

З.А. БЕЛЛУЯН, С.З. БЕЛЛУЯН

МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПОДШИПНИКОВОГО И КОНТАКТНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассматриваются причины снижения надежности вследствие возникновения мгновенных и износовых отказов из-за старения и пиковых нагрузок элементов в контактно-щеточных и подшипниковых узлах синхронных генераторов мощностью до 100 кВт общепромышленного назначения. Приведены методы расчета надежности вышеуказанных узлов. Определены значения параметров, входящих в расчетные формулы.

Ключевые слова: контактно-щеточный и подшипниковый узлы, пиковая нагрузка, скорость, математическое ожидание, нормальное распределение, интенсивность отказа, надежность.

В процессе проектирования генераторов используют некоторый набор стандартных распределений. При испытаниях генераторов и их узлов необходимо проникнуть в физическую суть возникновения отказов.

В данной работе, с целью разработки мер по повышению надежности генераторов, произведен анализ мгновенных и постепенных отказов, возникающих в контактно-щеточных и подшипниковых узлах генераторов на стадии их эксплуатации и испытаний.

Среди причин возникновения отказов важное место занимают старение и воздействие пиковых нагрузок на элементы контактно-щеточного (электрощетки, контактные кольца) и подшипникового (подшипники) узлов при их эксплуатации.

Сколь совершенна ни была бы конструкция генератора и узлов и технология их производства, с течением времени материалы, из которых изготовлены элементы, претерпевают необратимые изменения. Эти изменения порождаются коррозией, износом, накоплением деформаций и усталости, диффузией одного материала в другой и т.п. Даже в одном элементе эти процессы налагаются друг на друга, взаимодействуют друг с другом и, в конечном счете, вызывают изменения рабочих характеристик. Так, изменение зазора в трущейся паре вал-подшипник происходит по мере вращения вала. В сопряжении поверхностных слоев идут сложные процессы окисления, упрочнения и накопления усталости, абразивного резания и схватывания за счет адгезии. Наложение этих процессов приводит к постепенному увеличению зазора и потере работоспособности подшипника. Зазор в сопряжении должен лежать в пределах, обеспечивающих безударное движение и отсутствие сухого трения.

В случае, когда рабочая характеристика выходит за заданные пределы, подшипник работает неудовлетворительно, и это квалифицируется как отказ.

В общем случае рабочая характеристика под влиянием старения может изменяться немонотонно, однако в большинстве случаев она меняется монотонно. Дальнейшие рассуждения будут основаны на предположении о монотонном характере изменения рабочих характеристик. Обозначим через $\eta(t)$ величину рабочей характеристики в момент времени t . Изменения $\eta(t)$ во времени обуславливаются как внешними факторами, так и ходом физических процессов, протекающих внутри генераторов и их узлов. Примем, что $\eta(t)$ зависит от времени линейным образом и описывается уравнением [1]

$$\eta(t) = \alpha t + \beta_0. \quad (1)$$

Очевидно, что $\alpha = d\eta(t)/dt$, и отказ возникает при $\eta(t) \geq M$ и $\beta = \eta(0)$.

В этом случае время безотказной работы τ определяется формулой

$$\tau = (M - \beta)/\alpha.$$

Средняя скорость износа для элементов генератора меняется во времени. Скорость наполнения усталости в металлах убывает во времени [2]. Общее описание поведения скорости износа $V_{из}(t)$ может быть дано в виде [1]

$$V_{из}(t) = V_1(t) + V_2(t) \cdot \rho(t), \quad (2)$$

где $V_1(t)$ и $V_2(t)$ - некоторые детерминированные функции, а $\rho(t)$ - случайный процесс, обладающий свойством стационарности.

В значительной части случаев достаточным является представление скорости в виде

$$V_{из}(t) = V_2(t) \cdot \rho(t).$$

Так, если $V_2(t) = at + b$, то скорость в среднем будет расти, а если $V_2(t) = a/(b + t)$, то будет убывать.

