

УДК 621.313.019.3

М. А. Байдюк, Г. В. Комарова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка технического состояния и надежности электрических машин

Рассмотрены метод и правила оценки технического состояния электрооборудования. Для оценки технического состояния выбрано энергетическое оборудование: турбогенератор и силовой трансформатор. Расчет индекса технического состояния проводится на основе весовых показателей функциональных узлов рассматриваемых электрических машин. Вес узла рассчитывается по методу парных сравнений (метод Саати). Предложена методика оценки показателей надежности оборудования на основе весовых показателей функциональных узлов и с учетом групп контролируемых параметров. Методика базируется на построении структурных схем, элементы которых соединены последовательно и соответствуют функциональным узлам электрических машин. Даны структурные схемы надежности трансформатора и турбогенератора, включающие группы контролируемых параметров. В соответствии с предложенной методикой проведен расчет вероятности безотказной работы рассматриваемых машин для периода нормальной эксплуатации.

Надежность, электрическая машина, контролируемый параметр, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, структурная схема надежности, индекс технического состояния, функциональный узел, силовой трансформатор, турбогенератор

Надежность оборудования закладывается в процессе проектирования, обеспечивается при изготовлении и контролируется при эксплуатации. Чем сложнее техническое устройство, тем больше вероятность того, что его отказ в процессе эксплуатации принесет значительный материальный ущерб. Техническое состояние (ТС) оборудования характеризуется определенными параметрами в данный момент времени и при определенных внешних факторах. Показатели надежности и ТС относятся к одним из важнейших технико-экономических показателей электрооборудования и систем [1].

Техническое состояние оборудования объектов электроэнергетики влияет на надежность и эффективность их работы. В настоящее время электроэнергетическое оборудование – это один из самых надежных и контролируемых различными системами мониторинга параметров. Несмотря на это в условиях непрерывного функционирования электрооборудования (ЭО) его эксплуатационная надежность по истечении времени ухудшается под воздействием различных внешних факторов и возникает опасность появления отказа, который может привести к сбою электроэнергетической системы.

Для определения ТС оборудования используются контролируемые параметры. При выборе диагностического параметра приоритет отдается тому из них, который удовлетворяет требованиям определения истинного ТС данного ЭО в реальных условиях эксплуатации. На практике чаще используют не один, а одновременно несколько контролируемых параметров, которые дают более общее представление о техническом состоянии во время работы объекта. Результаты мониторинга и диагностики в виде заключения и рекомендаций могут быть получены в автоматическом режиме, либо после соответствующей экспертной оценки, полученной в ходе анализа данных.

Цель исследования, проводимого в статье, – оценки технического состояния и надежности электрооборудования на основе весовых показателей функциональных узлов.

Оценка технического состояния оборудования (расчет индекса технического состояния) выполняется поэтапно и включает две стадии контроля состояния: исследование и применение [2].

Стадия исследования начинается с анализа функционирования и эксплуатационной надежности объекта, составления перечня основных узлов и определения связи возможных неисправ-

ностей с этими узлами. Для выявления неисправностей и повреждений выбираются диагностические признаки и контролируемые параметры, на основе которых подтверждаются диагностические признаки неисправностей.

Затем выбираются методы измерения, датчики или другие технические средства для получения контролируемых параметров. Также для измерения и мониторинга параметров могут применяться автоматизированные системы контроля.

Стадия применения начинается процедурой обработки сигналов с дальнейшим распознаванием состояния исследуемого объекта и его узлов. После обработки данных устанавливается диагноз ЭО, оценивается его критичность, прогнозируется дальнейшее состояние объекта и риск отказа.

Рассматриваются методики оценки надежности и расчета индексов технического состояния исследуемых объектов электроэнергетики на основе контролируемых параметров. Для проведения качественного и количественного анализа показателей ТС и надежности выбрано ЭО энергетических объектов и станций: турбогенератор (ТГ) и силовой трансформатор (ТР). Для этих электрических машин (ЭМ) выявлены повреждения, диагностические признаки неисправностей и контролируемые параметры [1], [3], [4].

