

З.А. БЕЛЛУЯН, С.З. БЕЛЛУЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСКОРЕНИЯ ПРИ ФОРСИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ И СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

Предложена методика выбора параметров форсированного режима и обоснованы верхние границы факторов при проведении ускоренных испытаний подшипниковых узлов синхронных генераторов мощностью до 100 кВт. Получено уравнение регрессии для подшипникового узла. Определены коэффициенты ускорения генераторов, исходя из их значений для отдельных узлов.

Ключевые слова: ускоренные испытания, подшипниковые узлы, температура, вибрация, нагрузка, уровень, дисбалансные массы, коррекция ротора, регрессия, матрица, коэффициент ускорения.

Испытания синхронных генераторов на надежность обычно проводятся форсированием основных воздействующих факторов. Такие испытания называются ускоренными (или форсированными).

В настоящее время имеется ряд работ, в которых рассмотрены проблемы ускоренных испытаний некоторых узлов генераторов: блока регулирования напряжения, обмоток статора и ротора, контактно-щеточного узла [1,2].

Данная работа посвящена разработке методики ускоренных испытаний на надежность подшипниковых узлов синхронных генераторов мощностью до 100 кВт в составе генератора, а также установлению коэффициента ускорения генераторов в целом.

В условиях эксплуатации генераторы различного назначения и исполнения подвергаются воздействиям таких различных факторов, как температура, влажность, запыленность, ударные нагрузки и т.д. [2].

Исходя из предварительных исследований, а также экономических соображений и сложности проведения экспериментов, при ускоренных испытаниях на надежность работы отдельных основных узлов генератора в качестве форсирующих выбраны факторы, приведенные в табл.1. Их выбор произведен с учетом максимальной степени влияния ужесточенного фактора на скорости разрушения и старения узлов и возможности их воспроизводства при работе узлов в составе генератора.

При проведении испытаний в ускоренных режимах, кроме форсируемых, воспроизводятся также такие значимые факторы, как влажность, запыленность окружающей среды, ударные (транспортные) нагрузки. Уровни и продолжительность воздействия этих факторов, а также режимы работы генераторов при проведении исследований (кроме ускоренных режимов) соответствуют типовым реальным условиям эксплуатации генераторов. При проведении факторного эксперимента уровни относительной влажности, запыленности окружающего воздуха и ударных нагрузок не варьируются (остаются номинальными).

Таблица 1

Форсируемые факторы для основных узлов генератора

Наименование узла	Форсируемые факторы
1. Подшипниковый узел	Температура, вибрация, нагрузка
2. Блок регулирования напряжения	Температура, вибрация
3. Контактно-щеточный узел	Вибрация, нажатие щеток
4. Обмотки статора и ротора	Температура, вибрация

В эксперименте нагрузкой является приведенная нагрузка подшипника, которая изменена в пределах от номинального значения до двойного. Таким образом, осуществлен выбор факторов, включаемых в факторный эксперимент.

Для подшипникового узла генератора задача нахождения максимального уровня форсирования решается анализом влияния предельных величин нагрузок, приводящих к отказу без изменения физики разрушения [2]. Величина максимальной нагрузки на подшипник определяется исходя из максимально допустимого контактного напряжения [2]. Температура подшипникового узла обуславливается температурой обмотки ротора, температурой окружающей среды и ее повышением вследствие трения при вращении. Температура подшипника не должна превышать температуру каплепадения смазки и температуру отпуска материала деталей подшипника. Расположение дисбалансных масс в плоскостях коррекции ротора должно отвечать условиям, указанным в [3].

Подшипниковые узлы испытываются в рабочем режиме генератора. Для получения дополнительных данных в качестве первичного двигателя используется генератор, работающий в двигательном режиме. Перед испытаниями генератор (сочлененный с двигателем) устанавливается и жестко крепится к амортизированной платформе.

Во время проведения ускоренных испытаний подшипниковых узлов были приняты следующие критерии отказов: заклинивание подшипника; резкое увеличение температуры, шума и вибрации сверх установленных уровней; превышение температуры наружного кольца подшипника более 150°C .

В ходе испытаний выявлены следующие отказы и неисправности: расслабление крепежа подшипниковых крышек, вытекание и высыхание смазок – 29 %; повышенный шум в подшипнике – 8 %; разрушение сепаратора – 39 %; стук в подшипнике – 4 % [3]. Ускорение испытаний достигается за счет форсирования режима работы подшипника (увеличение нагрузки, температуры и вибрации). Контроль температуры подшипникового узла производится с помощью термопар, встроенных в подшипниковые щиты. Для подшипникового узла используется матрица ортогонального композиционного планирования для трех факторов (табл. 2) [2-4].