Не нарушая общности, можно принять математическое ожидание $M\{V_{из}(t)\} = V_2(t)$, а дисперсии $\rho(t)$ и $V_{из}$ определяются в виде

$$M\{\rho(t)\} = 1; \quad D\{V_{из}(t)\} = V_2^2(t) \cdot D\{\rho(t)\}.$$

Рассмотрим схему износа, обладающую следующими свойствами: средняя скорость износа постоянна; начальное качество узлов полностью однородно; скорость износа подвержена случайным вариациям; возникла ситуация, когда r повреждений приводят к отказу элемента (узла). Повреждения вызваны тем, что износ увеличивается скачкообразно на некоторую постоянную величину u . Процесс износа всегда имеет, по крайней мере, три зоны (см. рис.) [1,3].

Зона I называется зоной приработки. В процессе приработки трущейся пары вал - подшипник, электрошетка - контактное кольцо происходит направленное изменение шероховатостей поверхности. Скорость износа в этот период постепенно уменьшается. Характерной особенностью приработки является взаимная зависимость приращения износа. Поэтому приращение износа на участке времени от T до $(T + \Delta_T)$ зависит от его величины в предшествующий момент времени T .

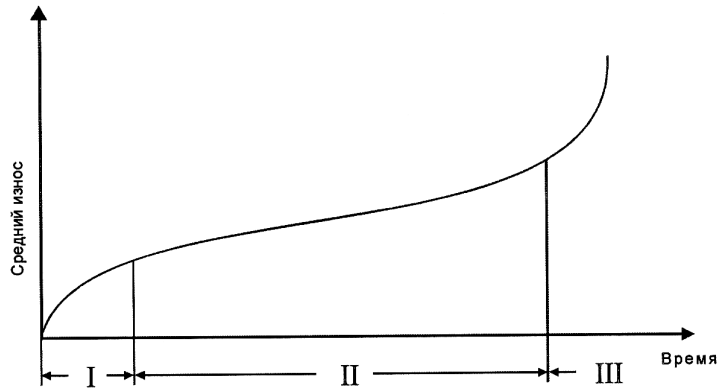


Рис. Кривая зависимости износа от времени

Зона II называется зоной установившегося или нормального износа. Применительно к трущейся паре зона нормального износа характерна постоянством рельефа шероховатостей и постепенным ростом зазора без изменения физической картины взаимодействия вала с подшипником и электрошетки с контактным кольцом. В этой зоне две величины приращений взаимонезависимы.

Зона III – катастрофический износ, при котором изменения в состоянии поверхности носят направленный характер, приращения в этой зоне взаимозависимы. С момента начала катастрофического износа идет направленное ухудшение качества поверхности, увеличивается ее шероховатость, возникает схватывание с последующим вырыванием крупных частей и разрушение. При катастрофическом износе изменения в состоянии элемента носят направленный характер, приращения износа в этой зоне взаимно зависимы.

Рассмотрим модель процесса изнашивания, когда приработка уже закончена, а катастрофический износ, как показали исследования, еще не наступил. Результаты исследования показали, что средняя скорость износа электрошорок ЭГ-14, применяемых в синхронных генераторах мощностью до 100 кВт, постоянна [3, 4].

При соблюдении постоянства средней скорости износа и случайных вариаций внешних условий (изменение влажности, температуры и т.д.) плотность вероятности распределения времени t представится в виде

$$f(T) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r (T - t_0)^{r-1} e^{-\lambda(T-t_0)}, & T \geq t_0, \\ 0, & T < t_0, \end{cases} \quad (3)$$

где t_0 - порог чувствительности (гарантийный срок службы); $\Gamma(r)$ – гамма- функция.