В трансформаторе можно выделить следующие основные функциональные узлы (ФУ): изоляционная система (ИС), обмотки трансформатора (ОБМ); магнитопровод (МС); высоковольтный ввод (ВВ); система регулирования напряжения (СРН).

Турбогенератор состоит из неподвижной части – статора, включающего сердечник (СС) с обмоткой (ОС), а также вращающегося ротора (СР) с обмоткой возбуждения (ОР). При расчете индекса ТС ТГ также рассматриваются подшипники (ПП) и система возбуждения (СВ).

Для каждого вида ЭО существует определенный набор критериев работоспособности, подтвержденный в процессе эксплуатации мониторингом параметров или другими способами обнаружения неисправностей. На основе групп контролируемых параметров и результатов их определения можно оценить ТС.

Оценка ТС проводится для ЭО в целом и для основных узлов и конструктивных элементов. К основным показателям, получаемым в результате оценки ТС, относятся индекс технического состояния ФУ и индекс ТС оборудования.

Порядок оценки ТС включает следующие этапы:

- анализ функционирования и возможных отказов ЭО;
- выявление основных узлов, обеспечивающих работу;
- выбор диагностических признаков и контролируемых параметров. Параметры могут быть объединены в группы по схожим признакам;
- выявление нормативных значений параметров для рассматриваемого оборудования;
- определение контролируемых параметров на основе данных, полученных в ходе испытаний, мониторинга при эксплуатации или на основе заводских данных;
- расчет весовых коэффициентов функциональных узлов;
- проведение расчета индекса ТС ФУ и оборудования в целом. Этот расчет проводится в несколько этапов: оцениваются индекс ТС группы параметров, узлов и индекс ТС единицы оборудования.

Индекс ТС оборудования может быть представлен значением от 0 до 100 баллов, где 100 баллов – наилучший показатель состояния.

Параметр ТС ФУ также имеет балльную шкалу. Существует пять диапазонов значений параметров ТС от четырех баллов, соответствующих выполнению функций объекта в полном объеме, до нуля – наихудшей оценки, при которой оборудование не может в дальнейшем эксплуатироваться. Группа параметров ФУ оценивается минимальным значением балльной оценки в данной группе.

Весовой коэффициент группы параметров изменяется от 0 до 1 и сумма всех весовых коэффициентов равна единице.

Весовые коэффициенты ФУ ЭО определяют значимость узлов при функционировании с точки зрения надежности и работоспособности и также имеют суммарный вес, равный единице.

Кроме количественной есть еще и качественная оценка ТС, которая определяется в зависимости от индекса [2].

Результаты оценки технического состояния ЭО выстраиваются в порядке убывания индекса ТС в группах однотипного оборудования. Наименьший индекс ТС в группе ЭО определяет наибольшую необходимость технического воздействия.

Веса функциональных узлов рассматриваемого оборудования рассчитываются при помощи метода Саати [5]. В соответствии с методом Саати составляется таблица парных сравнений для каждо-

го вида оборудования (табл. 1, 2), где количество строк и столбцов соответствует названиям основных узлов. Цифры определяют важность узла перед другими ФУ.

Затем на втором этапе элементы каждого столбца делятся на сумму элементов этого столбца. Проводится сложение элементов каждой строки с последующим делением на число элементов в ней. Полученный результат – это вес ФУ.

Для расчета весовых коэффициентов по методике Саати [5] для турбогенератора используется табл. 1.

Аналогично проводится расчет весовых коэффициентов узлов трансформатора (табл. 2).

