

УДК 681.326:519.713

Г.Ф. Кривуля, А.С. Шкиль, О.А. Павлов

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Введение. Эргатехническая система (ЭТС) – это сложная система управления, составными элементами которой являются технический объект, программно-аппаратные компьютерные средства и оперативный персонал для эксплуатации системы. В зависимости от числа лиц оперативного персонала различают ЭТС как моноэргатические (один оператор) и полиэргатические (несколько операторов). Возникновение сложноорганизованных ЭТС связано со стремительным развитием компьютерных информационных технологий и необходимостью работы операторов с интерфейсами управления современными промышленными объектами критического применения, такими как объекты космической и авиационной техники, энергетические предприятия, системы управления технологическими процессами, сети интернет и т. д. ЭТС нашли своё применение на тех объектах, где для обеспечения их надежной работы требуется вмешательство оператора[1].

Исследования, связанные с развитием и совершенствованием ЭТС, насчитывают три этапа. На первом этапе целью совершенствования таких систем была адаптация человека к техническому устройству, на втором — приспособление технического устройства к психологическим, физиологическим, антропометрическим и другим характеристикам человека. Для третьего этапа характерным является анализ и учет когнитивных факторов оператора совместно с характеристиками технического объекта как совокупных интегральных качеств. При этом техническое устройство рассматривается как вспомогательное средство, включенное в деятельность человека-оператора для выполнения целей и задач управления, поставленных перед оперативным персоналом как части ЭТС,

Одной из разновидностей ЭТС являются компьютеризованные системы управления (КСУ) для управления промышленными и другими объектами критического применения. С точки зрения надежности КСУ представляет собой восстанавливаемый технический объект, процесс функционирования которого можно представить как последовательность чередующихся периодов работоспособности и восстановления (простоя). Для характеристики надежности восстанавливаемой технической системы целесообразно использовать коэффициент готовности, который одновременно оценивает свойства работоспособности и восстановления объекта. Этот показатель может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ технической системы и уменьшения среднего времени восстановления.

В обычном компьютере отсутствует резервирование оборудования, поэтому отказ одного узла приводит к остановке работы компьютера. Отказоустойчивые компьютерные системы с высоким уровнем готовности имеют дублирование всех узлов, поэтому единичный отказ не приводит к остановке работы. Между ними по степени уровня готовности (от средней до очень высокой) находятся компьютеры с высоким коэффициентом готовности, в которых время обслуживания или простоя измеряется от нескольких минут до нескольких секунд в год [2].

В компьютерах с высоким коэффициентом готовности дублируются только основные функциональные узлы: процессорные платы, платы ввода/вывода, источники питания, периферийные устройства, вентиляторы и т.п., то есть те, которые имеют более высокий коэффициент отказов (обычно порядка 10 отказов на 1000 часов безотказной работы). Разъемы, кабели, объединительные платы, каркасы, крейты и т.п. имеют время наработки на отказ, измеряемое сотнями лет, то есть работают почти безотказно. Несмотря на высокую надежность технических средств и высокий коэффициент готовности, компьютерные системы подвержены сбоям и остановкам в их работе. Связано это с тем, что традиционные меры по увеличению надежности компьютерных средств рассчитаны на то, что операторы (пользователи) действуют безошибочно, но во многих случаях именно из-за их оплошности система выходит из строя на более длительное время, чем из-за любых других неполадок.

Один из возможных подходов для обеспечения надежной работы эргатических систем заключается в том, что ошибки операторов и сбои аппаратуры принимаются как необходимость в процессе функционирования данных систем. Вместо попыток избавиться от неполадок, разработчики сосредоточились на проектировании системы, способной быстро восстановиться после выхода из строя. Такой подход получил название "вычисления, ориентированные на восстановление" - ROC (recovery oriented computing) [3].

