

УДК 621.3

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

З.А. Беллюян

Государственный инженерный университет Армении. г. Ереван
E-mail: standard@seua.am

Предложена методика выбора параметров форсирования режима и обоснованы верхние границы влияющих факторов при проведении ускоренных испытаний отдельных узлов синхронных генераторов на надежность. Получено уравнение регрессии наработки для этих узлов. По полученным зависимостям определены коэффициенты ускорения испытаний генераторов на надежность. Методика может быть рекомендована при разработке соответствующих планов испытаний для любых электротехнических изделий.

Организация и проведение испытаний синхронных генераторов на надежность является актуальной задачей. Для генераторов, время безотказной работы которых составляет более тысячи часов, испытания на надежность должны быть ускоренными.

Основной целью ускоренных испытаний является получение информации о надежности генераторов в течение времени испытания, меньшего, чем гарантийная долговечность t_2 ($t_u < t_2$).

В настоящее время имеется ряд работ, в которых рассмотрены проблемы ускоренных испытаний разных видов изделий – радиоэлектронной аппаратуры, асинхронных двигателей и т.д. Однако до последнего времени не была разработана методика ускоренных испытаний синхронных генераторов на надежность.

Настоящая работа посвящена разработке такой методики.

Нами были решены следующие задачи: выявлены наиболее слабые узлы генераторов; установлены и определены основные факторы и пределы их изменений, которые должны быть воспроизведены при ускоренных испытаниях; определены режимы и проведены ускоренные испытания.

Первая из поставленных задач решена в [1]. Установлено, что наиболее уязвимыми узлами в синхронных генераторах являются блок регулирования напряжения (БРН), обмотки статора и ротора, контактно-щеточный (КЩУ) и подшипниковый (ПОД) узлы. Поскольку отказы этих узлов составляют 97 % от общего количества отказов, при разработке методики ускоренных испытаний синхронных генераторов на надежность допустимо ограничиться исследованием только указанных узлов.

В реальных условиях эксплуатации генераторы различного назначения и исполнения подвергаются воздействию случайных внешних факторов: повышенной и пониженной температур, влажности, пыли, песка, ветра, дождя, морского тумана, пониженного атмосферного давления, инея и росы, грибковых образований, солнечной радиации, вибрации, одиночных и многократных ударов и пр. Степень влияния каждого из этих факторов на генератор и его узлы различна, поэтому необходимо определить, какие из них наиболее опасны для соответствующего узла и генератора в целом, и вы-

брать наиболее опасные в качестве основных для проведения исследований.

С этой целью использован статистический метод априорной информации (экспертный метод) [1]. Было опрошено 15 ведущих специалистов в области электромашиностроения. В опросный список были включены факторы, которые оговариваются в технических заданиях (ТЗ) и технических условиях (ТУ) на генераторы различного назначения, и диапазоны их изменения.

Исходя из предварительных исследований, а также экономических соображений и сложности проведения экспериментов, в качестве основных воздействующих факторов выбраны факторы, приведенные в табл. 1. Выбор форсирующих факторов произведен с учетом максимальной степени влияния ужесточенного фактора на скорости разрушения и старения узла и возможности их воспроизводства при их работе в составе генератора.

Для проведения ускоренных испытаний подшипникового узла на надежность в качестве форсирующих факторов выбраны: температура, вибрация и нагрузка. В эксперименте нагрузка является приведенной нагрузкой подшипника, которая изменяется от номинальной величины до удвоенной.

Для подшипника генератора задача нахождения максимального уровня форсирования решается анализом влияния предельных величин нагрузок, приводящих к отказу без изменения физики разрушения [3–5].

Величина максимальной нагрузки на подшипник определяется исходя из максимально допустимого контактного напряжения [3].

Температура подшипника обуславливается температурой обмотки ротора, температурой окружающей среды и ее повышением вследствие трения при вращении.

Температура подшипника не должна превышать температуры каплепадения смазки и температуры отпуска материала деталей подшипника.