Таблица 2

Матрица ортогонального центрального композиционного планирования
для трех факторов подшипникового узла

Элементы плана эксперимента	Номер опыта	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃
План полного факторного эксперимента	1	+	-	-	-
	2	+	+	-	+
	3	+	-	+	-
	4	+	+	+	-
	5	+	-	-	+
	6	+	+	-	-
	7	+	-	+	+
	8	+	+	+	+
“Звездные точки”	9	+	+1,215	0	0
	10	+	-1,215	0	0
	11	+	0	+1,215	0
	12	+	0	-1,215	0
	13	+	0	0	+1,215
	14	+	0	0	-1,215
Нулевая точка	15	+	0	0	0

Продолжение табл.2

Номер опыта	x' ₄	x' ₅	x' ₆	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	Наработка на отказ, ч
1	0,27	0,27	0,27	+	+	+	10000
2	0,27	0,27	0,27	-	+	-	3115
3	0,27	0,27	0,27	-	+	-	4631
4	0,27	0,27	0,27	+	-	-	2110
5	0,27	0,27	0,27	+	-	-	3771
6	0,27	0,27	0,27	-	-	+	4238
7	0,27	0,27	0,27	-	-	+	5707
8	0,27	0,27	0,27	+	+	+	1848
9	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	2483
10	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0	6371
11	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	3391
12	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0	5463
13	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	3534
14	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0	5420
15	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	4427

Примечание. x₁ – нагрузка, x₂ – температура, x₃ – вибрация.

$$x'_4 = x_1^2 - 0,73; \quad x'_5 = x_2^2 - 0,73; \quad x'_6 = x_3^2 - 0,73.$$

Испытаниям на надежность были подвергнуты 16 генераторов серии ОС (8 генераторов типа ОС-71 мощностью 16 кВт и 8 генераторов типа ОС-72 мощностью 30 кВт). В процессе испытаний зафиксированы как внезапные, так и износные отказы. В табл.3 приведены зачетные отказы подшипникового узла этих генераторов.

Таблица 3

Зачетные отказы подшипникового узла

№	Заводской номер отказавшего генератора (Г), двигателя (Д)	Фактическая наработка генератора, ч, в ускоренном режиме	Общее количество возникших отказов	Возникновение отказов подшипникового узла	Независимые переменные		
					нагрузка x_1	вибрация x_2	температура x_3
1	Г427 (30 кВт)	5169	17	1			
2	Д422 (30 кВт)	5169	14	2	+	+	+
3	Г417 (30 кВт)	2548	6	1			
4	Д420 (30 кВт)	2548	13	-	-	+	+
5	Г416 (30 кВт)	3307	12	2			
6	Д434 (30 кВт)	3307	12	2	+	-	+
7	Г418 (30 кВт)	2083	13	1			
8	Д435 (30 кВт)	2083	6	-	-	-	+
9	Г485 (16 кВт)	5657	5	1			
10	Д478 (16 кВт)	5657	6	2	+	+	-
11	Г479 (16 кВт)	5936	10	2			
12	Д486 (16 кВт)	5936	14	3	-	+	-
13	Г480 (16 кВт)	5707	14	1			
14	Д483 (16 кВт)	5707	11	1	+	-	-
15	Г477 (16 кВт)	6497	15	1			
16	Д481 (16 кВт)	6497	9	2	-	-	-

При испытаниях в качестве выходного параметра выбрана наработка подшипникового узла. Уровни и интервалы варьирования приведены в табл. 4.

По данным табл. 2 определены значения коэффициентов b_i и b_{ij} . Оценка значимости полученных коэффициентов производилась согласно t -критерию (Стьюдента), а проверка адекватности – по критерию Фишера при уровне достоверности 0,95. Для определения дисперсии проводилось 7 параллельных опытов в центральной точке плана.