Таблица 1

ФУ	ПП	СС	ОС	СР	ОР	=>	ФУ	Вес, о. е.
ПП	1	1/2	1/2	1/3	1/5		ПП	0.074
СС	2	1	1	1/2	1/3		ОС	0.135
ОС	2	1	1	1/2	1/3		СС	0.135
СР	3	2	2	1	1/2		СР	0.241
ОР	5	3	3	2	1		ОР	0.415

Таблица 2

ФУ	СРН	МС	ОБМ	ИС	ВВ	=>	ФУ	Вес, о. е.
СРН	1	1/3	1/3	1/7	1/5		СРН	0.047
МС	3	1	1	1/5	1/3		МС	0.105
ОБМ	3	1	1	1/5	1/3		ОБМ	0.105
ИС	7	5	5	1	3		ИС	0.497
ВВ	5	3	3	1/3	1		ВВ	0.246

Для расчета индекса ТС необходимо знать оценку состояния оборудования, которую может предоставить изготовитель или она может быть получена в процессе испытания и мониторинга.

Диагностическая оценка ФУ ЭО, умноженная на вес ФУ, позволяет получить результат в баллах, равный индексу ТС. Диагностическая оценка узла и индекс ТС оборудования оценивается по 100-балльной шкале. Расчет индекса ТС трансформатора представлен в табл. 3.

Аналогично проводится расчет индекса ТС ТГ при заданных оценках ФУ (табл. 4).

Таблица 3

Название ФУ ТР	Оценка ФУ, балл	Вес ФУ	Индекс ТС, балл
СРН	85	0.047	$0.047 \times 85 + 0.105 \times 75 +$ $+ 0.105 \times 50 + 0.497 \times$ $\times 90 + 0.246 \times 70 = 79.1$
МС	75	0.105	
ОБМ	50	0.105	
ИС	90	0.497	
ВВ	70	0.246	

Таблица 4

Название ФУ ТР	Оценка ФУ, балл	Вес ФУ	Индекс ТС, балл
ПП	65	0.074	$0.074 \times 65 + 0.135 \times 80 +$ $+ 0.135 \times 85 + 0.241 \times$ $\times 75 + 0.415 \times 70 = 74.2$
ОС	80	0.135	
СС	85	0.135	
СР	75	0.241	
ОР	70	0.415	

Полученный в табл. 3 и 4 индекс ТС соответствует хорошему состоянию рассматриваемого оборудования при постоянном диагностировании его параметров [2].

При одинаковом техническом состоянии всех узлов (в соответствии с данными контроля и диагностики) наибольший вклад в индекс технического состояния внесет узел с наибольшим весом.

Расчет надежности ЭМ проводится на основе эксплуатационных данных об отказах и согласуется с оценкой ТС. Для оценки показателей надежности необходимо:

- выявить основные функциональные узлы, влияющие на работоспособность объекта, в соответствии с результатами оценки ТС;

- задать весовые показатели ФУ, полученные в ходе оценки ТС. Тем самым устанавливается рейтинг узла с точки зрения функциональной надежности. Сумма весовых показателей узлов ЭМ должна равняться единице;

- установить закон распределения отказов ЭМ в целом или ее отдельных узлов и задать показатели этих законов;

- составить структурную схему надежности ЭМ, для которой можно найти вероятность безотказной работы (ВБР) любого узла и машины в целом;

- провести расчет показателей надежности ЭМ или ее ФУ на основе принятого закона распределения отказов для заданного времени работы.

Методика дает возможность прогнозировать изменение ТС и дальнейшую бесперебойную работу узлов и объекта в целом.

Практически для любого технического устройства существует три периода эксплуатации: приработка, нормальная эксплуатация и старение.

Основной период – это период нормальной эксплуатации, во время которого отказы ЭО обычно подчиняются экспоненциальному закону распределения.

Сложные технические устройства состоят из узлов. К таким устройствам относятся ТГ и силовой ТР.

Модель «слабейшего звена» применяется для рассматриваемых ТГ и ТР, которые представляют собой с точки зрения надежности систему последовательно соединенных элементов; при отказе одного элемента выходит из строя весь объект [1]. Последовательно соединенными элементами структурных схем надежности ЭМ являются функциональные узлы.