Необходимое значение температуры обмотки ротора и статора при ускоренных испытаниях достигается изменением расхода охлаждающего воздуха (путем дросселирования вентиляционных окон), проходящего через генератор при заданной температуре воздуха, окружающего генератор [3, 4].

Таблица 1. Уровни форсирующих факторов и интервалы варьирования для отдельных узлов генераторов

Наименование узлов генератора	Независимые переменные	Уровень изменения переменных			Интервал изменения переменных	Независимые переменные в относительных единицах
		нижний –	нулевой 0	верхний +		
Блок регулирования напряжения	Температура окружающей среды, °С	55	62,5	70	7,5	$X_1 = \frac{T-55}{7,5}$
Обмотка ротора	Температура обмотки, °С	125	152,5	180	27,5	$X_1 = \frac{T-152,5}{27,5}$
Обмотка статора	Температура обмотки, °С	130	145	160	15	$X_1 = \frac{T-145}{15}$
Контактно-щеточный узел	Давление на щетки, г/см ²	450	650	850	200	$X_1 = \frac{P-650}{200}$
Подшипниковый узел	Нагрузка на подшипник	2,0	2,5	3,0	0,5	$X_1 = \frac{Q_{np.k.}/Q_{np.} - 2,5}{0,5}$
	Температура подшипника, °С	80	90	100	10	$X_3 = \frac{T-90}{190}$
Для каждого из узлов	Вибрация, мкм	40	55	70	15	$X_2 = \frac{A-55}{15}$

Значение давления на щетки контактно-щеточного узла достигается путем подбора жесткости нажимных пружин [3, 4].

Необходимая температура при испытании БРН достигается путем дросселирования вентиляционных окон блока и повышения температуры окружающей генератор (блок) среды до допустимой величины, указанной в технической документации на генераторы.

Требуемая амплитуда вибрации генератора (узлов) достигается созданием дополнительной неуравновешенности ротора генератора и установкой агрегата (двигатель-генератор) на амортизационную платформу.

В соответствии с изложенным, мы имеем дело с двумя независимыми переменными X_1 и X_2 , и каждую из них варьировать на двух уровнях, условно обозначенных символами +1 и –1 для БРН, обмоток статора и ротора и КЩУ [3, 5].

Для подшипникового узла мы имеем дело с тремя независимыми переменными X_1 , X_2 и X_3 , каждую из которых также варьировать на двух уровнях +1 и –1.

В испытаниях в качестве выходного параметра выбрана работоспособность соответствующего узла – наработка на отказ.

Матрицы планирования в кодовых значениях переменных для отдельных узлов генератора представлены в [2, 3].

Испытаниям на надежность подвергались 16 генераторов серии ОС (8 генераторов типа ОС-71 мощностью 16 кВт и 8 генераторов типа ОС-72 мощностью 30 кВт). Половина указанных генераторов работала в режиме двигателя. В процессе испытаний фиксировались как внезапные, так и износные отказы.

Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии производилась по критерию Фишера, в

результате чего получены следующие уравнения, связывающие наработку на отказ с воздействующими факторами:

а) для обмотки ротора [5]:

$$T_{об.рот} = 7686 - 2877 X_1 - 4023 X_2 + 1931 X_1 X_2;$$

б) для обмотки статора [5]:

$$T_{об.ст} = 15510 - 13510 X_1 - 4905 X_2 + 4797 X_1 X_2;$$

в) для блока регулирования напряжения

$$T_{БРН} = 4329 - 2660 X_1 - 2019 X_2 + 1903 X_1 X_2;$$

г) для контактно-щеточного узла

$$T_{КЩУ} = 5951 - 2729 X_1 - 2629 X_2 + 2292 X_1 X_2;$$

д) для подшипникового узла

$$T_{под} = 4644 - 1426 X_1 - 853 X_2 - 806 X_3 + 1021 X_1 X_2 + 470 X_1 X_2 - 107 X_1^2 - 108 X_2^2 - 142 X_3^2.$$

Зачетные отказы отдельных узлов генераторов приведены в табл. 2.