Таблица 4

Уровни и интервалы варьирования

Независимая переменная	Кодовые обозначения	Уровни варьирования			Интервал варьирования	Независимые переменные в относительных единицах
		-1	0	+1		
Нагрузка	x_1	1,0	1,5	2,0	0,5	$\chi_1 = (\delta_1 - 15)/0,5$
Вибрация, мкм	x_2	45	60	75	15	$\chi_2 = (x_2 - 60)/15$
Температура, °C	x_3	90	110	130	20	$\chi_3 = (x_3 - 110)/20$

После оценки значимости и адекватности коэффициентов получено уравнение, связывающее наработку на отказ подшипникового узла $\hat{O}_{\text{п.а.о.у.}}$ с воздействующими факторами δ_i [3]:

$$T_{\text{под.уз}} = 4644 - 1426x_1 - 853x_2 - 806x_3 + 1021x_1x_2 + 470x_1x_3 - 107x_1^2 - 108x_2^2 - 142x_3^2. \quad (1)$$

По аналогии с подшипниковым узлом генераторов произведены статистически спланированные эксперименты отдельных узлов генераторов. Получены уравнения зависимости показателя надежности (наработки на отказ) от уровней воздействующих факторов для основных узлов генераторов [1,2].

Эти зависимости в виде графиков приведены на рис.1 а,б,в,г,д.

По полученным уравнениям регрессии определяются коэффициенты ускорения испытаний подшипниковых узлов K_Y генераторов в зависимости от уровней воздействующих факторов:

$$K_Y = T_{i_i} / T_{\hat{a}_i}, \quad (2)$$

где $\hat{O}_{i_i}$ и $\hat{O}_{\hat{a}_i}$ – наработки на отказ соответственно при нижних и верхних значениях уровней воздействующих факторов.

Нижний уровень воздействующих факторов соответствует условиям нормальной эксплуатации, заданным в ТЗ или ТУ на генераторы, а верхний – ужесточенному режиму воздействия при ускоренных испытаниях.

Как видно из рис.1, максимальные значения коэффициентов ускорения испытаний для различных узлов генератора существенно отличаются друг от друга. Так, максимальное значение K_Y для обмотки статора при верхних значениях воздействующих факторов достигает 20, а для БРН и подшипникового узла – 12.

Это позволяет произвести при необходимости отдельные ускоренные испытания на надежность отдельных узлов генератора при максимальных значениях коэффициентов ускорения испытаний. Однако практический

интерес представляет проведение ускоренных испытаний генератора в целом.