Постановка задачи. Важнейшей задачей использования КСУ для управления объектами критического применения является обеспечение их бесперебойного функционирования в период эксплуатации. Эта задача имеет три основных составляющих — надежность КСУ, готовность к

использованию системы и качественные характеристики систем обслуживания, в частности, уровень диагностического обеспечения КСУ. Все эти три составляющих предполагают диагностирование и устранение возможных неисправностей системы, порождаемыми отказами и сбоями в ее работе. Если надёжность технических компьютерных средств в настоящее время изучена достаточно всесторонне и глубоко, то в меньшей степени разработаны методы оценки надёжности сложных программных комплексов и работоспособности операторов КСУ.

Человек является основным звеном современных ЭТС и статистика аварийных ситуаций свидетельствует о том, что примерно 30% всех отказов непосредственно или косвенно связаны с ошибками человека. Следовательно, анализ надёжности технических систем должен обязательно включать человеческий фактор как один из важных составляющих такого анализа.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов интегральной оценки работоспособности и готовности ЭТС, которые учитывают не только оперативную готовность программно – аппаратных средств компьютерных систем, но и готовность оператора ЭТС, определяемую на основе его компетентности.

1. Оценки надёжности деятельности оператора. Надёжность работы оператора определяется как необходимость успешного выполнения им поставленной задачи на определенном этапе функционирования системы в течение некоторого интервала времени при заданных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Ошибка (отказ) оператора определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может привести к нарушению нормального хода запланированных операций.

Примем следующие допущения для оценки надёжности ЭТС с учетом всех компонентов системы и действий оператора:

- как отказы техники, так и ошибки оператора являются редкими, случайными и независимыми событиями;
- появление более одного однотипного события за время работы системы от t до t_0+t практически невозможно;
- способность оператора к компенсации ошибок и к безошибочной работе — независимые свойства оператора.

Рассмотрим случай, когда компенсация ошибок оператора и отказов техники невозможна. Тогда отказ техники и ошибка оператора — независимые события и вероятность безотказной работы равна:

$$P(t_0, t) = Pt(t_0, t) \cdot P_o(t)$$

где $Pt(t_0, t)$ - вероятность безотказной работы технических средств в течение времени $t_0, t+t$; $P_o(t)$ — вероятность безошибочной работы оператора в течение времени t при условии, что техника работает безотказно, t_0 — общее время эксплуатации системы, t — рассматриваемый период работы.

Восстановление отказавшего элемента часто требует времени, которым нельзя пренебречь. Среднее время восстановления системы T_B – это математическое ожидание продолжительности восстановления системы после отказа, т. е. среднее время вынужденного, нерегламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением отказа.

$$T_B = \int_0^{\infty} t \cdot P_B dt = \int_0^{\infty} (1 - F_B) dt, \text{ где } P_B - \text{плотность вероятности времени восстановления};$$

F_B – функция распределения времени восстановления.

Для приближенного вычисления показателей надёжности восстанавливаемых систем рассматривается совокупность отказов отдельных элементов. Проводится анализ всех ситуаций, приводящих к отказу системы в целом. В результате вычисляются интенсивность потока событий данного типа и продолжительность пребывания системы в состоянии отказа по каждой из причин. Затем последовательно применяется процедура суперпозиции потоков тех ситуаций, каждая из которых приводит к отказу системы, или разрежения потоков для тех ситуаций, которые приводят к отказу системы при одновременной реализации. В итоге получается результирующий поток с двумя итоговыми характеристиками: средним временем безотказной работы и средним временем восстановления системы. При условии высокой надёжности систем время безотказной работы, как правило, будет экспоненциально распределенным, поэтому этих двух показателей оказывается достаточно для оценки любых других показателей надёжности [1].

2. Коэффициент готовности восстанавливаемой технической системы. Основной характеристикой восстанавливаемой системы является коэффициент готовности K , который для установившегося режима эксплуатации определяется как вероятность того, что система будет исправна в

произвольно выбранный момент в промежутках между плановыми техническими обслуживания
 $K = \frac{T}{T + \tau}$. Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как
 последовательность n чередующихся периодов работоспособности $T_1 \dots T_n$ и восстановления (простоя)

$\tau_1 \dots \tau_n$. При этом $T = \sum_{i=1}^n T_{p_i}$ - общее время нахождения системы в работоспособном состоянии,

$T = \sum_{i=1}^n T_{B_i}$ - общее время восстановления системы.

Коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Этот показатель одновременно оценивает свойства работоспособности и ремонтпригодности объекта.

Для восстанавливаемого объекта при условии простейшего потока отказов и восстановлений коэффициент готовности равен:

$$K = \frac{T}{T + \tau} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \gamma} \tag{1}$$

При этом $\mu = \frac{1}{\tau}$, $\lambda = \frac{1}{T}$, $\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\tau}{T}$; где γ – показатель восстанавливаемости.

Из выражения (1) следует, что коэффициент готовности объекта может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ и уменьшения среднего времени восстановления. С другой стороны коэффициент готовности зависит не от абсолютных значений величин T и τ , а от их отношения, т.е. от величины γ . Отметим, что для высоконадежных систем $T \gg \tau$ или $\gamma \ll 1$.

Для высоконадежных КСУ:

$$0,9 < K_T < 0,999, \text{ т.е. } 0,9 < \frac{1}{1 + \gamma} < 0,999, \text{ и } 0,9(1 + \gamma) < 1 < 0,999(1 + \gamma)$$

Решая данное неравенство, получим: $0,001 < \gamma < 0,111$.

Для практических расчетов применяется приближенные вычисления K . Для того выполним следующие преобразования:

$$K = \frac{1 + \gamma - \gamma}{1 + \gamma} = 1 - \frac{\gamma}{1 + \gamma}. \text{ Примем, что } \frac{\gamma}{1 + \gamma} \approx \gamma,$$

при этом погрешность преобразования будет:

$$\Delta = \left| \frac{\gamma}{1 + \gamma} - \gamma \right| = \left| \frac{\gamma - \gamma - \gamma^2}{1 + \gamma} \right| = \frac{\gamma^2}{1 + \gamma}, \text{ т.к. } \gamma \ll 1, \text{ то } \Delta \approx \gamma^2.$$

Таким образом, для практических вычислений целесообразно использовать $K \approx 1 - \gamma$.

Коэффициент готовности является предельным значением, к которому стремится средний коэффициент готовности с ростом рассматриваемого интервала времени, т.е.

$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t)$, где $K(t)$ – вероятность того, что в момент времени t изделие в работоспособном состоянии (при известных начальных условия в момент $t=0$), т.е

$$K(t) = \frac{1}{T + \tau} \int_0^{\infty} P(t) dt, \text{ где } P(t) \text{ – вероятность безотказной работы.}$$

Для практического использования представляет определенный интерес изучение вида временной зависимости коэффициента готовности при заданных ограничениях. Как правило, это семейство зависимостей, каждая из которых строится для конкретных данных. Для экспоненциальных законов распределения T и τ зависимость базовых значений K_T от времени имеет экспоненциальный вид (кривая 1 на рис.1).

Для исходных не экспоненциальных законов распределения T и τ зависимость значений коэффициента готовности K_T от времени может иметь различные формы. Например, на рис.1 представлена зависимость 2, которая имеет провал за счет увеличения времени восстановления на некотором этапе эксплуатации компьютерной системы. Аналогично показана зависимость 3 колебательного характера, которая соответствует нестационарному характеру процессу восстановления системы.

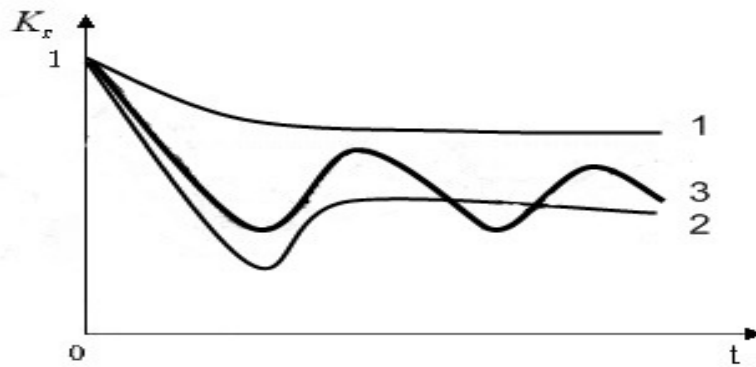


Рис. 1. Зависимости K_r от времени.