Обозначив $u = T - t_0$, получим плотность распределения вероятности:

$$f(u) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r u^{r-1} e^{-\lambda u}, & u \geq 0, \\ 0, & u < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Параметры распределения определяются по формулам [3, 4]

$$\lambda = 2 \frac{S_{\tau}^2}{m_1}, \quad r = 4 \frac{(S_{\tau}^2)^3}{(m_3)^2}, \quad t_0 = \bar{\tau} - \frac{2(S_{\tau}^2)^2}{m_3}, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}$ и S_{τ}^2 - эмпирические значения средней и дисперсии времени безотказной работы элементов; m_3 - центральный момент третьего порядка, определяемый по [1]; r - число (количество) повреждений (износов).

Исследования, проведенные многочисленными авторами, показали, что число повреждений для электрощеток и подшипников за время их эксплуатации $t=10000$ ч составляет $r \geq 12$. В этом случае гамма-распределение приближается к нормальному и максимальная погрешность почти меньше 7... 8 % [1, 4].

Плотность нормального распределения выражается по формуле [1]

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{r/\lambda^2}} e^{-\frac{(T-\tau/\lambda)^2}{2r/\lambda^2}}. \quad (6)$$

Обозначив $c = r/\lambda$ и $\sigma = \sqrt{r/\lambda^2}$, формула примет вид

$$f(T) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-c)^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

Параметры нормального распределения, среднее c и среднеквадратическое отклонение σ определяются на основе опытных данных об износе или о величинах τ_i . При наличии реализации износа необходимо по описанной выше методике найти λ и r , а затем c и σ . Если имеются опытные данные о времени безотказной работы N -го количества элементов $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$, то следует вычислить τ и S_{τ}^2 , затем принять, что $c = \bar{\tau}$, $\sigma^2 = S_{\tau}^2$.

Переход от гамма-распределения к нормальному создает большие вычислительные удобства как из-за наличия подробных таблиц функции Лапласа, так и за счет сравнительной простоты функционального вида этого распределения.

Теоретико-экспериментальные исследования, проведенные на электрических машинах мощностью до 100 кВт, показали, что скорость износа электрощеток определяется выражением

$$V = k P_{\max} 2\pi R_k n,$$

где $P_{\max}$ - давление, с помощью которого прижата поверхность щетки к кольцу или коллектору; R_k - радиус кольца или коллектора, по которому

вращаются электросчетки; n – число оборотов в секунду; k – жесткости пружин, значения которых приведены в [1].

Износ подшипников с течением времени в зависимости от скорости вращения вала определяется выражением

$$m_{\Sigma} = m_1 n^2 T,$$

где T – время работы подшипника; n – число оборотов вала.

Если известно критическое значение износа $m_{кр}$ вала, при котором наступает касание движущихся частей с неподвижными, например, якоря с поверхностью полюсов, то надежность подшипников определится выражением [1, 2]

$$P = 1 - \int_{-\infty}^m e^{-(m-\bar{m})/2\sigma^2} dm, \quad (8)$$

где износ m представится в виде

$$m = \ell_0 2\pi R_0 h,$$

ℓ_0 – длина подшипника; R_0 – радиус изнашиваемого участка; h_x – глубина износа.

Подшипниковый узел генераторов состоит из элементов – подшипников, колец, шариков и пр. Все функции распределения i -го элемента $F_i(T)$ таковы, что при $T(0)$ имеет место равенство

$$F_i(T) = gT^\gamma + O(T^\gamma), \quad (9)$$

где $g > 0$, $\gamma > 0$.

Как показано в [1,4], при больших k функция распределения $F(T)$ хорошо аппроксимируется выражением типа

$$F(T) = \begin{cases} 1 - e^{-T^\gamma/\beta}, & T \geq 0, \\ 0, & T < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\beta = 1/g^k$.

