

УДК 621.039.58:349.7

М.В. Лапа, канд. техн. наук

Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина

И.В. Моспан, заместитель командира

Воинская часть 3044, г. Южноукраинск, Украина

И.А. Терещенко, аспирант

Воинская часть 6916, г. Севастополь, Украина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

М.В. Лапа, канд. техн. наук

Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

І.В. Моспан, заступник командира

Військова частина 3044, м. Южноукраїнськ, Україна

І.А. Терещенко, аспірант

Військова частина 6916, м. Севастополь, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Maryna Lapa, PhD in Technical Sciences

Chernihiv State Institute of Economics and Management, Chernihiv, Ukraine

Ihor Mospan, deputy command officer

Military Unit 3044, Yuzhnoukrainsk, Ukraine

Ivan Tereshchenko, PhD student

Military Unit 6916, Sevastopol, Ukraine

PROGNOSTICATION OF THE RESIDUAL LIFE OF TECHNICAL MEANS OF PHYSICAL PROTECTION OF NUCLEAR POWER PLANTS

Рассмотрено оценивание показателей долговечности технических средств охраны АЭС с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Ключевые слова: остаточный ресурс, технические средства охраны, ядерный объект, корреляционно-регрессионный анализ.

Розглянуто оцінювання показників довговічності технічних засобів охорони АЕС з використанням кореляційно-регресійного аналізу.

Ключові слова: залишковий ресурс, технічні засоби охорони, ядерний об'єкт, кореляційно-регресійний аналіз.

The paper considers the evaluation of durability indexes of protection means of nuclear power plants using correlation and regression analysis.

Key words: residual life of equipment, technical means of protection, nuclear facility, correlation and regression analysis.

Постановка проблемы. Одним из важнейших инструментов обеспечения международного режима нераспространения ядерного оружия, уменьшения угрозы ядерного терроризма является физическая защита ядерных установок, объектов, предназначенных для обращения с радиоактивными отходами [7; 20]. По результатам оценки уязвимости ядерной установки эксплуатирующая организация принимает решение о реконструкции или техническом переоснащении системы физической защиты. При проведении реконструкции или технического переоснащения системы физической защиты (СФЗ) необходимо обосновать замену или продление ресурса имеющихся технических средств охраны (ТСО).

Анализ последних исследований и публикаций. В [5] проведен анализ моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования. Известен способ оценки остаточного ресурса для различных групп электротехнического оборудования АЭС по доминирующему параметру [18]. В [16] описан метод прямого прогнозирования остаточного ресурса на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик.

Выделение прежде не решенных частей общей проблемы. В нормативных документах МВД Украины [7; 4] отсутствует методика расчета остаточного ресурса для ТСО. Технические средства охраны находятся на балансе атомных электростанций (АЭС), по-

этому проведен анализ нормативной документации, используемой при учете данных о дефектах оборудования АЭС, оценке их показателей надежности [9; 1; 14; 15; 16; 12; 11; 13; 10; 8; 19; 3; 2]. В результате исследования структуры и порядка заполнения Украинской базы данных надежности (УБДН) АЭС выявлено, что в ней имеются данные о надежности оборудования подразделений АЭС, но отсутствует информация о дефектах и отказах, оценке показателей надежности технических средств охраны АЭС [3; 2]. Данные по T_n – гарантированному ресурсу, T_γ – γ -процентному ресурсу, T_r – техническому ресурсу для ТСО также отсутствуют в УБДН. Поэтому необходима апробация и усовершенствование существующих методов оценки остаточного ресурса (ОР), разработка методик оценивания ОР для ТСО СФЗ [4].

Цель статьи. Цель работы – оценивание ресурсных характеристик технических средств охраны ядерных объектов. Задачи исследования:

- провести анализ нормативной документации по оценке и учету показателей надежности технических средств охраны АЭС, моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования;
- усовершенствовать процессы оценивания показателей долговечности ТСО СФЗ АЭС путем применения метода прямого прогнозирования остаточного ресурса сложных изделий на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик.