По полученным уравнениям регрессии определяются коэффициенты ускорения испытаний в зависимости от уровней воздействующих факторов:

$$K_{y_i} = T_{н_i} / T_{в_i},$$

где $T_{н_i}$ и $T_{в_i}$ – наработка 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 на надежность.

Коэффициент ускорения испытаний генератора K_y зависит от коэффициента ускорения испытаний его узлов. Номинальное значение K_y генератора принимается равным максимальному коэффи-

Таблица 2. Зачетные отказы отдельных узлов генераторов

Заводской номер генератора – Г, двигателя – Д, в скобках – мощность в кВт	Фактическая наработка в ускоренном режиме, ч	Наработка при нормальных условиях, ч	Наработка отдельных узлов генераторов в ускоренном режиме, ч				
			ПОД	Обмотка ротора	КЩУ	Обмотка статора	БРН
Г427 (30)	5169	31000	1252	12	–	1190	44, 1252, 3826, 4681
Д422 (30)	5169	31000	1214, 5113	14	1214, 3043	–	1214, 1938, 5109
Г417 (30)	2548	15000	998	312	2214	998	–
Д420 (30)	2548	15000	–	–	209, 2446	894, 1138	–
Г416 (30)	3307	20000	1357, 2940	3; 2401	2246	2203, 2401	485, 2022
Д434 (30)	3307	200000	2861, 3221	10; 1663	200	200	3195
Г418 (30)	2083	12000	1353	1387	–	1387, 1410	169, 913, 1006
Д435 (30)	2083	12000	–	–	–	–	–
Г485 (16)	5657	34000	1155	1243	4427, 5100	–	621
Д478 (16)	5657	34000	465, 619	–	686, 4920	–	–
Г479 (16)	5936	35000	1397	–	–	–	–
Д486 (16)	5936	35000	1401, 5078	2228	68, 4503	–	1066
Г480 (16)	5707	34000	459	4652	3309, 3451	–	3202, 3304
Д483 (16)	5707	34000	520	2915	1466, 4901	4335	292, 4335
Г477 (16)	6497	39000	602	–	–	–	5536, 5984, 6218
Д481 (16)	6497	39000	234, 1062	–	6100	–	239

циенту ускорения испытаний того узла, у которого это значение является минимальным по отношению к другим узлам.

Испытания генератора с выбранным значением K_y обеспечивают выбором режимов работы узла, при которых коэффициент ускорения испытания равен. Коэффициент ускорения испытаний для генератора определяется коэффициентом ускорения испытаний контактно-щеточного узла, максимальный коэффициент ускорения испытаний равен $K_y=7$ [3, 4]. При выборе форсированных режимов значения амплитуды вибрации для всех узлов принимались одинаковыми. По заданным значениям амплитуда вибрации и коэффициента ускорения в соответствии с [3, 4] были найдены форсированные значения отдельных узлов генераторов [3, 4].

По результатам ускоренных испытаний генераторов на предприятиях, выпускающих синхронные

генераторы, автором разработаны и внедрены отраслевые стандарты [3, 4].

Нами определены показатели надежности (безотказности и долговечности) выпускаемых генераторов серий ЕСС и ОС по данным эксплуатации и ускоренных испытаний. Результаты показали, что расхождение между значениями показателей надежности отдельных узлов генератора не превышает 5...7 %.

Если учесть, что основная часть серийно выпускаемых генераторов мощностью до 100 кВт конструктивно практически одинакова, изготавливается из одних и тех же конструкционных и изоляционных материалов, то для определения влияния различных уровней внешних воздействующих факторов на надежность генераторов и их узлов на стадии проектирования можно воспользоваться полученными выше зависимостями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беллуян З.А. Анализ выпускаемых синхронных генераторов мощностью до 100 кВт // ИТУ (сборник), Ереван, 2002. – № 4–1. – С. 101–105.
2. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментальных исследований. – М.: Наука, 1965.
3. ОСТ 16 0.801.218-84. Машины электрические вращающиеся от 63 до 355 мм габарита включительно. Генераторы синхронные явнополюсные высокоскоростные. Методика ускоренных испытаний на надежность.
4. ОСТ 16 0.800.882-81. Генераторы синхронные с высотой оси вращения от 56 до 355 мм (мощностью от 0,5 до 100 кВт). Надежность. Методика ускоренных испытаний.
5. Беллуян З.А. Ускоренные испытания на надежность обмоток статора и ротора синхронных генераторов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 141–143.

