} + 1{,}0340914\cdot10^{-7} + 1{,}5096915\cdot10^{-7} =$$
$$= 1{,}844880\cdot10^{-5} \text{ мм}^2.$$

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

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

Для 1-го шарикоподшипника:

$$\sigma_1(r_p) = \sqrt{1{,}773337\cdot10^{-5}} = 0{,}0042118 \text{ мм}.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$\sigma_2(r_p) = \sqrt{1{,}84488\cdot10^{-5}} = 0{,}0042952 \text{ мм}.$$

Вероятность обеспечения внутреннего зазора шарикоподшипника определяется по формуле (40)

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

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

Для 1-го шарикоподшипника

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

Для 2-го шарикоподшипника

$$P_2(r_p > 0) = 0{,}5 + \frac{0{,}03426362}{0{,}0042952} = 0{,}99999999999998010.$$

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

$$P_{1_{см}} = e^{-\frac{t}{T_{1ср}}}.$$

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

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

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

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

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

Для 1-го шарикоподшипника:

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

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

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

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

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

$$T_{1_{ср}} = \frac{L_{1_{ср}}}{60 \cdot n}.$$

Для 1-го шарикоподшипника:

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

Для 2-го шарикоподшипника:

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

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

$$P_{i_{см}} = e^{-\frac{t}{T_{iср}}},$$

Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813 | № изм. | № изв.

Для 1-го шарикоподшипника:

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

Для 2-го шарикоподшипника:

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

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

$$P_{ш_i}(t) = P_i(L_p) P_{i_{СМ}} P_i(r_p > 0).$$

Для 1-го шарикоподшипника:

$$P_{ш_1} = 1 \cdot 0,9999999999999986 \cdot 0,9999888 = 0,999988799.$$

Для 2-го шарикоподшипника:

$$P_{ш_2} = 1 \cdot 0,9999999999999809 \cdot 0,999996245 = 0,999996244.$$

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

$$P_ш(t) = \prod_{i=1}^{m_ш} P_{ш_i}(t) = P_{ш_1}(t) P_{ш_2}(t).$$

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

4. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБМОТОК

4.1. Исходные данные:

$m_0 = 5$ – количество обмоток;

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

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

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

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813

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

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

$W_{0\,я\,о.г} = 54$ – число витков обмотки якоря основного генератора;

$W_{0.в\,о\,г} = 324$ – число витков обмотки возбуждения основного генератора;

$W_{0\,я.возб} = 360$ – число витков обмотки якоря возбудителя;

$W_{0\,в\,возб} = 1296$ – число витков обмотки возбуждения возбудителя;

$W_{0\,я\,подв} = 288$ – число витков обмотки якоря подвозбудителя;

$\alpha_{т} = 0{,}035$ – температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции (класс С);

$\theta_{0\,с} = 80\ ^{\circ}C$ – температура охлаждающей среды;

$\Delta\theta_{0.я\,о.г} = 100\ ^{\circ}C$ – перегрев обмотки якоря основного генератора относительно температуры окружающей среды при работе;

$\Delta\theta_{0в.о\,г} = 100\ ^{\circ}C$ – перегрев обмотки возбуждения основного генератора относительно температуры окружающей среды при работе;

$\Delta\theta_{0\,я\,возб} = 70\ ^{\circ}C$ – перегрев обмотки якоря возбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$\Delta\theta_{0.в\,возб} = 50\ ^{\circ}C$ – перегрев обмотки возбуждения возбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$\Delta\theta_{0\,я\,подв} = 50\ ^{\circ}C$ – перегрев обмотки якоря подвозбудителя относительно температуры окружающей среды при работе;

$\theta_{п} = 250\ ^{\circ}C$ – предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы;

$\lambda_{обр} = 2\,\lambda_{кз}$ – интенсивность обрыва обмотки;

$\lambda_{опк\,оя.о.г} = 0{,}005 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке якоря основного генератора;

$\lambda_{опк\,о.в\,о\,г} = 0{,}006 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке возбуждения основного генератора;

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

$\lambda_{опкоявозб} = 0{,}006 \cdot 10^{-6}$ 1/ч – интенсивность отказов одного паяного контакта в обмотке якоря возбудителя;

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

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

$m_{поя.г} = 33$ – число паяных контактов обмотки якоря основного генератора;

$m_{пов.г} = 9$ – число паяных контактов обмотки возбуждения основного генератора;

$m_{появозб} = 43$ – число паяных контактов обмотки якоря возбудителя;

$m_{пов.возб} = 13$ – число паяных контактов обмотки возбуждения возбудителя;

$m_{пояподв} = 40$ – число паяных контактов обмотки якоря подвозбудителя.

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

$$P_{обм_i}(t) = P_{к.з_i} P_{обр_i} P_{п_i} = e^{-(\lambda_{кз_i} + \lambda_{обр_i} + \lambda_{п_i})t}$$

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

$$\lambda_{кз} = \lambda_{0.кз} w e^{\alpha_т(\theta_{0с} + \Delta\theta - \theta_п)}$$

Для обмотки якоря основного генератора:

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

Для обмотки возбуждения основного генератора

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

Для обмотки якоря возбудителя:

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

Для обмотки возбуждения возбудителя:

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

Для обмотки якоря подвозбудителя:

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

4.4. Интенсивность обрыва обмотки:

1) для генераторов: $\lambda_{обр} = 2\lambda_{к.з}$;

2) для обмотки якоря основного генератора:

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

№ изм | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

3) для обмотки возбуждения основного генератора:

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

4) для обмотки якоря возбудителя;

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

5) для обмотки возбуждения возбудителя:

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

6) для обмотки якоря подвозбудителя:

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

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

$$\lambda_п = m_п \lambda_{опк}.$$

Для обмотки якоря основного генератора·

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

Для обмотки возбуждения основного генератора·

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

Для обмотки якоря возбудителя·

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

Для обмотки возбуждения возбудителя:

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

Для обмотки якоря подвозбудителя:

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

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

$$P_{обм_i}(t) = e^{-(\lambda_{кз} + \lambda_{обр} + \lambda_п)t}.$$

Для обмотки якоря основного генератора·

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

$= 0{,}999998856.$

Для обмотки возбуждения основного генератора

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

$= 0{,}999999107.$

№ изм | № изв. | Инв № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

Для обмотки якоря возбудителя.

$$P_{обм}(t) = e^{-(3{,}261317\cdot10^{-7} + 6{,}522634\,10^{-7} + 5{,}4\cdot10^{-8})\cdot1} =$$

$= 0{,}999998763.$

Для обмотки возбуждения возбудителя:

$$P_{обм}(t) = e^{-(9{,}71713\cdot10^{-7} + 1{,}9434\cdot10^{-6} + 6{,}5\cdot10^{-8})\cdot1} = 0{,}99999702.$$

Для обмотки якоря подвозбудителя

$$P_{обм}(t) = e^{-(1{,}02569\cdot10^{-6} + 2{,}05138\cdot10^{-6} + 2\cdot10^{-7})\cdot1} = 0{,}999996723.$$

4.7. Вероятность безотказной работы всех обмоток:

$$P_{обм}(t) = \prod_{i=1}^{m_0} P_{обм}(t) = 0{,}999998856\ 0{,}999999107\ 0{,}999998763 \times$$

$\times 0{,}99999702\cdot0{,}999996723 = 0{,}999990469.$

5. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ БЛОКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

5.1. Исходные данные:

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

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

$\lambda_д = 0{,}1\cdot10^{-5}$ 1/ч – интенсивность отказов диода с учетом режима работы и условий эксплуатации;

$\lambda_{пр} = 0{,}02\cdot10^{-6}$ 1/ч – интенсивность обрывов проводов одной обмотки;

$\lambda_п = 0{,}006\cdot10^{-6}$ 1/ч – интенсивность обрывов паяных контактов диодов;

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

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

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

$\lambda_{к\ з\ обм_2} = 0{,}01\cdot10^{-6}$ 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)

$$P_{1ф}(t) = e^{-(\lambda_{обр\ обм} + \lambda_д + K_1\lambda_{пр} + K_2\lambda_п + \lambda_{к\ з\ обм})t},$$

$$P_{1ф}(t) = e^{-(0{,}02\cdot10^{-6} + 0{,}1\cdot10^{-5} + 1\cdot0{,}02\cdot10^{-6} + 2\cdot0{,}006^{-6} + 0{,}01\ 10^{-6})\cdot1} =$$

$= 0{,}999998941.$

№ изм. № изв. Инв № дубликата Инв № подлинника 5813

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

$$P_{2\phi}(t) = e^{-\lambda_{к.з\ обм_2}\, t} = 0{,}999999996.$$

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

$$P_{в(1)}(t) = \left\{ P_{1\phi}^{m_\phi}(t) + m_\phi P_{1\phi}^{m_\phi - 1}(t)\left[1 - P_{1\phi}(t)\right] \right\} P_{2\phi}(t),$$

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

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

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

$$\lambda_в = \frac{1 - P_в(t)}{t},$$

при $P_в > 0{,}99$ $\lambda_в = \dfrac{1 - 0{,}9999988}{1} = 1{,}1191\ 10^{-6}$ 1/ч.

6. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ РАСЦЕПИТЕЛЯ

6.1. Исходные данные:

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

$W_р = 150$ – число витков обмотки расцепителя;

$\alpha_р = 0{,}035$ 1/°С – температурный коэффициент класса нагревостойкости изоляции;

$\theta_{0с} = 80$ °С – температура охлаждающей среды;

$\Delta\theta_р = 50$ °С – перегрев обмотки относительно температуры окружающей среды при работе;

$\theta_п = 250$ °С – предельно допустимая температура нагрева изоляции при заданном сроке службы.

Для электромеханизмов:

$\lambda_{обр} = 0{,}8\,\lambda_{к.з}$ – интенсивность обрыва обмотки;

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

$m_р = 2$ – число паяных контактов.

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв № подлинника | 5813

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

$$\lambda_{кз} = \lambda_{0кз} w e^{\alpha_т(\theta_{0с}+\Delta\theta-\theta_п)},$$

$$\lambda_{кз} = 0{,}06\cdot10^{-6}\cdot150\, e^{0{,}035(80+50-250)} = 1{,}3496\cdot10^{-7}\ 1/ч.$$

6.3. Интенсивность обрыва обмотки расцепителя для электромеханизмов и электромуфт

$$\lambda_{обр_р} = 0{,}8\,\lambda_{кз_р} = 0{,}8\cdot1{,}3496\cdot10^{-7} = 1{,}07967\ 10^{-7}\ 1/ч.$$

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

$$\lambda_{п_р} = m_{п_р}\,\lambda_{0пк_р} = 2\cdot0{,}005\cdot10^{-6} = 1\cdot10^{-8}\ 1/ч.$$

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

$$P_{обм_р}(t) = e^{-(1{,}3496\ 10^{-7}+1{,}07967\ 10^{-7}+1\cdot10^{-8})\cdot1} = 0{,}999999747.$$

6.6. Интенсивность отказов расцепителя:

$$\lambda_р = \lambda_{к.з} + \lambda_{обр} + \lambda_п = 2{,}529\cdot10^{-7}\ 1/ч.$$

7. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ БТТ

7.1. Исходные данные:

$\lambda_{0к.з} = 0{,}05\cdot10^{-6}$ 1/ч – интенсивность короткого замыкания одного витка обмотки БТТ;

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

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

$\theta_{0с} = 80\ ^{\circ}C$ – температура охлаждающей среды;

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

Для трансформаторов:

$\lambda_{обр} = 0{,}25\,\lambda_{кз}$ 1/ч – интенсивность обрыва обмотки;

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

$m = 10$ – число паяных контактов;

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

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

$$\lambda_{кз} = 0{,}05\cdot10^{-6}\ 750\ e^{0{,}035(80+40-250)\cdot1} = 3{,}9627\cdot10^{-7}\ 1/ч.$$

7.3. Интенсивность обрыва обмотки для трансформаторов

$$\lambda_{обр} = 0{,}25\,\lambda_{к.з} = 9{,}925\cdot10^{-8}\ 1/ч.$$

№ изм. № изв. Инв. № дубликата 5813 Инв. № подлинника

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

$$\lambda_{п} = m_{п}\lambda_{0\,п.к} = 10 \cdot 0{,}005 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-8}\ 1/ч.$$

7.5. Вероятность безотказной работы БТТ:

$$P_{одн\ БТТ}(t) = e^{-(\lambda_{к.з} + \lambda_{обр} + \lambda_{п})t} = 0{,}999999454.$$

8. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА

$$P_{эм}(t) = 0{,}999985045 \cdot 0{,}99999888 \cdot 0{,}999990469 \cdot 0{,}999999747 \times$$

$$\times\ 0{,}999999454 = 0{,}999973603.$$

9. РАСЧЕТ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ

Средняя наработка на отказ определяется по формуле

$$T_{0} = \frac{1}{1 - 0{,}999973603} = 37000\ ч.$$

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

№ изм. | № изв. | Инв. № дубликата | Инв. № подлинника | 5813

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

№ изм. № изв.
Инв. № дубликата
Инв № подлинника 5813

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

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

Инв. № бликата 5813
Инв № длинника
gost.e-ecolog.ru