Изложение основного материала.

Анализ нормативной документации по оценке и учету показателей надежности технических средств охраны АЭС, моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования

Недостатком существующего способа является то, что согласно [5; 18] функция изменения во времени доминирующего параметра является неизвестной, поэтому точное определение остаточного ресурса выполнить невозможно. Приблизительную оценку значения остаточного ресурса для продления срока эксплуатации оборудования проводят при следующих значительных допущениях, влияющих на точность и достоверность оценки:

- расчетный проектный срок службы при выполнении требуемых условий эксплуатации составляет 25 лет, при этом техническое состояние в конце этого срока эксплуатации приближается к предельному (коэффициент технического состояния K_i изменяется от 1 до 0);
- скорость изменения доминирующего параметра приблизительно равна средней скорости за последние 5 лет до момента испытаний;
- значение остаточного ресурса принимается с учетом ограничения: минимально допустимое значение коэффициента оценки технического состояния $K_{мин} = 0,2$.

Исследованы процессы оценки, анализа, учета показателей надежности, продления срока эксплуатации ТСО СФЗ АЭС. К ТСО относятся: системы передачи сигналов тревоги, системы теле-, видеонаблюдения, системы теле-, видеоконтроля, системы контроля и управления доступом, приборы приемно-контрольные, охранные и охранно-пожарные, сигнализационно-переговорные устройства, оповестители охранные, оповестители, источники бесперебойного питания и другие устройства питания, линейно-кабельные средства, измерительные приборы, оборудование и вспомогательное имущество. В таблице приведены результаты оценки состояния ТСО воинской части по охране АЭС на основании расчета коэффициента K_c (формула (1)) согласно руководящего документа МВД [7].

$$K_c = 1 - \frac{G_n}{G} = 1 - \frac{14,38}{268,25} = 0,95, \quad (1)$$

где G_n – сумма произведений количества неисправных образцов технических средств на соответствующие им весовые коэффициенты;

G – сумма произведений количества проверенных образцов технических средств на соответствующие им весовые коэффициенты.

Расчет коэффициента K_c показал, что оценка состояния ТСО в/ч – «удовлетворительно».

Таблица

Оценка состояния ТСО воинской части по охране АЭС

Наименование технических средств	Количество (шт) (комплектов)	Значение весового коэффициента	Количество испорченных образцов ТСО	G_n испорченных ТСО	G проверенных образцов
Ромб	1	0,4	-	-	0,4
Призма	4	0,4	-	-	1,6
Дон	6	0,3	-	-	1,8
Радиян	52	1,0	3	3	52
Инфракрасные средства обнаружения	20	0,5	3	1,5	10
Пион (Барьер)	40	1,0	2	2	40
Антенные системы на изоляторах больше чем 15 ниток	8	2,6	-	-	20,8
Антенные системы типа “кольцо”, “цилиндр”	13	0,15	4	0,6	1,95
Антенные системы козырькового типа	19	1,8	-	-	34,2
Средства видеонаблюдения: телекамеры	47	0,5	6	3	23,5
поворотные устройства	3	0,2	1	0,2	0,6
Распределительные шкафы	10	0,004	-	-	0,04
Выпрямитель	4	0,1	1	0,1	0,4
Аккумуляторы	40	0,02	40	0,8	0,8
Прожектора	70	0,3	8	2,4	21
Точки освещения	98	0,01	60	0,6	0,98
Электропривод	6	0,25	-	-	1,5
Электростанция с двигателем внутреннего сгорания	1	6,0	-	-	6,0
Кабина АК-ЗБ	16	2,5	-	-	40
АКПП типа “Сектор”	1	10,0	-	-	10,0
Датчик магнитоконтактный	68	0,01	18	0,18	0,68
Всего:				14,38	268,25

В результате проверки и изучения формуляров (паспортов) и других документов ТСО учитываются следующие технико-эксплуатационные показатели:

- год изготовления (дата);
- заводской номер;
- ввод в эксплуатацию (дата);
- находится в эксплуатации (лет, месяцев);
- наработка с начала эксплуатации (часов);
- установленные:
 - ресурс (часов);
 - срок эксплуатации (лет, месяцев);
 - гарантийная наработка (часов);
 - гарантийный срок (лет, месяцев);
- выполнено ремонтов (каких, дата);
- срок эксплуатации после последнего ремонта (лет, месяцев);
- наработка после последнего ремонта (часов);

- недоработка (переработка):
 - по назначенному ресурсу (часов);
 - по сроку эксплуатации (лет, месяцев);
 - по гарантийной наработке (часов);
 - по сроку пригодности (лет, месяцев).

В работах К.Н. Маловика [6] для исследования ОР сложных изделий предложено использовать ресурсные характеристики (РХ), которые как случайные величины характеризуются средними значениями и дисперсиями:

- \bar{T}_n - назначенный ресурс и его допустимые отклонения ΔT_n ;
- \bar{T}_γ - γ -процентный ресурс и его допустимые отклонения;
- \bar{T}_r - технический ресурс и его допустимые отклонения ΔT_r ;
- \bar{T}_ℓ - время предельного состояния и его допустимые отклонения ΔT_ℓ .

В документации в/ч, перечисленной выше, отсутствуют данные о T_γ - γ -процентном ресурсе, T_r - техническом ресурсе, времени предельного состояния, остаточный ресурс не определяется.

В [6] описан метод прямого прогнозирования остаточного ресурса на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик T_γ , T_r , T_n . Предусмотрено четыре режима контроля или наблюдений (2):

$$T_0^I < T_n; T_n < T_0^{II} < T_\gamma; T_\gamma < T_0^{III} < T_r; T_r < T_0^{IV} < T_\ell, \quad (2)$$

в которых задаются оценки остаточного ресурса T_{0_i} , где $i = \bar{1}, \bar{k}$ – индекс точки оценки. Способ оценки остаточного ресурса оборудования атомных станций [6], в котором по заданным значениям ресурсных характеристик T_n , T_γ , T_r в контрольных точках T_0 определяется остаточный ресурс оборудования, заключается в том, что:

- применяется совокупность специализированных числовых матриц $T^I - T^{IV}$, столбцы и строки которых соответствуют оценкам определяющих ресурсных характеристик T_n , T_γ , T_r , которые отображают динамику взаимозависимости определяющих ресурсных характеристик при их ухудшении (улучшении);

- определяются частные коэффициенты корреляции первого и второго порядков с целью выбора из множества $\{T_n, T_\gamma, T_r\}$ ресурсной характеристики, имеющей наибольшую взаимосвязь с предварительно заданным временем предельного состояния T_ℓ ;

- строится линейное регрессионное уравнение (3)

$$T_\ell = a_1 + a_2 \cdot T^* \quad (3)$$

для оценки остаточного ресурса оборудования в контрольных точках (4)

$$T_{OP} = T_\ell - T_0. \quad (4)$$

Прогнозирование остаточного ресурса технических средств физической защиты АЭС на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик

Рассмотрим применение описанного метода на примере ТСО «Устройство-1», применяемых в в/ч по охране АЭС Украины. Сведения об отдельных показателях СФЗ или охраны объектов предприятий Минтопэнерго составляют гостайну, поэтому исследуемые ТСО условно обозначим как «Устройство-1». Оно предназначено для фиксации нарушения охраняемого рубежа и выдачи на включение средств звуковой и световой сигнализации. Аппаратура работает бесперебойно, стационарно, при температуре

окружающей среды от -50 до $+50$ °С и относительной влажности 98 % при температуре 30 °С. Аппаратура устанавливается на столбах (цементных, деревянных и т. п.) или при помощи кронштейнов прикрепляется на заборах и стенах домов.