УДК 621.31-5

ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

В.Г. Букреев, И.Ю. Краснов

Томский политехнический университет
E-mail: vbuk@yandex.ru

Осуществлен синтез робастных алгоритмов управления нестационарными электромеханическими объектами, произведена оценка их чувствительности.

Введение

Принципиально важным свойством адаптивных методов обработки информации является робастность, под которой понимается статистическая надежность метода и нечувствительность результатов к изменениям условий наблюдения. Основной особенностью рассматриваемых объектов является их нестационарность: параметры объектов с течением времени изменяются в определенном диапазоне. Нестационарность вносит принципиальные трудности как в изучение структурных свойств объекта (устойчивости, управляемости и наблюдаемости), так и в разработку алгоритмов оценивания и управления.

1. Описание модели объекта управления

Пусть математическая модель функционирования электромеханического объекта описана системой линейных нестационарных дифференциальных уравнений вида [1]:

$$\dot{x}(t) = \bar{A}(t)x(t) + \bar{b}(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(t)$ – n -мерный вектор, компоненты которого определяют состояние электромеханического объекта в момент времени t ; $u(t)$ – m -мерный вектор управляющих воздействий; $\bar{A}(t)$ – матрица параметров объектов управления размерности $(n \times n)$, $\bar{b}(t)$ – матрица влияния управляющих воздействий размерности $(n \times m)$; x_0 – начальное состояние электромеханического объекта в момент времени t_0 .

Так как сигнал с ПЭВМ поступает в дискретные моменты времени, дискретная модель, соответствующая непрерывной модели (1), имеет вид:

$$x(k+1) = \tilde{A}(k)x(k) + \tilde{b}(k)u(k), \quad x(0) = x_0, \quad (2)$$

где матрицы $\tilde{A}(k)$ и $\tilde{b}(k)$ рассчитываются по формулам [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(k) &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Delta t^m \bar{A}(t_k)^m}{m!}, \\ \tilde{b}(k) &= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Delta t^m \bar{A}(t_k)^{m-1} \bar{b}(t_k)}{(m-1)!}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если обозначить через $\tilde{A}(k)$ и $\tilde{b}(k)$ суммы N первых членов рядов (3) соответственно, то матрицы $\tilde{A}_N(k)$ и $\tilde{b}_N(k)$ аппроксимируют $\tilde{A}(k)$ и $\tilde{b}(k)$ с погрешностью порядка $O(\Delta t^N)$. При этом число слагаемых в $\tilde{A}(k)$ и $\tilde{b}(k)$ можно задавать заранее (вычисление с фиксированной точностью) или определять автоматически с помощью соотношения:

$$\frac{\|\tilde{A}_N(k) - \tilde{A}_{N-1}(k)\|}{\|\tilde{A}_N(k)\|} \leq \varepsilon, \quad \frac{\|\tilde{b}_N(k) - \tilde{b}_{N-1}(k)\|}{\|\tilde{b}_N(k)\|} \leq \varepsilon, \quad (4)$$

где ε выбирается из условия обеспечения максимальной точности вычислений на ПЭВМ конкретного типа.

Такт k в (2–4) соответствует моменту времени $t_k = t_0 + k\Delta t$, Δt – период дискретности по времени.

2. Структура широтно-импульсного модулятора (ШИМ)

В качестве управляющего воздействия рассматривается выходное напряжение импульсного преобразователя, модулированного по широтно-импульсному закону и поступающее на исполнительный элемент электромеханического объекта. Широтно-импульсный модулятор (ШИМ) описан следующими уравнениями: