

УДК 621.

М. П. ГИРЯ, начальник отдела электрооборудования  
Институт проблем управления Национальной Академии наук Украины, г. Харьков

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АЭС

*На основе оценки текущего технического состояния оборудования с учётом физической сущности прогнозируемых процессов разработан новый метод прогнозирования сверх назначенного срока службы для различных типов электрооборудования АЭС, позволяющий получить конкретные численные значения прогнозного остаточного ресурса. Результаты расчётов позволяют делать научно-обоснованные выводы о возможных сроках продления эксплуатации оборудования.*

*Разработанный метод индивидуального прогнозирования остаточного ресурса электротехнического оборудования АЭС при продлении сроков его эксплуатации апробирован на реальных объектах и может быть также использован для научно-технического обоснования сроков планирования планово-предупредительных ремонтов атомных и других электростанций.*

*На основі оцінки поточного технічного стану устаткування з врахуванням фізичної суті прогнозованих процесів розроблений новий метод прогнозування понад призначений термін служби для різних типів електроустаткування АЕС, що дозволяє набуті конкретних чисельних значень прогнозного залишкового ресурсу. Результати розрахунків дозволяють робити науково-обґрунтовані висновки про можливі терміни продовження експлуатації устаткування.*

*Розроблений метод індивідуального прогнозування залишкового ресурсу електротехнічного устаткування АЕС при продовженні термінів його експлуатації апробований на реальних об'єктах і може бути також використаний для науково-технічного обґрунтування термінів планування планово-запобіжних ремонтів атомних і інших електростанцій.*

#### Введение

Электротехническое оборудование АЭС обеспечивает стабильное электроснабжение ответственных технологических потребителей собственных нужд и выдачу мощности в энергосистему. Безопасная и эффективная работа технологических систем энергоблоков АЭС в значительной степени зависит от надёжной работы электротехнического оборудования. Максимальный проектный срок эксплуатации электрооборудования АЭС установлен в пределах 20–25 лет. В связи с приближающимися сроками выработки установленного ресурса электрооборудования энергоблоков АЭС становится актуальной проблема оценки его технического состояния, прогнозирования остаточного ресурса и на этой основе продление сроков его дальнейшей эксплуатации. Эта проблема усложняется современными условиями экономики, когда атомные станции не располагают достаточными финансовыми возможностями для полной плановой замены оборудования, отработавшего назначенный ресурс.

С рассматриваемых позиций особое значение имеет прогнозирование остаточного ресурса оборудования на стадии его эксплуатации, когда значение ресурса соответствует возможной продолжительности эксплуатации с момента проведения обследований до достижения технических параметров предельных значений. При этом обязательным условием является сохранение требуемых значений надёжности с соблюдением всех норм ядерной и радиационной безопасности.

Существующий термин «ресурс», как суммарная наработка от начала эксплуатации

оборудования до его перехода в предельное состояние, может быть дополнен определением «назначенный ресурс», который определяется для каждого типа оборудования заводом-производителем путём анализа показателей надёжности, с учётом организации конструирования и производства оборудования. Как показывает опыт проведенных обследований технического состояния оборудования на реальных объектах, при правильно организованном и качественном техническом обслуживании, в конце назначенного заводом ресурса техническое состояние оборудования в большинстве случаев не достигает своего предельного значения. Поэтому имеется возможность продления назначенного ресурса, т.е. установление остаточного ресурса до очередного обследования.

### **Основная часть**

Из существующих методов прогнозирования остаточного ресурса наиболее эффективным является метод индивидуального прогнозирования для конкретных типов оборудования. Хотя, применение данного метода требует определенных затрат, связанных с использованием диагностических средств, испытательного оборудования, техники для обработки полученной информации, программного обеспечения и построения математической модели, тем не менее эти затраты окупаются, учитывая экономический эффект от полученных результатов.

Сложность проблемы прогноза остаточного ресурса оборудования, которое уже отработало назначенный проектом срок эксплуатации, связана в первую очередь с разработкой принципов построения алгоритма и описания математической модели прогноза. Указанная модель должна представлять собой некую совокупность физических свойств и характера процессов деградации оборудования во времени за весь период эксплуатации.

Для оценки текущего технического состояния электрооборудования необходима, прежде всего, специальная методика, предусматривающая использование объема информации, полученного по результатам проведенных специальных обследований в период планово-предупредительных ремонтов (ППР). Такая методика должна быть оптимальна по трудозатратам на проведение обследований оборудования, не противоречить действующим нормативным документам, а также позволять получить конечные результаты в удобном и доступном для широкого круга специалистов виде. Этим принципам отвечает методика, разработанная специалистами Института проблем управления Национальной Академии наук Украины, которая апробирована на реальных объектах (Южно-Украинской и Запорожской АЭС) и рекомендована как типовая для АЭС при проведении обследований технического состояния и анализа эксплуатационной надежности электротехнического оборудования, срок эксплуатации которого подходит к концу.

Методика направлена в первую очередь на определение способности электрооборудования выполнять требуемые функции при продлении срока эксплуатации. Оценка технического состояния электрооборудования основана на анализе динамики изменения невосстанавливаемых параметров старения оборудования (определяющих параметров), характеризующих необратимые деградационные изменения, без которых невозможно достоверно определить степень старения оборудования в целом. Параметры, определяющие степень старения данного типа электрооборудования, выбираются на основе анализа его физических свойств, режимов работы и особенностей эксплуатации [3].

Оценка технического состояния конкретного типа электрооборудования осуществляется путём определения коэффициента относительной оценки технического состояния ( $K_i$ ), который вычисляется для каждого определяющего параметра путем сравнения измеренного в данный момент времени значения этого параметра с начальным и предельным значениями.

Под начальными значениями измеряемых параметров оборудования принимается значения, указанные в паспортах и протоколах заводских испытаний. При отсутствии таких значений в качестве исходных могут быть приняты значения параметров, полученные при

приемосдаточных испытаниях. Обозначим:

$P_{0i}$  – начальное значение  $i$ -го определяющего технического параметра по заводскому паспорту, или по приемо-сдаточным испытаниям;

$P_{Иi}$  – измеренное значение  $i$ -го определяющего параметра при проведении обследования;

$P_{Пi}$  – предельное значение  $i$ -го определяющего параметра, при котором эксплуатация данного оборудования не допустима (по требованиям нормативных документов).

Полный диапазон, в котором может изменяться определяющий параметр, равен значению  $-|P_{0i} - P_{Пi}|$ , (рис. 1).

Оставшийся диапазон изменения определяющего параметра с момента проведения измерений до достижения им предельного значения определяется выражением  $-|P_{Иi} - P_{Пi}|$ .

Отношение оставшегося диапазона изменения определяющего параметра к полному диапазону характеризует текущее техническое состояние оборудования по  $i$ -му

определяющему параметру  $- \frac{P_{Иi} - P_{Пi}}{P_{0i} - P_{Пi}}$

Сделав преобразование данного выражения, получим:

$$K_i = 1 - \frac{P_{0i} - P_{Иi}}{P_{0i} - P_{Пi}}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициент относительной оценки технического состояния по  $i$ -му определяющему параметру.

В начале эксплуатации, когда значение определяющего параметра равно паспортному ( $P_{0i} = P_{Иi}$ ),  $K_i = 1$ .

По мере старения оборудования измеренное значение определяющего параметра уменьшается (увеличивается) и при  $P_{Иi} = P_{Пi}$  коэффициент  $K_i = 0$ .

Таким образом, техническое состояние оборудования по данному определяющему параметру оценивается коэффициентом  $K_i$ , который изменяется в пределах от 1 до 0. Если значение измеренного параметра достигнет и станет хуже предельного, коэффициент  $K_i$  примет отрицательное значение. В ряде случаев, когда измеренное значение определяющего параметра будет лучше начального значения, коэффициент  $K_i$  может принять значение больше 1.

Так как по каждому типу оборудования может быть несколько параметров, определяющих старение, общая оценка технического состояния обследуемого оборудования определяется по методу «слабого звена», т.е. общее реальное техническое состояние определится значением минимального коэффициента  $K_i$  одного из параметров (**доминирующего** коэффициента оценки технического состояния  $K_{i0}$ ), значение которого максимально приближено к предельному по сравнению с другими определяющими параметрами.

Ориентировочная оценка значения остаточного ресурса может быть определена при следующих допущениях:

1) Заводские расчёты назначенного ресурса оборудования предполагали, что данное оборудование при соблюдении требуемых условий эксплуатации сможет прослужить проектный срок (25 лет для большинства типов электрооборудования АЭС), при этом его техническое состояние в конце проектного срока эксплуатации будет близким к предельному ( $K_i \approx 0$ ).

2) Поскольку рассчитанная выше реальная количественная оценка технического состояния показала, что в конце проектного срока эксплуатации ресурс оборудования не

исчерпался и имеется относительный остаточный запас, равный  $K_{i0}$ , прогнозное значение остаточного ресурса в годах может быть определено как произведение проектного срока службы ( $T_{np}$ ), на коэффициент относительной оценки технического состояния по доминирующему параметру ( $K_{i0}$ ). При этом допускается, что скорость изменения определяющего параметра будет приблизительно равной средней скорости за предшествующие 5 лет до момента испытаний.

3) Значение остаточного ресурса принимается с учётом ограничения по  $K_{i_{мин}} = 0,2$ , при котором для предотвращения отказа дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена.

Таким образом, ориентировочное значение остаточного ресурса может быть определено:

$$T_{ост} = T_{np} \cdot (K_{i0} - K_{i_{мин}}), \quad (2)$$

где  $T_{np}$  – проектный срок эксплуатации в годах, установленный в технических условиях на данное оборудование;

$K_i$  – определенный выше коэффициент оценки технического состояния по доминирующему параметру;

$K_{i_{мин}}$  – минимально допустимый коэффициент оценки технического состояния.

Для более точной оценки остаточного ресурса отслеживается механизм динамики старения по значениям средней скорости изменения определяющих параметров за весь период эксплуатации оборудования.

Средняя скорость изменения определяющего параметра обследуемого оборудования на протяжении всей его эксплуатации определяется по формуле:

$$a = \frac{(P_o - P_{и})}{T}, \quad (3)$$

где  $P_o - P_{и}$  – разность между начальным и измеренным при испытании значением определяющего параметра;

$T$  – время от начала эксплуатации до момента измерений.

Получив, таким образом, минимальный коэффициент относительной оценки и максимальную скорость изменения параметра при рассмотрении всех определяющих параметров, можно сделать вывод о реальном техническом состоянии обследуемого оборудования и построить модель прогноза остаточного ресурса для него.

Функция изменения во времени технических параметров, характеризующих старение оборудования определяется, в большинстве случаев, случайными событиями и точное её определение практически невозможно. Допустив, что известны назначенный ресурс оборудования, средняя скорость изменения доминирующего определяющего параметра, в общем виде можно предположить, что график изменения коэффициента относительной оценки оборудования на протяжении назначенного ресурса оборудования будет иметь вид, показанный на рис. 1.

Величина остаточного ресурса может быть определена графически на отрезке от времени проведения обследования (25 лет) до пересечения линии функции с линией, ограничивающей  $K_{i_{мин}} = 0,2$ .

Как правило, ухудшение технического состояния электротехнического оборудования на АЭС, его старение во многом зависит не только от фактического времени его эксплуатации, но и от ряда эксплуатационных факторов, таких как:

- общее количество пусков и остановов и их частота;
- количество повторных включений;
- повышенные рабочие температуры при эксплуатации;
- перегрузки;

- переходные процессы;
- высокий уровень механических вибраций;
- недостаточный контроль и качество техобслуживания и др.

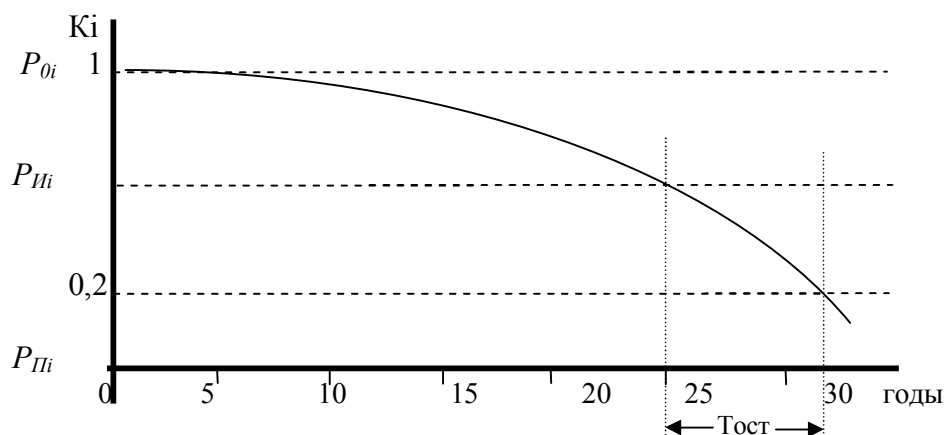


Рис. 1. График изменения коэффициента относительной оценки

Следовательно, и скорость изменения того или иного параметра, а также коэффициент  $K_i$  могут изменяться в зависимости от вышеперечисленных факторов.

На рис. 2 для примера показан реальный график изменения одного из определяющих параметров за период эксплуатации с 1983 по 2008 год – коэффициента абсорбции изоляции обмотки одного из двигателей 6 кВ энергоблока №1 ОП ЗАЭС, построенные по измеренным ранее данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента абсорбции за период эксплуатации

Параметр		год						
		1983	1987	1992	1996	2000	2004	2008
Коэффициент абсорбции	C1-C4	3,12	4,17	3	3,1	2,5	2,3	2,3
	C2-C5	3,07	4,33	3	2,9	2,5	2,5	2,4
	C3-C6	3,14	3,57	2,8	3,25	2,5	2,5	2,3

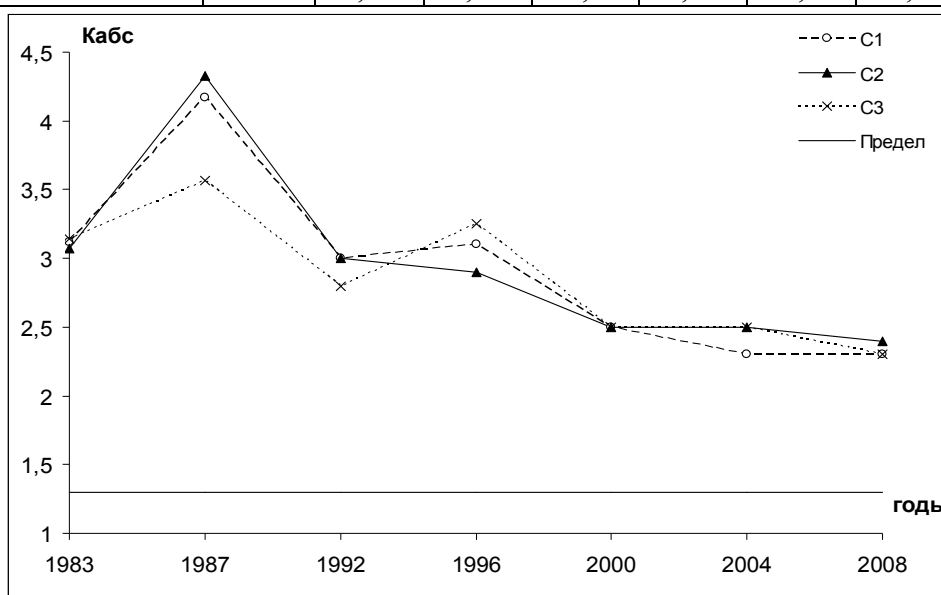


Рис. 2. График изменения коэффициента абсорбции двигателя

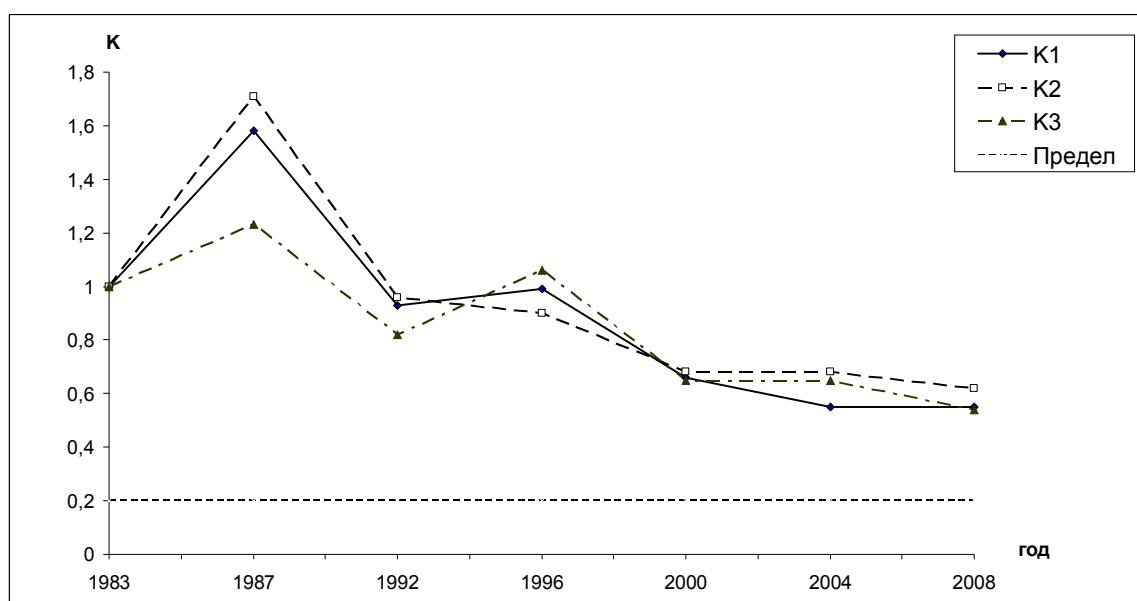
Используя исходные данные по параметрам оборудования (табл. 1), с помощью формулы (1) рассчитываются значения коэффициента относительной оценки  $K_i$  и строится график изменения коэффициента  $K_i$  (рис. 3).

Полученные расчетные данные для построения графика приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные данные коэффициента относительной оценки  $K_i$

$K_i$	Год						
	1 983	1 987	1 992	1 996	2 000	2 004	2 008
$K_1$ (C1-C4)	1	1,58	0,93	0,99	0,66	0,55	0,55
$K_2$ (C2-C5)	1	1,71	0,96	0,9	0,68	0,68	0,62
$K_3$ (C3-C6)	1	1,23	0,82	1,06	0,65	0,65	0,54



Р

Рис. 3. График изменения коэффициента относительной оценки двигателя 6 кВ

Как видно из табл. 2 на момент окончания назначенного ресурса двигателя (2008 год) доминирующим является коэффициент  $K_{i0}=0,54$  в фазе С3-С6.

С помощью численных методов, в частности, аппроксимации (приближением) линейных зависимостей, определяются такие функции [5], которые были бы близки заданным на графике. В нашем случае, когда приближение строится на дискретном наборе точек, аппроксимация будет точечной (дискретной).

При заданном дискретном наборе точек, называемых узлами интерполяции, вычислив интерполяционный полином, можно определить значения функции  $K_{i0} = f(T)$  между узлами (провести интерполяцию в узком смысле слова).

Как видно из графика рис. 4, между различными узлами полиномы различны, следовательно, интерполяция в данном случае будет кусочной или локальной. Вычисляя интерполяционный полином на конечном участке эксплуатации (последние 4-5 лет), и проведя экстраполяцию, можно определить значение функции за пределами обследуемого интервала. Подставляя в найденную функцию значение  $K_{i0} = 0,2$ , (см.рис.1), получим значение конечного срока эксплуатации данного оборудования. Разница между полученным конечным сроком эксплуатации и сроком, при котором производятся обследования (25 лет), определяет значение остаточного ресурса.

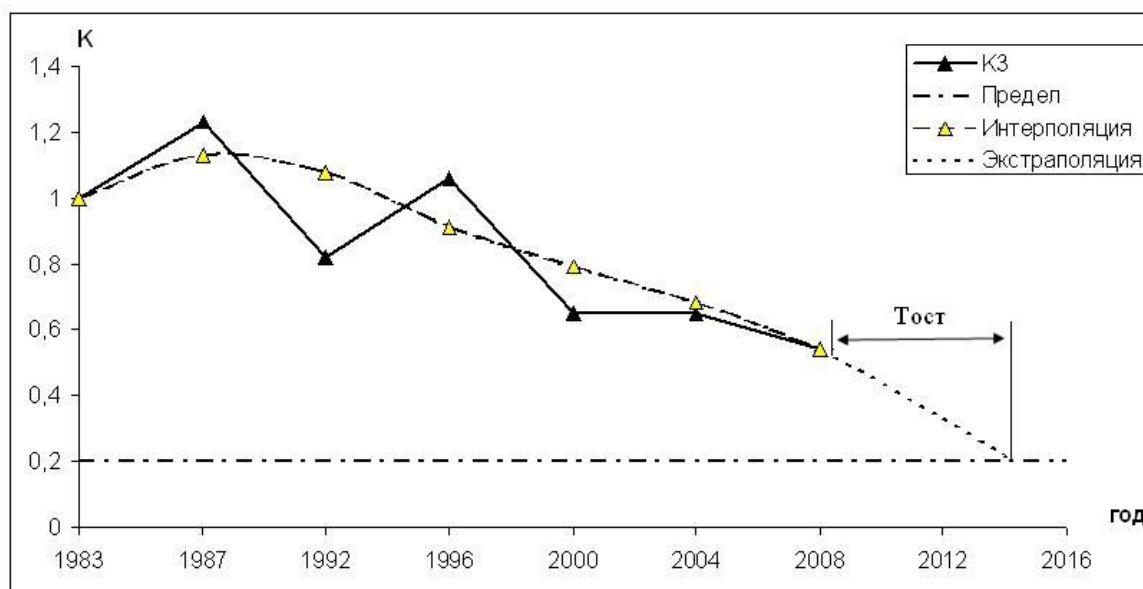


Рис. 4. Построение аппроксимируемой функции для  $K_{id}$

Линейная интерполяция может быть произведена с помощью программы Mathcad и осуществляется с помощью встроенной функции `linterp`, которая наиболее применима для решения инженерных задач подобного типа.