Срок эксплуатации «Устройства-1» – 72 месяца, фактически они используются в в/ч, начиная с 1982 года, уже отработали по 2–4 срока эксплуатации. Но благодаря всем мероприятиям и правильному обслуживанию, их можно еще использовать несколько сроков, при этом не понижая коэффициента работоспособности и степени защищенности в целом и безопасности охраняемого объекта. При продлении срока эксплуатации экономятся большие финансовые средства.

Рассмотрим применение рассмотренного выше метода прогнозирования ОР и программного обеспечения на его основе для экземпляров устройств, эксплуатирующихся в/ч по охране АЭС. Для «Устройства-1» (40 шт, 38 исправных, таблица), $\bar{T}_n = 53500$ часов, режимы наблюдений $T_0^I = T_n$, $T_0^I < T_n$, $T_r < T_0^{IV} < T_\ell$.

На рис. 1 представлено определение наиболее значимой РХ для «Устройства-1» в $T_0=63$ условных единиц времени (18900 часов), режим наблюдений $T_0^I < T_n$. Определена наиболее значимая РХ – T_n .

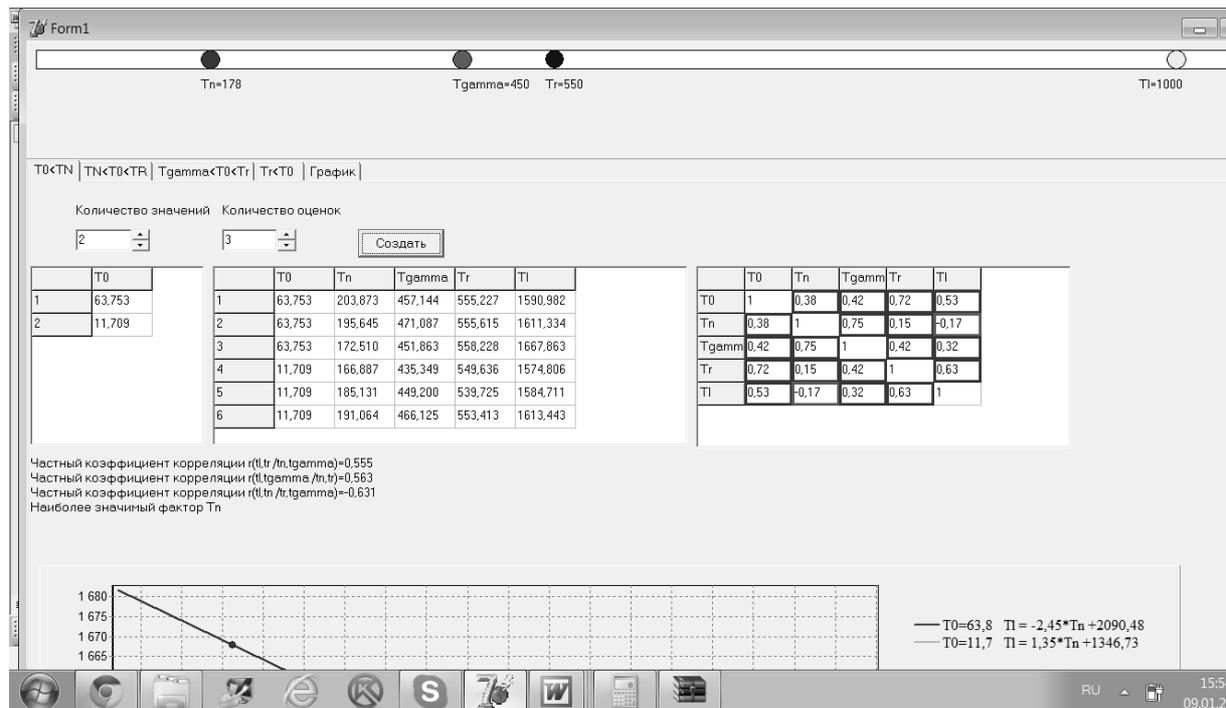


Рис. 1. Режим наблюдений I

На рис. 2 представлено определение наиболее значимой РХ для «Устройства-1» в $T_0=207$ условных единиц времени (62100 часов), режим наблюдений $T_n < T_0^{II} \leq T_\gamma$. Значение $T_\ell = 300000$ часов. Определена наиболее значимая РХ – T_n , построено регрессионное уравнение для T_ℓ , которое показано в нижней правой части экранной формы на рис. 2.

На рис. 3 показаны результаты анализа для $T_0=538$ условных единиц времени (161400 часов), режим наблюдений $T_r < T_0^{IV} < T_\ell$. Наиболее значимой оказалась РХ \bar{T}_r , построено регрессионное уравнение для T_ℓ , которое показано в нижней правой части экранной формы на рис. 3.

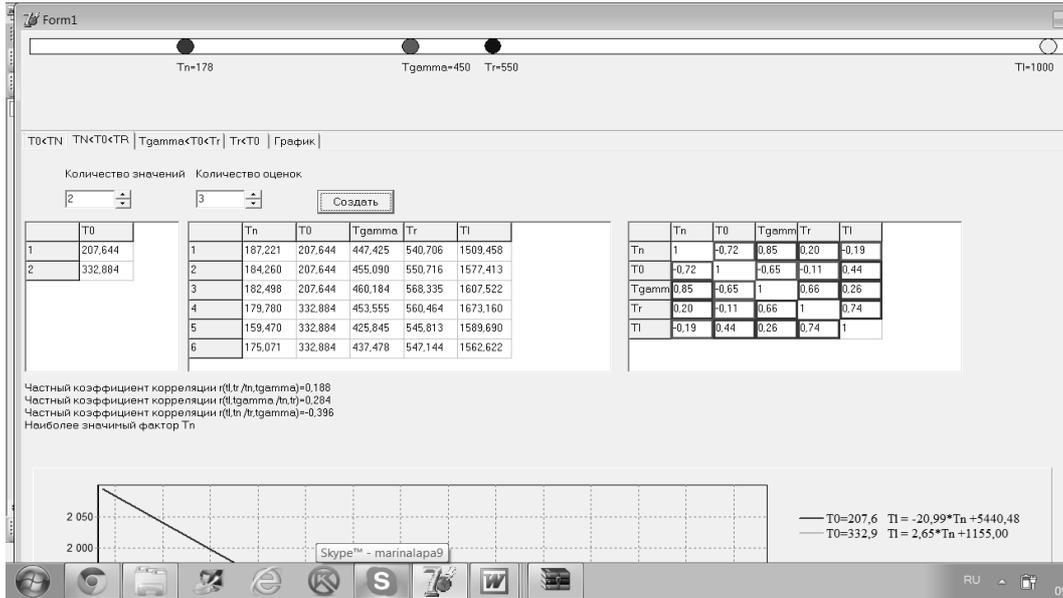


Рис. 2. Режим наблюдений II

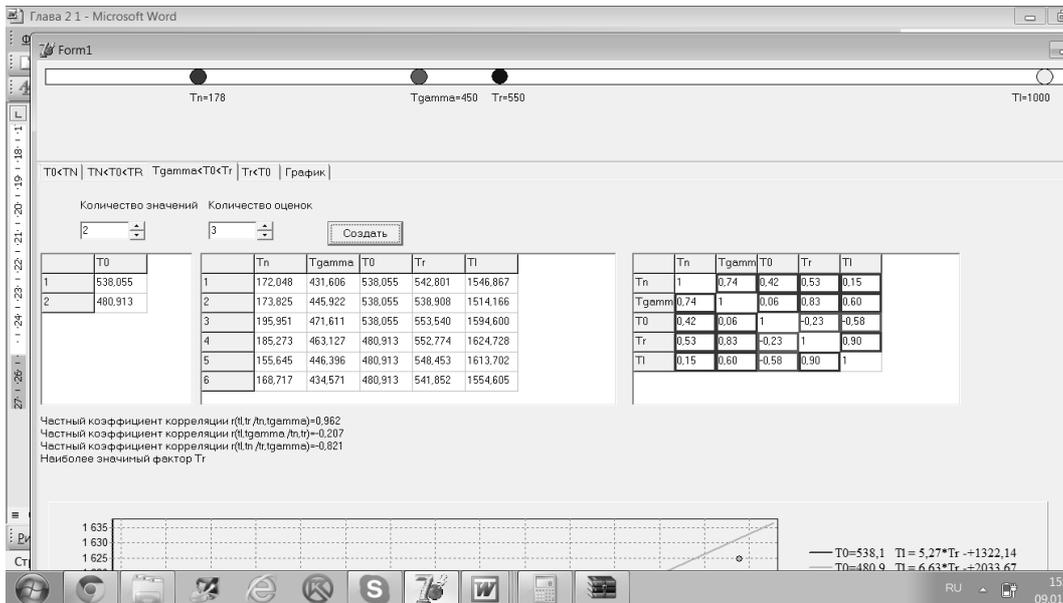


Рис. 3. Режим наблюдений III

В результате апробации рассмотренного метода и программного обеспечения (ПО) выявлены недостатки и разработаны следующие рекомендации.

1. В методе предусмотрено четыре режима контроля или наблюдений (5).

$$T_0^I < T_n ; T_n < T_0^{II} < T_\gamma ; T_\gamma < T_0^{III} < T_r ; T_r < T_0^{IV} < T_\ell . \quad (5)$$

В процессе апробации необходимо было оценить остаточный ресурс экземпляра «Устройства-1» в момент истечения срока назначенной эксплуатации, т. е. $T_0^I = T_n$. Также используются значения математического ожидания $\bar{T}_n, \bar{T}_\gamma, \bar{T}_r$. Необходимо скорректировать режимы контроля и наблюдений следующим образом (6).

$$T_0^I \leq \bar{T}_n ; \bar{T}_n < T_0^{II} \leq \bar{T}_\gamma ; \bar{T}_\gamma < T_0^{III} \leq \bar{T}_r ; \bar{T}_r < T_0^{IV} \leq \bar{T}_\ell . \quad (6)$$

Соответственно необходимо внести изменения в форму программного комплекса.

2. ПО разработано на основе имитационного моделирования и не позволяет ввести точку оценки ОР реального прибора. Возможен только подбор значения из генерируемых

