

А.И. Михалёв, А.А. Стенин, И.Г. Дроздович, С.А. Стенин

## **КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ АЭС ПРИ ПОДГОТОВКЕ НА ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

*Аннотация. Проблема совершенствования операторской деятельности приобрела особую остроту в современных системах управления технологическими процессами и сложными объектами. Проведенный анализ работы операторов АЭС позволяет сделать вывод, что от правильности его действий, умения своевременно найти и реализовать верное в сложной ситуации решение, зависит не только эффективность выполнения поставленных перед ним задач, но, в ряде случаев, целостность самого объекта и безопасность людей.*

*Для обеспечения возможности контроля и оценки деятельности при обучении операторов АЭС на тренажерных комплексах предлагается представить их работу некоторой текущей моделью, отражающей последовательное изменение текущего состояния дискретных органов управления на пульте АЭС по сравнению с эталонной моделью его деятельности. При оценке деятельности оператора АЭС приняты два уровня (0,1) для фиксации состояния каждого органа управления. Эти уровни соответствуют физическим состояниям органов управления типа: «включено - выключено», «минимум - максимум», «нажать - отпустить».*

*Предлагается методика оценки и контроля деятельности операторов АЭС при их подготовке на тренажерных комплексах, основанная на введенных в статье понятиях «инициативной» и «запрещённой» комбинациях в матрицах преобразования, характеризующих текущую деятельность операторов АЭС.*

*Ключевые слова: оператор АЭС, тренажерный комплекс, «инициативная» и «запрещённая» комбинации, многоуровневый критерий контроля и оценки.*

**Введение.** В настоящее время проблема совершенствования операторской деятельности приобрела особую остроту в современных системах управления технологическими процессами и сложными объектами. Проведенный анализ работы операторов АЭС позволяет сделать вывод, что от правильности его действий, умения своевременно найти и реализовать верное в сложной ситуации решение, зависит не только эффективность выполнения поставленных перед ним задач, но, в ряде случаев, целостность самого объекта и безопасность людей [1,2,5,6].

Известно, что наиболее эффективным техническим средством обучения операторов различного рода профессиональной деятельности является тренажеры [3,6]. В последнее время тренажеры находят все более широкое применение в промышленности, энергетике и других отраслях народного хозяйства, в частности, для подготовки операторов энергоблоков АЭС, характеризующихся сложностью задач управления.

Предлагаемая в данной статье методика оценки оператора АЭС при обучении его на тренажёре ориентирована на схему "учитель-ученик", которая в данном случае может быть представлена структурой, приведенной на рис. 1.

Главными элементами приведенной структуры являются инструктор, человек-оператор (группа операторов), подсистемы "Ученик", "Контроль и оценка", "Учитель".

В функции инструктора входит задание и контроль за общим процессом обучения. При необходимости инструктор может в процессе обучения создать ту или иную нестандартную ситуацию.

Подсистема "Учитель" по исходному тестовому заданию формирует соответствующие эталонные реализации, на основе которых происходит сравнение с реальной работой оператора (группы операторов) и формируется оценка его (их) деятельности.

Подсистема "Контроль и оценка" реализует работу многоуровневой иерархической системы критериев оценки и обеспечивает документирование процесса обучения.

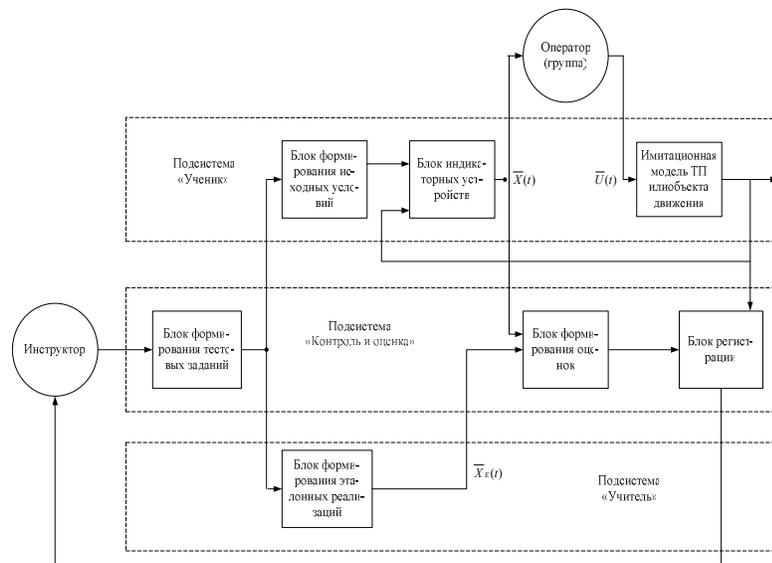


Рисунок 1 - Структура системы подготовки операторов АЭС по схеме «учитель-ученик»