Таблица 5

Номер узла	Название узла	Вес узла, о. е.	Группа параметров технического состояния узла	Номер группы параметров	Вес группы параметров, о. е.
У1	ПП	0.074	Состояние подшипников	1.1	1
У2	ОС	0.135	Состояние изоляции	2.1	0.25
			Состояние крепления лобовых частей	2.2	0.25
			Элементарные проводники и паяные соединения	2.3	0.25
			Полые проводники стержней	2.4	0.25
У3	СС	0.135	Состояние изоляции листов	3.1	0.33
			Плотность прессовки стали	3.2	0.33
			Состояние крепления сердечника	3.3	0.34
У4	СР	0.241	Состояние металла и формы ротора	4.1	0.33
			Состояние посадочных поверхностей вала	4.2	0.33
			Бандажные узлы ротора	4.3	0.34
У5	ОР	0.415	Состояние корпусной изоляции	5.1	0.25
			Катушки и паяные соединения	5.2	0.25
			Состояние узла центрального токоподвода	5.3	0.25
			Состояние щеточно-контактного аппарата	5.4	0.25

Таблица 6

Номер узла	Название узла	Вес узла, о. е.	Группа параметров технического состояния узла	Номер группы параметров	Вес группы параметров, о. е.
У1	СРН	0.047	Общие параметры	1.1	0.3
			Состояние масла	1.2	0.2
			Состояние механизма привода и контактора	1.3	0.5
У2	МС	0.105	Состояние магнитопровода	2.1	1
У3	ОБМ	0.105	Параметры обмоток	3.1	1
У4	ИС	0.497	Состояние масла	4.1	0.5
			Хроматографический анализ	4.2	0.5
У5	ВВ	0.246	Общие сведения	5.1	0.25
			Хроматографический анализ	5.2	0.25
			Физико-химический анализ масла	5.3	0.25
			Результаты высоковольтных испытаний	5.4	0.25

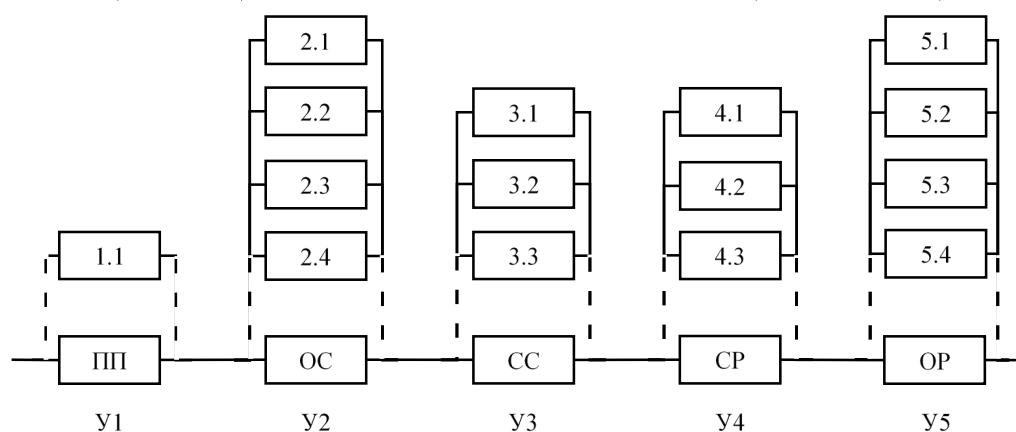


Рис. 1

Каждый из узлов может рассматриваться как подсистема. Показатели надежности подсистемы рассчитываются отдельно и затем определяется результирующая надежность системы. При построении структурных схем учитываются только те функциональные узлы, которые вносят наибольший вклад в оценку технического состояния ЭМ.

Для каждого ФУ ЭМ существует группа параметров ТС, суммарный вес которых равен единице [4]. В табл. 5 представлены весовые коэффициенты групп контролируемых параметров ТГ.

Используя группы параметров ФУ, можно составить структурную схему надежности (рис. 1), условно включающую соответствующие контролируемые параметры (табл. 6).

Весовые коэффициенты групп параметров ТР даны в табл. 6.

Структурная схема надежности трансформатора составлена с учетом групп контролируемых параметров (рис. 2).

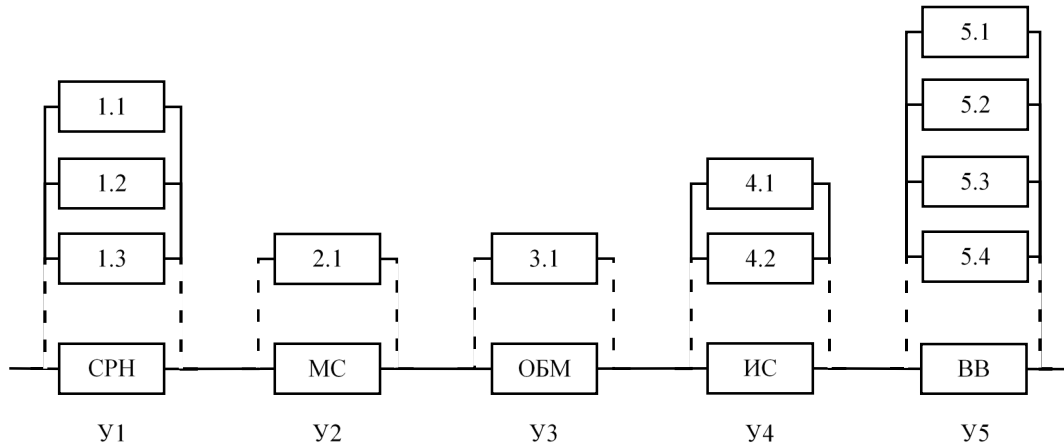


Рис. 2

Расчет надежности ЭМ проводится на основе эксплуатационных данных об отказах и согласуется с оценкой ТС [1], [6].

В соответствии со структурными схемами (рис. 1, 2) результирующая вероятность безотказной работы ЭМ и ВБР узлов определяются формулами

$$P_{ЭМ} = e^{-\lambda_{ЭМ}\Sigma\alpha_i t}; P_{УЭМ_i} = e^{-\lambda_{ЭМ}\alpha_i t},$$

где $\lambda_{ЭМ}$ – интенсивность отказов ЭМ, полученная экспериментальным путем или на основе статистических данных об отказах; α_i – вес i -го ФУ; t – рассматриваемый промежуток времени; $P_{УЭМ_i}$ – ВБР i -го ФУ. Сумма весовых показателей ФУ ЭМ равна единице $\Sigma\alpha_i = 1$.

Рассматривается период нормальной эксплуатации ЭМ, где $\lambda_{ЭМ} = \text{const}$, что соответствует экспоненциальному закону распределения отказов.

Суммарная интенсивность отказов:

– для трансформатора: $\Sigma\lambda_{ТР} = \lambda_{СРН} + \lambda_{МС} + \lambda_{ОБМ} + \lambda_{ИС} + \lambda_{ВВ}$;

– для турбогенератора: $\Sigma\lambda_{ТГ} = \lambda_{ПП} + \lambda_{ОС} + \lambda_{СС} + \lambda_{СР} + \lambda_{ОР}$.

Можно ввести обозначение веса группы параметров β_{ij} , где i – индекс узла; j – индекс группы параметров.

Сумма весов групп параметров i -го узла не превышает единицу $\Sigma\beta_{ij} \leq 1$.

Если оценка одного или нескольких параметров группы окажется низкой, т. е. надежность и техническое состояние узла – ниже требуемых значений, тогда в схемах (рис. 1, 2) и в расчетах результирующей надежности можно снижать вес

этого параметра до нуля и тем самым влиять на показатели надежности узла ЭМ, вводя понижающий коэффициент.

Когда контролируемые параметры ФУ в норме, то $\Sigma\beta_{ij} = 1$. Если оценка одного или нескольких параметров группы выйдет за пределы диапазона допустимых значений (параметр находится на границе работоспособности, $\beta_{ij} = 1$), тогда $\Sigma\beta_{ij} < 1$ на весовую долю этого параметра и это повлияет на показатель надежности ФУ и результирующую надежность ЭМ.

При учете веса групп контролируемых параметров ФУ, можно ввести коэффициент β_{ij} в оценку ВБР ЭМ, и тогда

$$P_{ЭМ} = e^{\frac{-\lambda_{ЭМ}\Sigma\alpha_i t}{\Sigma\beta_{ij}}} = e^{\frac{-\lambda_{ЭМ} t}{\Sigma\beta_{ij}}}.$$

Для оценки эксплуатационной надежности электрических машин широко применяется понятие удельной повреждаемости (удельного числа аварийных отключений), которое представляет собой среднее число аварийных отключений на одну машину в год, выраженное в процентах от общего числа отключений. Статистика показывает, что удельная повреждаемость возрастает с увеличением мощности.

Для проведения расчетного исследования приняты среднестатистические данные об отказах рассматриваемых ЭМ [6].

В соответствии с данными литературы [6] интенсивность отказов высоковольтных силовых трансформаторов можно принять равной $\lambda_{ТР} = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, что соответствует $\lambda_{ТР} = 0.02 \text{ г.}^{-1}$.

Для расчета надежности турбогенератора принята удельная повреждаемость $\lambda_{ТГ} = 7.9 \%$ [1],

что численно соответствует интенсивности отказов $\lambda_{TP} = 0.079 \text{ г.}^{-1} = 0.9 \cdot 10^{-5} \text{ ч.}^{-1}$.

Итоги расчета ВБР узлов и результирующей надежности рассматриваемых ЭМ сведены в табл. 7. Для расчета принят временной интервал, равный году.

Таблица 7

ЭМ	Узел	$\lambda_{уЭМ_i} \cdot 10^{-6}, \text{ ч.}^{-1}$	$P_{уЭМ_i}$	$P_{ЭМ_i}$
ТР	СРН	0.108	0.999	0.980
	МС	0.242	0.998	
	ОБМ	0.242	0.998	
	ИС	1.143	0.990	
	ВВ	0.566	0.995	
ТГ	ПП	0.667	0.994	0.924
	ОС	1.215	0.989	
	СС	1.215	0.989	
	СР	2.169	0.981	
	ОР	3.735	0.968	

Расчет надежности с учетом весовых показателей узлов позволяет более точно спрогнозировать дальнейшую работу оборудования и его возможные отказы.

Можно рассмотреть влияние весового показателя группы параметров на показатель надежности ЭМ.

Например, если изоляция листов стали статора ТГ находится в неудовлетворительном состоянии и $\beta_{3,1} = 0$, тогда $\sum \beta_{3,j} = \beta_{3,2} + \beta_{3,3} = 0.33 + 0.34 = 0.67$.

Расчет ВБР стали статора проводится с измененной интенсивностью отказов:

$$P_{CC} = e^{-\lambda_{ТГ} \alpha_{CC} t} = e^{-10^{-5} \cdot 0.9 \cdot 0.135 \cdot 8760} = 0.984.$$

В данной статье рассмотрены метод и правила оценки ТС электрооборудования. На основе метода парных сравнений (метод Саати) проведен расчет весовых показателей функциональных узлов трансформатора и турбогенератора. Для рассматриваемых электрических машин наиболее значимыми узлами с точки зрения надежного функционирования являются изоляционная система ТР и обмотка ротора ТГ.

Расчет индекса ТС проводился с учетом диагностической оценки состояния узлов ЭМ по 100-балльной шкале. Наибольший вклад в индекс ТС вносят узлы с максимальным относительным весом.