программой в процессе выбора наиболее значимого параметра. Необходимо предусмотреть работу программы в режиме ввода точки оценки реального прибора пользователем.

3. Шкала ПО для задания математических ожиданий факторных переменных \bar{T}_n , \bar{T}_γ , \bar{T}_r (значения факторных переменных задаются перетаскиванием соответствующих маркеров с помощью мыши) имеет предел ≈ 1000 относительных единиц, что требует дополнительного пересчета реального времени в часах в условные единицы времени, что увеличивает погрешность. Так, \bar{T}_n для «Устройства-1» составляет 53500 часов, и оценка ОР необходима как раз в точках, близких к этому значению, когда прибор вырабатал свой назначенный ресурс, но выполняет все свои функции. Необходимо использовать шкалу для задания исходных данных в реальных единицах времени.

4. В регрессионном уравнении $T_\ell = a_1 + a_2 \cdot T^*$ для вычисления T_ℓ используется математическое ожидание оценок \bar{T}_n , \bar{T}_γ , \bar{T}_r , поэтому необходимо внести изменения в уравнение регрессии (7).

$$T_\ell = a_1 + a_2 \cdot T^* \tag{7}$$

Коэффициенты a_1 , a_2 определяются с помощью метода наименьших квадратов, используя выборки значений T_ℓ и определенной наиболее значимой ресурсной характеристики T^* из множества $\{T_n, T_\gamma, T_r\}$ из соответствующей матрицы наблюдений $T^I - T^{IV}$, как описано в разделе 4.3 монографии [6].

5. В процессе апробации необходимо было оценить остаточный ресурс экземпляра «Устройства-1» 1982 г. выпуска, у которого $T_0 = 263000$ часов, т. е. $T_0 > T_\ell$. Такой режим наблюдений не предусмотрен методом, кроме того, необходимо корректировать время предельного состояния.

6. Эксперты в/ч оценивают значения \bar{T}_n , \bar{T}_γ , \bar{T}_r в целых часах, оценки этих РХ генерировались ПО с дробной частью.

По результатам апробации метода и программного модуля усовершенствован метод прямого прогнозирования остаточного ресурса сложных изделий на основе корреляционно-регрессионного анализа их РХ и доработано программное обеспечение. На рис. 4 показаны результаты работы усовершенствованного ПО.

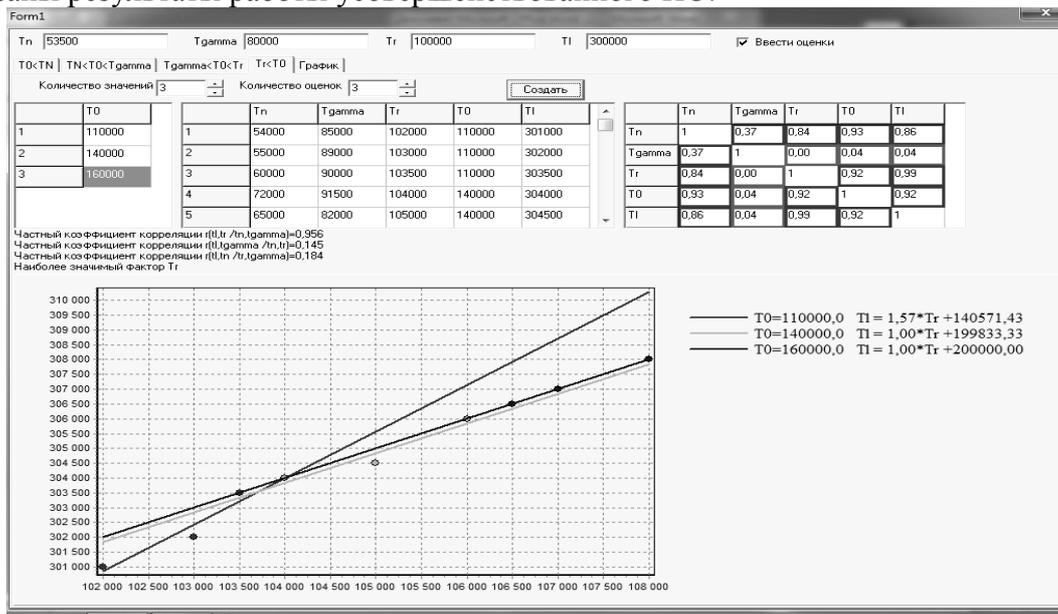


Рис. 4. Режим наблюдений IV

Остаточный ресурс, рассчитанный после доработки метода и ПО для рассматриваемого средства обнаружения в точке оценки $T_0=110000$ часов, равен:

$$T_{\ell} = 1,57 \cdot 53500 + 140571,43 = 224566,43 \text{ (ч)};$$

$$T_{\text{ор}} = T_{\ell} - T_0 = 114566,43 \text{ (ч)}.$$

Выводы и предложения. Показано применение корреляционно-регрессионного анализа для выбора значимых РХ ТСО и оценке остаточного ресурса ТСО с использованием метода прямого прогнозирования остаточного ресурса [6]. Данный метод может использоваться для ТСО АЭС. Обоснованное продление ресурса ТСО на основе прогнозных оценок позволит получить экономический эффект, либо обосновать необходимость замены ТСО для обеспечения безопасности объекта. Результаты исследований внедрены в служебно-боевую деятельность в/ч по охране Южно-Украинской АЭС, акт внедрения от 14.01.2014 г.

На основе апробации предложены рекомендации по усовершенствованию метода прямого прогнозирования остаточного ресурса с использованием корреляционно-регрессионного анализа РХ и программного модуля. В дальнейшем необходимо исследовать и усовершенствовать процессы учета показателей надежности технических средств физической защиты ядерных объектов.