Окончательное решение о продлении срока эксплуатации принимается, используя системный подход и системный анализ. Полученные результаты по оценке остаточного ресурса реализуются при условии положительных результатов по оценке эксплуатационной надёжности оборудования.

#### Выводы

1. На основе оценки текущего технического состояния оборудования с учётом физической сущности прогнозируемых процессов разработан новый метод прогнозирования сверх назначенного проектом срока службы электрооборудования АЭС, позволяющий получить конкретные численные значения прогнозного остаточного ресурса для различных типов электрооборудования. Результаты расчётов позволяют делать научно-обоснованные выводы о возможных сроках продления эксплуатации электрооборудования АЭС.

2. Разработанный метод индивидуального прогнозирования остаточного ресурса электротехнического оборудования АЭС при продлении сроков его эксплуатации апробирован на реальных объектах (ЮУ АЭС и ЗАЭС) и может быть также использован для научно-технического обоснования сроков планирования планово-предупредительных ремонтов атомных и других электростанций.

#### Список литературы

1. «Комплексная программа работ по продлению срока эксплуатации действующих энергоблоков атомных станций», одобренная Кабинетом Министров Украины №263р от 29.04 2004 г.
2. Типовая Программа по управлению старением элементов блока АЭС, ГП НАЭК «Энергоатом», ПМ-Д 0.08.222-06.
3. Гирия М. П., Штабский Л. М. Выбор определяющих параметров старения электротехнического оборудования АЭС для оценки его технического состояния и остаточного ресурса. // Энергетика и электрификация, 2006. – № 6.
4. Гирия М. П., Штабский Л. М., Бронников А. Г., Манузин А. А., Митюшева И. А. Вопросы продления сроков эксплуатации электротехнического оборудования АЭС. // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит. – 2007. – № 9 – С. 39–44.

5. Тарасевич Ю. Ю. Численные методы на Mathcad'e. Методические разработки.

## PROGNOSTICATION OF REMAINING RESOURCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF AES

M. P. GIRIA

*On the basis of estimation of current technical status of equipment taking into account physical essence of the forecast processes the new method of prognostication is developed over the appointed term of service for the different types of electrical equipment of AES, allowing to get the concrete numeral values of prognosis remaining resource. The results of calculations allow to do the scientific-grounded conclusions about the possible terms of extension of exploitation of equipment.*

*The developed method of individual prognostication of remaining resource of electrical engineering equipment AES at the extension of terms of his exploitation is approved on the real objects and can be also used for the scientific and technical ground of terms of planning of preventive-maintenance repairs of atomic and other power-stations.*

Поступила в редакцию 06.07 2010 г.



### ООО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

(ЛИЦЕНЗИЯ НКРЭ АБ № 220781, ЛИЦЕНЗИЯ МИНИСТЕРСТВА  
СТРОИТЕЛЬСТВА, АРХИТЕКТУРЫ И ЖИЛИЩНО-  
КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА УКРАИНЫ АВ № 313494)

Оказание комплекса услуг в сфере энергетики

- проведение энергетического аудита;
- разработка и сопровождением энергосберегающих программ;
- внедрение энергосберегающих технологий;
- разработка и обоснование удельных норм расхода энергетических ресурсов;
- составление и согласование энергетического паспорта предприятия;
- поставка электрической энергии по нерегулируемому тарифу;
- проектирование и установка «под ключ» автоматизированных систем коммерческого учета электрической энергии;
- установка счетчиков дифференцированного (почасового) учета потребления электроэнергии;
- внедрение энергоменеджмента на предприятии и обучение специалистов.

**ПРИГЛАШАЕМ К СОТРУДНИЧЕСТВУ!  
Мы реально сэкономим Ваши деньги!**

Наш адрес:

ул. Мироносицкая, 60, Харьков, 61002, Украина, тел. (057) 703-23-18,  
тел./факс +38 (057) 7149-451, E-mail: [energotex\\_2004@mail.ru](mailto:energotex_2004@mail.ru)