Ниже предлагается эффективная методика оценки и контроля деятельности операторов АЭС при их подготовке на тренажёрных комплексах, основанная на введенных в статье понятиях «инициативной» и «запрещённой» комбинациях в матрицах преобразования, характеризующих текущую деятельность операторов АЭС

**Формирование эталонных и текущих дискретных состояний органов пультов управления АЭС.** Для обеспечения возможности контроля и оценки деятельности при обучении операторов АЭС на тренажерных комплексах предлагается представить их работу некоторой текущей моделью, отражающей последовательное изменение текущего состояния дискретных органов управления на пульте АЭС по сравнению с эталонной моделью его деятельности. При оценке деятельности оператора АЭС приняты два уровня (0,1) для фиксации состояния каждого органа управления. Эти уровни соответствуют физическим состояниям органов управления типа: «включено - выключено», «минимум - максимум», «нажать - отпустить» и т.д.

Для контроля и оценки деятельности операторов АЭС при их подготовке на тренажерных комплексах предлагается использовать трёхуровневую структуру критериев контроля и оценки - «задача – режим - параметр» [3,8]. Согласно принятой структуре нижним уровнем иерархии являются критерии оценки деятельности оператора по параметрам, в качестве которых в данном случае принято состояние органов управления в отдельном режиме

Поскольку основной единицей в такой структуре является отдельный режим, то очевидно, что создание эталонной модели предполагает в первую очередь создание эталонного оператора преобразования  $Q_{j,эт}$  каждого  $j$ -го режима и текущего оператора преобразования  $Q_{j,тек}$  или просто  $Q_j$ . В данном случае,  $Q_j$  можно представить матрицей, отражающей последовательное изменение текущего состояния дискретных органов управления данного режима. При этом, если число столбцов такой матрицы, определяемое числом органов управления, для каждого режима является величиной вполне определенной и неизменной, то число строк, определяемое числом выполненных оператором АЭС дискретных операций, неоднозначно в силу функциональных особенностей конкретного оператора АЭС.

Поэтому матрица  $Q_j$  является вариативной в зависимости от конкретного оператора и степени его подготовленности, в которой не меняется только первая и последняя строки. Первой строкой матрицы  $Q_j$  является ис-

ходное к началу обработки j-го режима состояние органов управления. Последней строкой является заданное конечное состояние органов управления, определяемое учебной задачей на обработку j-го режима. Это касается и эталонной матрицы преобразования  $Q_{j\text{эт}}$ . Эталонная матрица будет только в том случае единственной, если при обработке j-го режима не допускается произвольное и одновременное переключение органов управления. Для большинства же режимов характерны ситуации, когда оператор может одновременным и произвольным в рамках допустимого переключения органов управления выполнить поставленную задачу.

Учитывая выше изложенное, в качестве эталона предлагается использовать первую и последнюю строки матрицы  $Q_{j\text{эт}}$  с текущим контролем «запрещённых» комбинаций вектора состояния органов управления.

Под «запрещённой» комбинацией будем понимать полученные на основе анализа работы операторов АЭС такие наборы состояний органов управления, которые в реальных условиях приводят либо к срыву выполнения j-го режима, либо к аварийному состоянию АЭС [5]. Для формирования текущих матриц  $Q_j$  состояний органов управления введем понятие «инициативных» комбинаций вектора состояния органов управления. Роль «инициативных» комбинаций вектора состояния органов управления заключается в том, что при его (векторе) определенных состояниях работа оператора АЭС должна сопровождаться обязательным принятием (или выдачей) информации (сообщения). Отсутствие сообщения считается ошибкой, которая в процессе дальнейшей работы может быть исправлена. В этом случае структуру текущей матрицы  $Q_j$ , которую назовем «инициативной» матрицей, можно представить следующим образом:

$$Q_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & & & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & & & \\ \dots & 0 & \dots & \dots & & & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & & & \\ 1 & 1 & 1 & \dots & & & 1 \end{bmatrix}$$

- исходное состояние органов  
управления

- инициативные комбинации

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}$

- конечное состояние органов управления

где  $(x_1, x_2, \dots, x_{nj})$  - n-органов управления j-го режима, а число «инициативных» комбинаций ограничено сверху временем выполнения j-го режима.