Список использованных источников

1. *Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та систем управління, важливих для безпеки атомних станцій* : НП 306.5.02/3.035-2000. – К. : ДКЯРУ, 2000.
2. *Керівництво адміністратора УБДН версії 2 (станційна частина)* : АЮФА.06.02.00-01 41 02.
3. *Керівництво користувача УБДН версії 2 (станційна частина)* : АЮФА.06.01.00-01 41 02.
4. *Лапа М. В.* Аналіз нормативно-правового поля України у сфері експлуатації інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту / М. В. Лапа, Л. Л. Волівач // Зб. наук. праць СНУ-ЯЕтаП. – Севастополь. – 2010. – № 37. – С. 227–232.
5. *Лапа М. В.* Розвиток наукових основ підвищення якості експлуатації інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту ядерних об'єктів : монографія / М. В. Лапа. – Севастополь : СНУЯЕтаП, 2013. – 353 с.
6. *Маловик К. Н.* Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов : монография / К. Н. Маловик. – Севастополь : СНУЯЭиП, 2013. – 332 с.
7. *Настанова з організації експлуатації інженерно-технічних засобів охорони на важливих державних об'єктах, які охороняються внутрішніми військами МВС України.* – К., 2012. – 83 с. – (Наказ МВС України від 05.12.2012 № 1121).
8. *Облік і порядок розслідування, обміну інформацією про аномальні явища в роботі обладнання* : СТП 3.3703.020-2005. – К., 2008. – 31 с.
9. *Общие положения безопасности атомных станций*: НП 306.2.141-2008 / Государственный комитет ядерного регулирования Украины. – К. : ГКЯРУ, 2008. – 58 с. – (Нормы и правила по ядерной и радиационной безопасности).
10. *Перелік Класифікаторів Української бази даних надійності АЕС* : ПР-Т.0.08.116-06. – К., 2006.
11. *Положення про порядок збору, обліку, зберігання та обмін даними з надійності обладнання АЕС* : ПЛ-Д.0.08.168-03. – К., 2003. – 50 с.
12. *Положення про порядок продовження строку експлуатації обладнання, систем, важливих для безпеки* : ПЛ-Д.0.03.126-10 (Зм. № 3). – К., 2010. – 32 с.
13. *Положення про порядок розгляду та обліку порушень і відхилень в роботі АЕС ДП НАЕК «Енергоатом»* : ПЛ-Д.0.03.010-08 (Зм. № 1). – К., 2008.
14. *Положення про порядок розслідування та облік правопорушень в роботі атомних станцій* : НП 306.2.100-2004 (Зм. № 5). – К. : ДКЯРУ, 2004. – 56 с.
15. *Правила обладнання та безпеки експлуатації обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок* : ПН АЕ Г-7-008-89. – К. : ДАЕН СРСР, 1989.
16. *Правила організації технічного обслуговування та ремонту систем і обладнання атомних електростанцій.* – Мінтопенерго України : СОУ-Н ЯЕК1.010:2008 (Зм. № 1). – К., 2008. – 38 с.

17. *Про затвердження загальних вимог до системи фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів і загальних вимог до систем фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні* : Наказ Державного комітету ядерного регулювання від 28.08.2008 № 156.

18. *Типовая методика оценки технического состояния, показателей надежности и остаточного ресурса для различных групп электротехнического оборудования АЭС* : МТ-Т.0.03.195-09. – К., 2009. – 68 с. – (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом». Методика).

19. *Управління виробництвом. Порядок продовження строку експлуатації обладнання за результатами оцінки технічного стану. Порядок заміни обладнання, яке відпрацювало регламентований строк експлуатації на однотипне* : СТП 3.3812.057-2010. – К., 2010. – 49 с.

20. *Security of Radioactive Sources [Implementing Guides]*. – Vienna, 2009. – 66 p. – (IAEA Nuclear Security Series No 11).