Сформулированы основные этапы методики оценки надежности ЭМ на основе весовых показателей узлов и с учетом групп контролируемых параметров. Предложенная методика базируется на построении структурных схем надежности. Элементы структурных схем соответствуют функциональным узлам ЭМ. В соответствии с предложенной методикой выполнен расчет вероятности безотказной работы ТР и ТГ и их узлов для периода нормальной эксплуатации. Пример расчета ВБР машин сделан для интервала времени, равного году работы. Расчет индекса ТС и надежности с учетом весовых показателей узлов позволяет прогнозировать возможные отказы оборудования и вид технического воздействия на него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.
2. Приказ Минэнерго России от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» (Зарегистрировано в Минюсте России 05.10.2017 N 48429) // Консультант-Плюс. 2017. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=279892&fld=134&dst=100059,0&rnd=0.643805116635938#08427316752928569> (дата обращения: 09.12.2018).
3. Гольдберг О. Д., Хелемская С. П. Надежность электрических машин: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.
4. Вольдек А. И., Попов А. С. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2010. 350 с.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
6. Калявин В. П., Рыбаков Л. М. Надежность и диагностика электроустановок: учеб. для вузов. Йошкар-Ола: Изд-во МарГУ, 2000. 348 с.

M. A. Baidiuk, G. V. Komarova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

EVALUATING TECHNICAL CONDITION AND RELIABILITY OF ELECTRICAL MACHINES

The method and rules for assessing the technical condition of electrical equipment are considered. To assess the technical condition of the selected power equipment: a turbogenerator and a power transformer. The calculation of the technical condition index is based on the weight indicators of the functional units of the electric machines under consideration. The "weight" of nodes is calculated by the method of pairwise comparisons (Saaty method). A method for assessing the reliability of equipment based on the weight indicators of functional units and taking into account the groups of monitored parameters is proposed. The technique is based on the construction of structural schemes, the elements of which are connected in series and correspond to the functional units of electrical machines. Structural diagrams of transformer and turbogenerator reliability, including groups of controlled parameters, are given. In accordance with the proposed methodology, the probability of failure-free operation of the considered machines for the period of normal operation was calculated.

Reliability, electrical machine, control parameter, failure rate, fault-free performance probability, structural reliability scheme, technical condition index, functional unit, power transformer, turbogenerator

УДК 62-83 + 681.513.54

М. П. Белов, Ч. Х. Фьюнг
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Д. В. Тхуй
Вьетнамский научно-технический институт (Ханой)

Адаптивное прогнозирующее управление слеящими электроприводами нелинейных систем с упругими связями

Предлагается математический подход к синтезу дискретного адаптивного прогнозирующего регулятора для слеящих электроприводных упругих систем управления с учетом неопределенных нелинейностей. Метод расширенной линеаризации использует координатное преобразование дифференциального уравнения исходного нелинейного объекта управления в модель состояний линеаризованных систем с параметрами, зависящими от состояния. Для поиска оптимальных управляющих воздействий на объект управления задача сводится к необходимости построения прогнозирующих моделей и оптимизации ее функционала качества по алгоритму квадратичного программирования. Описывается способ построения математической нелинейной модели состояний электроприводных систем управления крупного радиотелескопа как объекта управления с упругими связями при наличии указанных нелинейностей зазора и сухого трения в кинематических передачах. При компьютерном моделировании с помощью программы MATLAB/Simulink приведены сравнения среднеквадратичных отклонений ошибок слеящих систем управления между оптимальным LQR и адаптивным прогнозирующим регуляторами. Результаты сравнения показывают, что предлагаемый адаптивный прогнозирующий регулятор более всего удовлетворяет заданному требованию по точности слеящих систем управления.

Слеящий электропривод, адаптивный прогнозирующий регулятор, расширенная линеаризация, квадратичное программирование

Постановка задачи. В последние годы одним из современных методов для решения задач систем управления (СУ) нелинейными объектами,

основанным на математических методах оптимизации, является адаптивное управление по прогнозирующим моделям (Model Predictive Control –