3. Зависимость коэффициента готовности от уровня обученности оператора. Высоконадежные КСУ представляют собой совокупность технических средств, алгоритмов управления, методов и средств информационного и программного обеспечения (ПО), а также технического персонала, объединенных для выполнения функций управления. Предполагается, что нарушение работоспособности любой из трех компонент (аппаратуры, ПО и персонала) приводит к нарушению работоспособности системы, которая должна функционировать непрерывно в течение заданного времени.

Для упрощения дальнейшего изложения введем следующие ограничения, которые в целом не влияют на характер вычисления коэффициента готовности:

- 1) наработка на отказ T и время восстановления τ являются случайными величинами, подчиняющимися экспоненциальному закону распределения;
- 2) технические параметры КСУ, определяющие значения T и τ не изменяются во времени;
- 3) соотношение T и τ не изменяется во времени (стационарный процесс);
- 4) квалификация (обученность) персонала влияют на изменения T и τ в равной степени.

В работе [4] проф. Смагин В.А предложил рассматривать человека-оператора в качестве компоненты КСУ. Тогда свойство сохранять работоспособность оператора для соответствующей функциональной деятельности при условии обучения можно описать двойной экспоненциальной моделью:

$$P_3(t, \tau) = e^{-\lambda t_3} e^{-\nu \tau} \tag{2}$$

где t_3 – необходимое для выполнения задачи время работы оператора в информационной системе, λ – интенсивность ошибок при выполнении работы, τ – время обучения, ν – интенсивность ошибок при обучении.

Следствием из (2) является формула условной интенсивности отказа (ошибки) оператора при условии предварительного обучения:

$$\Lambda(t) = P(t) \lambda(t) \tag{3}$$

где $P(t)$ – условная вероятность успешной деятельности человеческого организма (оператора) в условиях расхода накопленного в период обучения ресурса работоспособности, $\lambda(t)$ – безусловная интенсивность отказа (ошибки) оператора.

Из выражения (3) следует, что условная интенсивность отказов $\Lambda(t)$ приводит к уменьшению безусловной интенсивности отказов $\lambda(t)$ в P раз. Применительно к системам с восстановлением, где $\lambda = \frac{1}{T}$, можно предположить, что условная наработка на отказ T_y увеличивается в P_1 раз, т.е. $T_y = T \cdot P_1$ (реально условная наработка на отказ уменьшается, т.к. $0 \leq P_1 \leq 1$). Применив аналогичные рассуждения к интенсивности восстановлений $\mu = \frac{1}{\tau}$ можно предположить, что время восстановления τ уменьшится в P_2 раз, т.е. $\tau_y = \frac{\tau}{P_2}$ (реально время восстановления увеличится, т.к. в свою очередь

$0 \leq P_2 \leq 1$). Исходя из предположения, что обученность оператора влияет на T и τ в равной степени, примем, что условная вероятность для них будет одинакова, т.е. $P_1 = P_2 = P$.

Для оперативного персонала КСУ определим условный коэффициент готовности K_y , который также может обозначаться K_p (от англ. operating personnel):

$$K_y = \frac{T_y}{T_y + \tau_y} \tag{4.1}$$

С учетом $T_y = T \cdot P$ и $\tau_y = \frac{\tau}{P}$ получим:

$$K_p = \frac{T \cdot P}{T \cdot P + \frac{\tau}{P}} = \frac{T \cdot P^2}{T \cdot P^2 + \tau} = \frac{P^2}{P^2 + \gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P^2}} \tag{4.2}$$

Если принять, что $\gamma = 0,01$, получим

$$K_p = \frac{P^2}{P^2 + 0,01} = \frac{1}{1 + \frac{0,01}{P^2}}$$

Для приближенного значения K_p определим область допустимых значений для P :

$$K = 1 - \gamma = 1 - \frac{\tau}{T} = 1 - \frac{\tau}{T \cdot P^2} = 1 - \frac{\gamma}{P^2} \tag{5}$$

Исходя из того, что $K = 1 - \frac{\gamma}{P^2} > 0$, получим $\frac{\gamma}{P^2} < 1$ или $P^2 > \gamma$, т.е. $P > \sqrt{\gamma}$