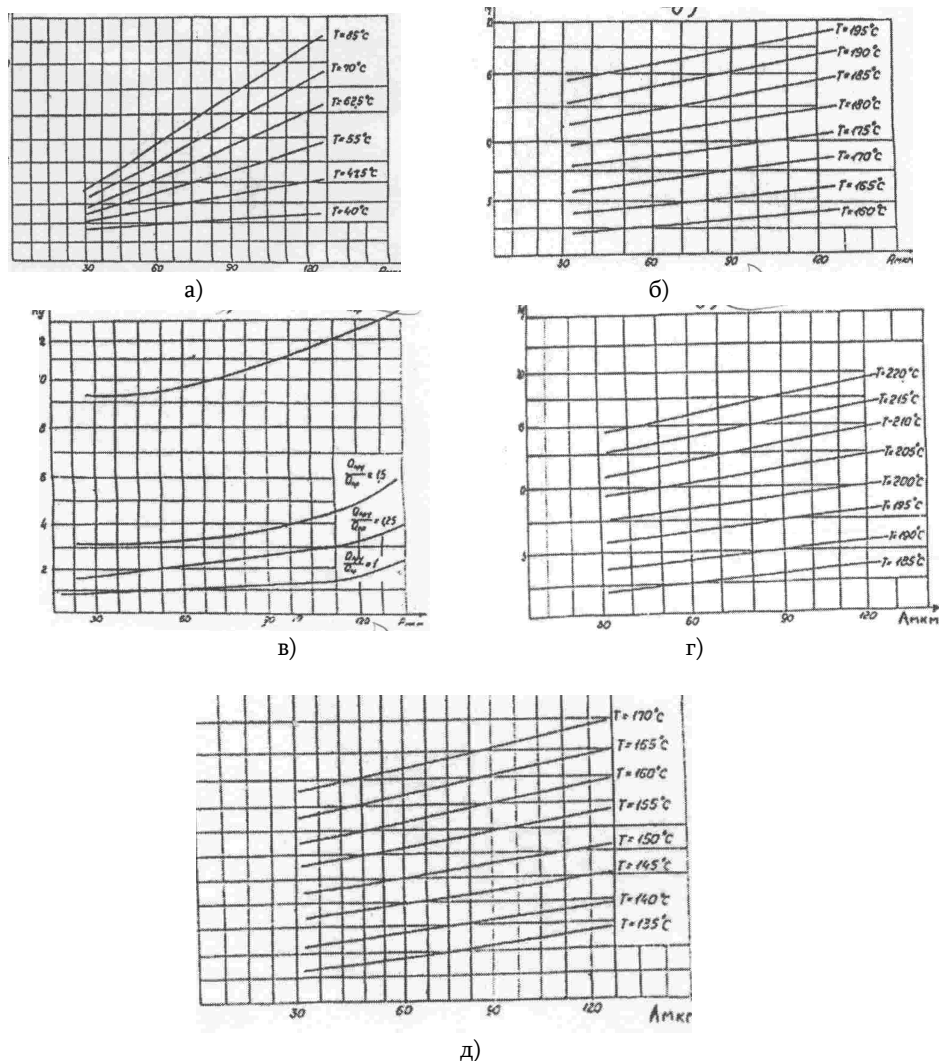


Рис.1. Зависимость коэффициентов ускорения испытания отдельных узлов генераторов от амплитуды вибрации:
а - блок регулирования напряжения, б - обмотки класса изоляции F⁰,
в - подшипниковый узел, г - обмотки класса изоляции H,
д - контактно-щеточный узел

Максимальный коэффициент ускорения имитируется наиболее “слабым”, с точки зрения надежности, узлом генератора. В нашем случае – это блок регулирования напряжения $K_{\text{у.макс}} = 9,8$.

Величины наработки на отказ, определяемые по уравнениям регрессии или по рис.1, приводятся к нормальным условиям по формуле

$$T_{Hi} = K_{yi} T_{yi}, \quad (3)$$

где K_{yi} - коэффициент испытания i -го узла; T_{yi} - наработка на отказ i -го узла, определенная при ускоренных испытаниях.

С учетом диапазона изменения воздействующих факторов и коэффициента полинома (1) приходим к выводу, что наиболее существенное воздействие на надежность генераторов оказывают температура, вибрация и нагрузка.

Выводы. Если учесть, что основная часть серийно выпускаемых генераторов мощностью до 100 кВт конструктивно одинакова и изготавливается из одних и тех же конструкционных, изоляционных и механических материалов, то для определения влияния различных уровней внешних воздействующих факторов на надежность генераторов и их подшипниковых узлов формулу (2) можно считать универсальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беллуян З.А.** Ускоренные испытания на надежность обмоток статора и ротора синхронных генераторов // Проблемы прикладной механики. - Тбилиси, 2003. - № 4 (13). - С.98-102.
2. **Отраслевой стандарт** ОСТ 16 0.801.218-84. Машины электрические вращающиеся от 63 до 355 габарита включительно. Методика ускоренных испытаний на надежность. - М.: Стандартэлектро, 1984 / Ответственный исполнитель З.А. Беллуян. и др. - 63 с.
3. **Беллуян З.А., Григорян Н.З., Беллуян С.З.** О методике испытаний подшипников для генераторов на безопасность // Стандарты и качество. Партнеры и конкуренты. - М., 2004. - № 5. - С.31-34.
4. **Налимов В.В., Чернова Н.А.** Статистические методы планирования экспериментальных исследований. - М.: Наука, 1965. - 340 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 05.02.2005.

Զ.Ա. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ, Ս.Զ. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ

ԱՌԱՆՑՔԱԿԱԼԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՑՑԻ ԵՎ ՄԻՆԽՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՑՎԱԾ
ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿ

Բերված են մինչև 100 կՎտ հզորության գեներատորների առանցքակալային հանգույցի հուսալիության փորձարկումների կատարման ժամանակ ռեժիմի պարամետրերի և նրանց վերին սահմանների ընտրության մեթոդները: Ստացված է այդ հանգույցի ռեգրեսիայի հավասարումը: Որոշված են ինչպես գեներատորի, այնպես էլ նրա առանձին հանգույցների փորձարկումների արագացման գործակիցները:

Առանցքային բառեր. առանցքակալային հանգույց, արագացված փորձարկումներ, ջերմաստիճան, բեռ, դիսբալանսային զանգվածներ, ռեգրեսիա, մատրից, արագացման գործակից, մակարդակ:

Z.A. BELLUYAN, S.Z. BELLUYAN

SOME EXPERIMENTS ON BEARING UNIT WINDINGS OF SYNCHRONIC GENERATORS'
RELIABILITY

The choice of methods for forced regime parameters is proposed and upper borders of factors while providing accelerated experiments in bearing joints of synchronized generators are established.

Keywords: accelerated tests, bearing, nodes, temperatures, vibration, loading, level, disbalance masses, rotor correctness, regression, matriix, acceleration factor.