По аналогии с «инициативной» матрицей  $Q_j$  эталонную матрицу  $Q_{j\text{эт}}$  можно представить следующим образом:

$$Q_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 1 & 0 & 1 & & 0 \\ 0 & 1 & 1 & & 1 \\ \dots & & & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{- исходное состояние органов управления} \\ \text{- запрещенные комбинации} \\ \text{- конечное состояние органов управления} \end{array} \right\}$$

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}$

Здесь число строк, определяемое числом «запрещенных» комбинаций строго детерминировано и определяется анализом причин возникновения нештатных ситуаций.

При совпадении одной из строк «инициативной» матрицы со строками эталонной матрицы  $Q_{j\text{эт}}$  (за исключением исходного и конечного векторов состояния органов управления) задача отработки  $j$ -го режима считается невыполненной и оценивается неудовлетворительной оценкой.

В процессе профессиональной деятельности оператор в дискретные моменты времени (в общем случае, не равны друг другу) формирует вектор - столбцы  $\bar{a}_k$  состояния органов управления «инициативной» матрицы  $Q_j = \{\bar{a}_k\}$  ( $i=1, \dots, n$ ;  $k$  - определяется работой оператора).

При полностью выполненном режиме (при отсутствии совпадений «инициативных» комбинаций с «запрещенными») происходит отработка «инициативной» матрицы согласно методике, изложенной ниже.

**Реализация многоуровневого критерия контроля и оценки при выполнении оператором АЭС дискретных операций.** Анализ профессиональной деятельности оператора АЭС показывает, что его деятельность достаточно точно характеризуется быстродействием, безошибочностью (надежностью) и напряженностью его работы [3,4,7].

Для оценки деятельности оператора в смысле его надежности (безошибочности), как было указано выше, приняты два уровня (0 или 1) фиксации состояния каждого органа управления. При этом состояние каждого  $k$ -го органа управления в моменты выполнения  $i$ -тых дискретных операций может быть описано вектор-столбцом  $\bar{a}_k$  размерности  $N^j$ , элементами которого являются нули и единицы, т.е.  $a_k^j = (a_{1k}^j, a_{2k}^j, \dots, a_{N^j k}^j)^T$ .

Полагая, что число дискретных органов управления в  $j$ -м режиме равно  $N_0^j$ , то оператор преобразование  $Q_j$  можно представить матрицей

$$Q_j = \{a_{ik}^j\}, \quad i=1, \dots, N^j; \quad k=1, \dots, N_0^j. \quad (1)$$

которая отражает последовательное изменение текущего состояния органов управления в  $j$ -м режиме.

Если принять, что в процессе выполнения  $j$ -го режима каждый орган управления должен быть в некоторый момент времени переведен из одного крайнего состояния (0 или 1) в другое (соответственно 1 или 0) и сохраняться до конца режима, то появление любых других промежуточных переключений свидетельствует о наличии ошибок в действии оператора. В этом случае количество ошибок  $n_{\text{ош}}$  для  $k$ -го органа управления можно определить как

$$n_{\text{ош}}^j = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=2}^{N^j} (a_{ik}^j - a_{i-k,k^j}) - 1 \right]. \quad (2)$$

Тогда количественной оценкой надежности (безошибочности) работы оператора при выполнении  $j$ -го режима может служить критерий вида

$$I_{0j} = \sum_{k=0}^{N_0^j} \frac{a_k^j}{2\beta_k^j} \left[ \sum_{i=2}^{N^j} (a_{ik}^j - a_{i-k,k^j}) - 1 \right] \quad (3)$$

где  $a_k^j$  - коэффициент важности  $k$ -го органа управления, причем  $\sum_{i=2}^{N^j} a_{ik}^j = 1$ , а  $\beta_k^j$

- коэффициент привязки и нормировки в диапазоне  $[0,1]$ .

Следует отметить, что в  $j$ -ом режиме возможны случаи, когда  $k$ -тый орган управления может изменяться по цепочке  $0(1) \rightarrow 1(0) \rightarrow 0(1) \rightarrow \dots$ . Тогда формула (3) примет вид

$$I_{0j} = \sum_{k=0}^{N_0^j} \frac{a_k^j}{2\beta_k^j} \left[ \sum_{i=2}^{N^j} (a_{ik}^j - a_{i-k,k^j}) - b_k^j \right] \quad (4)$$

где  $b_k^j = 1$ , если  $k$ -тый орган изменяется по цепочке  $0(1) \rightarrow 1(0)$ ,  $b_k^j = 2$ , если  $0(1) \rightarrow 1(0) \rightarrow 0(1)$ ,  $b_k^j = 3$ , если  $0(1) \rightarrow 1(0) \rightarrow 0(1) \rightarrow 1(0)$  и т.д.