Определим зависимость P от K_p . Если $\gamma = (1 - K) \cdot P^2$, то

$$P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - K}} \tag{6}$$

Рассчитаем приращение ΔP в зависимости от ΔK :

$$P + \Delta P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - (K + \Delta K)}};$$

$$\Delta P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - (K + \Delta K)}} - P \tag{7}$$

Обученность оператора C определим как частоту правильного выполнения заданий основной деятельности (результат обучения). Если $(C - 1)$ – частота неправильного выполнения заданий, то $C = R/N$, где R – число правильных действий оператора в единицу времени; N – общее число действий за единицу времени.

Исходя из (2) и (3), вероятность безотказной работы будет равна $P(t) = e^{-vt}$, где v – интенсивность ошибок оператора за время обучения t . Если абстрагироваться от случайного характера ошибок оператора в период обучения и от продолжительности обучения t , а рассматривать только результат обучения C , то интенсивность ошибок оператора за время обучения можно заменить количеством ошибок за время обучения $(C - 1)$:

$$P = e^{-(1-C)} = e^{(C-1)} \tag{8}$$

Для перехода от условной вероятности P к обученности C выполним логарифмирование:

$$\ln P = C - 1; \quad \text{откуда } C = \ln P + 1.$$

Исходя из неравенства $0 \leq C \leq 1$, область допустимых значений для P будет равна:

$$0 \leq \ln P + 1 \leq 1; \quad e^{-1} \leq P \leq e^0, \quad 0,368 \leq P \leq 1 \tag{9}$$

Таким образом, при $\gamma = 0,01$ диапазон изменения K_p будет $0,932 \leq K_p \leq 0,9901$

На основании сопоставления (6) и (9) можно сделать вывод, что для вычисления условного коэффициента готовности персонала K_p достаточно только приближенной формулы (5).

Рассмотрим предельные случаи. При максимальном уровне обученности, если $C = 1$ и $P = 1$, то K_p равно максимальному значению безусловного коэффициента готовности, что соответствует объективному характеру процесса обучения. При минимальном уровне обученности если $C = 0$, то $P = e^{-1} = 0,37$, а $K_p = 0,932$. Такое значение минимального K_p связано с тем, что двухуровневая экспоненциальная модель (2) учитывает дополнительные факторы, кроме обученности персонала - например, время обучения, способы восстановления работоспособности персонала и др.

В таблице 1 приведены численные значения для зависимости условного коэффициента готовности K_p от уровня обученности персонала C при $\gamma = 0,01$.

Таблица 1.

Зависимость условного коэффициента готовности K_p от C

C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$P = e^{(C-1)}$	0,37	0,4	0,45	0,5	0,54	0,6	0,67	0,74	0,82	0,9	1
$K_p = \frac{P^2}{P^2 + \gamma}$	0,932	0,941	0,9529	0,962	0,967	0,973	0,978	0,982	0,9853	0,9878	0,9901

Покажем пример расчетов уровня обученности персонала при изменениях коэффициента готовности.

Пусть имеется высоконадежная КСУ с показателем восстанавливаемости $\gamma = 0,01$. Результаты анализа уровня квалификации персонала показали, что уровень обученности (компетентности) $C = 0,55$. Определить, на сколько должна быть увеличена обученность персонала для того, чтобы условный коэффициент готовности персонала K_p повысился на 0,01 ($\Delta K_p = 0,01$).

Используя соотношение (8) $P = e^{(C-1)}$, рассчитаем условную вероятность $P = e^{0,55-1} = 0,63$, а по ней условный коэффициент готовности $K_p = \frac{(0,63)^2}{(0,63)^2 + 0,01} = 0,975$.

На основе (6) рассчитаем

$$\Delta P = \sqrt{\frac{0,01}{1 - (0,975 + 0,01)}} - 0,63 = 0,19.$$

При обратном переходе к показателю обученности (компетентности) C на основе $C = \ln P + 1$, получим: $C = \ln 0,82 + 1 = 0,801$, что показано на рисунке 2.