Это распределение называется распределением Вейбулла-Гнеденко. Плотность $f(T)$ и интенсивность отказов $\lambda(T)$ этого распределения имеют вид

$$f(T) = \begin{cases} e^{-T^\gamma/\beta} \frac{\gamma}{\beta} T^{\gamma-1}, & T > 0, \\ 0, & T < 0, \end{cases}, \quad \lambda(T) = (\gamma/\beta) T^{\gamma-1}. \quad (11)$$

Если $\tau^{(i)}$ есть случайное время срока службы по i -му элементу, то время безотказной работы подшипникового узла в целом определяется соотношением

$$\tau = \min(\tau^{(1)}, \tau^{(2)}, \dots, \tau^{(k)}).$$

Оценка параметров распределения Вейбулла-Гнеденко по известной величине $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ времени безотказной работы N генераторов по отказам подшипниковых узлов производится следующим образом.

Выбираются границы разбиений θ_1 и θ_2 , $\theta_1 < \theta_2$ и подсчитываются количества значений τ_j , лежащих в диапазонах $(0, \theta_j)$, $j=1,2$. Пусть эти количества равны $m(\theta_j)$. Находятся отношения: $v(\theta_j) = m(\theta_j)/N$.

Параметры γ и β оцениваются по формулам

$$\gamma = \frac{\ln \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_1)} \right] - \ln \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_2)} \right]}{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}, \quad \beta = \theta_1^\gamma / \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_1)} \right]. \quad (12)$$

Исследования старения изоляционных материалов показали, что размер наибольшего дефекта в элементах является функцией абсолютной температуры.

Как показано в [1, 3], старение элементов S происходит по уравнению

$$\ln S = \ln S_0 - kte^{-Q/E}, \quad (13)$$

где Q – энергия активации; E – энергия реакции; k – константы, характеризующие размер дефекта, зависящие от материала, функции концентраций реагирующих веществ, а также их природы; t – долговечность (срок службы).

Для изоляционных материалов часто используют так называемый закон “десяти градусов”. Он гласит, что долговечность изоляции уменьшается вдвое при повышении рабочей температуры на каждые 10 °C.

Как показал анализ причин отказов в контактно-щеточном и подшипниковом узлах генераторов, в процессе эксплуатации одновременно действуют “пиковые” нагрузки и износ. Действие износа сказывается в постепенном снижении предельно допустимого уровня нагрузки, а превышение этого уровня “пиком” нагрузки приводит к отказу. Износ и мгновенное повреждение, приводящие к отказу, зависят от предельно допустимой нагрузки.

Пусть имеются причины $\Pi^{(1)}$ и $\Pi^{(2)}$, действующие параллельно и независимо друг от друга. Если причина 1 вызвала отказ, то время безотказной работы будет $\tau^{(1)}$, а причина 2 вызывает отказ с временем безотказной работы $\tau^{(2)}$.

Сказанное позволяет утверждать, что время безотказной работы τ задается равенством

$$\tau = \min(\tau^{(1)} \tau^{(2)}). \quad (14)$$

Если $F_i(T)$ есть функция распределения времени безотказной работы $\tau^{(i)}$ при изолированном действии i -й причины и одновременно действует несколько причин отказов, что наиболее типично на практике, то функция распределения времени τ представится как

$$F(T) = 1 - [1 - F_1(T)] \cdot [1 - F_2(T)]. \quad (15)$$

Функция распределения контактно-щеточного и подшипникового узлов в соответствии с [3] определится формулой

$$F(T) = 1 - e^{-\lambda T} \left[1 - \Phi \left(\frac{T - c}{\sigma} \right) \right], \quad (16)$$

а плотность этого распределения задается равенством

$$f(T) = e^{-\lambda T} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(T-c)^2/2\sigma^2} + \lambda \left(1 - \Phi \frac{T-c}{\sigma} \right) \right]. \quad (17)$$

Для генераторов мощностью до 100 кВт нами проведены испытания на надежность и определены параметры, входящие в расчетные формулы.