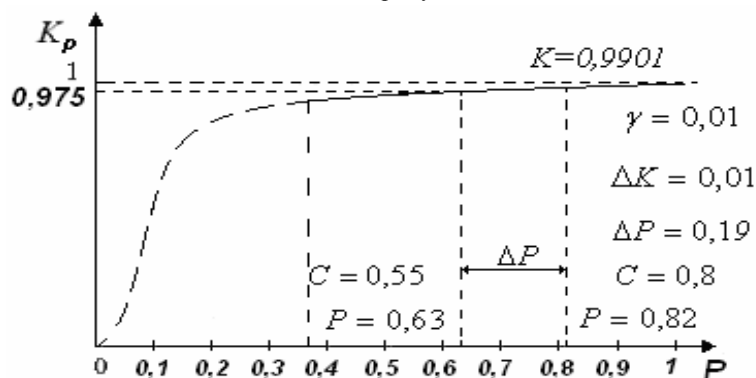


Рис. 2. График зависимости K_p от P при $\gamma = 0,01$

Таким образом, условный коэффициент готовности K_p или коэффициент готовности персонала $K_p = 0,975$ может быть увеличен за счет повышения обученности (компетентности) персонала C , на $\Delta K = 0,01$ при условии $\Delta P = 0,19$, а уровень компетентности при этом должен быть повышен до уровня $C = 0,8$ (т.е. $\Delta C = 0,25$). Как видно из приведенных выкладок, уровень обученности (компетентности) оперативного персонала КСУ имеет существенное влияние на повышение коэффициента готовности.

Важным вопросом в исследованиях по вопросам готовности восстанавливаемых технических систем является оценка степени компетентности пользователя ЭТС. В работах [5,6] представлена методика диагностирования компетентности пользователя ЭТС с использованием нечеткой логики, которая позволяет оценить компетентность по заданным тестовым заданиям.

Выводы. Анализ интегральных характеристик надежности эрготехнической компьютерной системы показал, что готовность восстанавливаемой системы существенно зависит от уровня функциональной готовности пользователя, которая определяется его обученностью (компетентностью). Полученные математические модели и аналитические зависимости коэффициента готовности системы от численных значений компетентности пользователя позволяют определить уровень дообучения оператора в зависимости от состояния его текущей компетентности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Надежность технических систем: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Телекоммуникационная инфраструктура центров обработки данных [Электронный ресурс] / Документ SP-3-0092: (Стандарт TIA-942, редакция 7.0, февраль 2005) – Режим доступа: [www / – URL: – http://www.ups-info.ru/etc/tia_russkii.pdf](http://www.ups-info.ru/etc/tia_russkii.pdf) – 15.06.2011 г. – Загл. с экрана.
3. Кривуля Г.Ф., Шкиль А.С. Готовность компьютеризованных систем управления и компетентность пользователя // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. - №5. – С.12–17.
4. Смагин В.А. Модель надежности живого организма (оператора). [Электронный ресурс].– Режим доступа: [www / – URL: – http://sir35.narod.ru/Smagin/index.htm#Beg](http://sir35.narod.ru/Smagin/index.htm#Beg) – 10.12.2010 г. – Загл. с экрана.
5. Кривуля Г.Ф., Шкиль А.С., Кучеренко Д.Е., Гаркуша Е.В. Диагностика компетентности пользователей компьютерных систем // АСУ и приборы автоматики. – 2010. – Вып.150. – С. 125–133.
6. Кривуля Г.Ф., Шкиль А.С., Кучеренко Д.Е., Гаркуша Е.В. Нечеткая логика в экспертной оценке ИКТ-компетентностей // Вісник ХНТУ. – ХЕРСОН, 2011. – №2 (41). – С. 13-23

КРИВУЛЯ Геннадий Федорович – д.т.н., профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Научные интересы: техническая диагностика, моделирование и автоматизация проектирования компьютерных средств.

ШКИЛЬ Александр Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники

Научные интересы: техническая диагностика, моделирование и тестирование сложных человеко-машинных систем.

ПАВЛОВ Олег Анатольевич – аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники

Научные интересы: техническая диагностика.