Во время испытаний для контактно-щеточного и подшипникового узлов в качестве отказов принимаются: заклинивание подшипника; резкое увеличение температуры, шума и вибрации сверх установленных уровней; превышение температуры сверх 150 °С; преждевременный предельный износ щетки; значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр в установившемся режиме; повреждение траверсы и щеткодержателя; пробой изоляции контактных колец и траверсы; сильный подгар контактных колец.

Анализ эксплуатации и испытаний синхронных генераторов мощностью до 100 кВт показал, что в контактном кольце, электрощетке, щеткодержателе и соединительных подводящих проводах контактно-щеточного узла могут произойти только внезапные отказы, а в электрощетках и контактных кольцах – как внезапные, так и постепенные (износные) отказы. Значения интенсивностей отказов этих элементов приведены в таблице [4].

Таблица

Значения интенсивностей отказов электрощеток, 1/ч

Щеткодержатель	Щетка электрографитная	Контактное кольцо	Соединительный провод
0,2·10 ⁻³	0,07·10 ⁻⁵	0,16·10 ⁻⁵	0,05·10 ⁻⁵

Методы расчета надежности подшипникового и контактно-щеточного узлов синхронных генераторов мощностью до 100 кВт приведены в [1,5]. По указанной методике произведен расчет надежности этих узлов для генератора типа ОС-72 (мощностью 8 кВт) за время гарантийного срока службы $t = 8000$ ч, которая составляет 0,862.

По данным эксплуатации, надежность этих узлов за время гарантийного срока службы $t = 8000$ ч составляет 0,815. Сравнение эксплуатационных данных с расчетными показало малое расхождение между ними, что подтверждает правильность приведенных выше рассуждений.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что проникновение вглубь явления отказа, подробное обследование причин снижения надежности, тщательный учет влияния производственно-технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов способствуют расчету надежности как необходимая часть исследования. Только в этом случае исследования будут служить источником для разработки мер по повышению качества и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: Советское радио, 1966. – 167 с.
2. Серенсен С.В., Кагаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машгиз, 1963. – 264 с.
3. Гнеденко Б.И., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 497 с.
4. Отраслевой стандарт ОСТ 16 0.800.887-81 Генераторы синхронные мощностью до 1000 кВт. Надежность. Общие требования к надежности и методам контроля (ответственный исполнитель Беллуян З.А.) – 71 с.
5. Беллуян З.А. Надежность механических узлов генераторов // Международный научный журнал “Проблемы прикладной механики”. – Тбилиси, 2003. – № 4(13). – С. 103-107.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.01.2007.

Զ.Ա. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ, Ս.Զ. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ

ՄԻՆԻՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՌԱՆՑՔԱԿԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ԿՈՆՏԱԿՏԱ-ԽՈՋԱՆԱԿԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼՆԵՐԸ

Քննարկված են հուսալիության նվազեցմանը հանգեցնող մոդելներն ինչպես ակնթարթային, այնպես էլ մաշվածքային խափանումների ընթացքում, որոնք հանդես են գալիս կոնտակտա-խոզանակային և առանցքակալային հանգույցներում: Բերված են նշված հանգույցների հուսալիության հաշվարկման մեթոդները, որոշված են այն պարամետրերի արժեքները, որոնք բերված են հաշվարկման բանաձևերում:

Առանցքային քառեր. կոնտակտա-խոզանակային և առանցքակալային հանգույցներ, գերբեռնվածություն, արագություն, մաթեմատիկական սպասում, նորմալ բաշխում, խափանման ինտենսիվություն, հուսալիություն:

Z.A. BELLUYAN, S.Z. BELLUYAN

FAILURE MODELS OF THE BEARING AND BRUSH CONTACT LINKS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

The models bringing to the decrease in the reliability at both instantaneous and fatigue failures are discussed. These models act in brush contact and bearing links. The methods for calculating the reliability of the mentioned links are introduced, the values of the parameters introduced in the calculating formulae are defined.

Keywords: brush and bearing contact links, peak load, speed, mathematical expectation, normal distribution, failure intensity, reliability.