В зависимости от числа ошибок и выбранной шкалы оценка принимает конкретные числовые значения в нормированном диапазоне  $[0,1]$ .

Напряженность деятельности оператора АЭС характеризуется общей реакцией организма на воздействие информационного потока и оценивается с помощью ряда физиологических показателей (электроэнцефалограммы, кардиограммы др.). В частности, одним из таких критериев оценки общей напряженности оператора в  $j$ -м режиме является критерий вида [4,7]:

$$I_{Hj} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{y_j}{y_{j\max}} \right)^2} \quad (6)$$

где  $y_{j\max}$  - максимально возможные значения выбранных физиологических показателей,  $y_j$  - значения этих же показателей в данных условиях работы. Отсутствие возможности цифровой имитации оператора с точки зрения его физиологического состояния в процессе выполнения учебной задачи, приводит к тому, что его деятельность в дальнейшем оценивается только по двум параметрам: надежности и быстродействию. Это, однако, не исключает при практической реализации тренажерного комплекса и оценку напряженности оператора.

Для оценки быстродействия операторов АЭС за время выполнения  $i$ -й дискретной операции принимаем время

$$\tau_{oni} = \tau_{pi} + \tau_{doi}, \quad (7)$$

где  $\tau_{pi}$  - скрытое время реакции оператора АЭС (обычно  $\approx 2$ с), определяемое как интервал времени от момента появления сигнала на отработку до реакции на него оператора;  $\tau_{doi}$  - это время двигательной реакции, которое определяется как

$$\tau_{doi} = b * \log_2 \mu_i, \quad (8)$$

где  $b = 0,074$ ,  $\mu_i = 2R_i/Q_i$  — комплексный коэффициент трудности выполняемой работы,  $R_i$  - расстояние перемещения органа управления,  $Q_i$  - ширина органа управления [7].

С учетом времени приема и восприятия информации  $\tau_{npi}$ , а также времени анализа и принятия решений  $t_{peui}$  общее время выполнения  $i$ -й дискретной операции определяется как

$$\tau_{doi} = \tau_{oni} + \tau_{npi} + \tau_{peui}, \quad (9)$$

Тогда, общее время выполнения  $j$ -го режима определяется суммой времени выполнения  $i$ -тых операций в данном режиме, то есть

$$\tau_{pi} = \sum_{i=1}^N \tau_{doi}, \quad (10)$$

где  $N$  - число дискретных операций, выполненных оператором в данном режиме.

Если теперь задать некоторое время  $T_{pj}$  и  $T_{эj}$  может служить основой для оценки деятельности оператора в смысле его быстродействия. Учитывая, что количественная оценка должна лежать в пределах нормированного

диапазона  $[0,1]$ , вводим величину  $\Delta t_{\max j}$  максимального рассогласования времен  $T_{pj}$  и  $T_{эj}$ . В результате имеем

$$I_{Tj} = \frac{T_{pj} - T_{эj}}{\Delta t_{\max j}} \delta_T \quad (11)$$

где  $\delta_T$  - признак своевременного выполнения  $j$ -го режима причем  $\delta_T = 0$  если  $T_{pj} - T_{эj} \leq 0$  и  $\delta_T = 1$ , если  $T_{pj} - T_{эj} > 0$ .

На втором уровне иерархии согласно принятой многоуровневой структуре количественной деятельности оператора принят критерий вида

$$q_j = \gamma_{Tj} I_{Tj} + \gamma_{0j} I_{0j} + I_{Hj} \gamma_{Hj}, \quad (12)$$

где  $I_{Tj}, I_{0j}, I_{Hj}$  - количество оценки действий оператора по надежности и напряженности, быстродействию, определяемые соответственно по формулам (4), (6), (11), а  $\gamma_{Tj}, \gamma_{0j}, \gamma_{Hj}$  - коэффициенты важности параметров в  $j$ -м режиме, причем

$$\gamma_{Tj} + \gamma_{0j} + \gamma_{Hj} = 1 \quad (13)$$

Наконец, на верхнем уровне иерархии рассчитывается комплексная количественная оценка за всю учебную задачу согласно эмпирическому критерию, разработанного и предложенного авторами в работе [8].

#### ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Аварии и инциденты на атомных электростанциях. Учебное пособие. / под ред. С.П. Соловьева. – Обнинск, ИАТЭ, 1992. – 300 с.
2. Randall J. Mumaw, Emilie M. Roth, Kim J. Vicente, Catherine M. Burns There is more to monitoring a nuclear power plant than meets the eye // Human factors. 2000. Vol 42. – P. 36-55.
3. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: «Наука», 1982. – 270 с.
4. Зайцев В.С. Системный анализ операторской деятельности. – М.: Радио и связь, 1990. – 120 с.
5. Широкова А.А. Особенности неправильных действий и самоконтроля в работе персонала атомной станции // Проблемы психологии и эргономики. – 2001. – №4. – С. 49-51.
6. Чачко А. Г. Подготовка операторов энергоблоков: Алгоритмический подход. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
7. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах «человек-техника» – М.: Машиностроение. - 1983. – 224с.
8. А.А. Стенин, М.М. Ткач, А.Н. Губский, С.А. Стенин Синтез иерархической структуры критериев оценки деятельности операторов сложных технических систем. – Вісник НТУУ КПІ. - Інформатика та обчислювальна техніка. - К.:Век.- №57.-2012. - С. 60-64.

## REFERENCES

1. Avaryy u yntsidenty na atomnykh elektrostantsiyakh. Uchebnoe poso-bye. / pod red. S.P. Soloveva. – Obnynsk, YATЭ, 1992. – 300 s.
2. Randall J. Mumaw, Emilie M. Roth, Kim J. Vicente, Catherine M. Burns There is more to monitoring a nuclear power plant than meets the eye // Hu-man factors. 2000. Vol 42. – P. 36-55.
3. Hubynskiy A.Y. Nadezhnost y kachestvo funktsyonyrovaniya эrhaty-cheskykh system. – L.: «Nauka», 1982. – 270 s.
4. Zaitsev V.S. Systemnyi analiz operatorskoi deiatelnosti. – M.: Radyo y sviaz, 1990. – 120 s.
5. Shyroкова A.A. Osobennosti nepravylnykh deistviy y samokon-trolia v rabote personala atomnoi stantsyy // Problemy psykholohyy y эr-honomyky. – 2001. – №4. – S. 49-51.
6. Chachko A. H. Podhotovka operatorov эnerhoblokov: Alhorytmichesky podkhod. – M.: Эnerhoatomyzdat, 1986. – 232 s.
7. Shybanov H.P. Kolychestvennaia otsenka deiatelnosti cheloveka v sys-temakh «chelovek-tekhnyka» – M.: Mashynostroenye. - 1983. – 224s.
8. A.A. Stenyn, M.M. Tkach, A.N. Hubskeyi, S.A. Stenyn Syntez yerarkhy-cheskoi struktury kryteryev otsenky deiatelnosti operatorov slozhnykh tekhnicheskyykh system. – Visnyk NTUU KPI. - Informatyka ta obchysliuvalna tekhnika. - K.:Vek.- №57.-2012. - S. 60-64.

Received 01.03.2019.

Accepted 06.03.2019.

### **Контроль та оцінка діяльності операторів АЕС при підготовці на тренажерних комплексах**

*Для забезпечення можливості контролю і оцінки діяльності при навчанні операторів АЕС на тренажерних комплексах пропонується представити їх роботу деякої поточною моделлю, що відбиває послідовне зміна поточного стану дискретних органів управління на пульті АЕС в порівнянні з еталонною моделлю його діяльності. При оцінці діяльності оператора АЕС прийняті два рівня (0,1) для фіксації стану кожного органу управління. Ці рівні відповідають фізичним станам органів управління типу: «включено - виключено», «мінімум - максимум», «натиснути - Відпустити».*

*Запропоновано методику оцінки та контролю діяльності операторів АЕС при їх навчанні навчальних комплексів, заснована на введених в статті поняття "ініціативних" і "заборонених" комбінацій в матрицях перетворень, що характеризують поточну діяльність операторів АЕС.*

### **Monitoring and evaluation activities of NPP operators in the preparation for the training facilities**

*The most effective technical means of training operators of various kinds of professional activities are simulators. In recent years, simulators are increasingly used in industry, energy and other sectors of the economy, in particular, to train operators of nuclear power units, whose actions are characterized by the complexity of management tasks and greater responsibility for decisions. To provide the possibility of monitoring and evaluation of activities on training of NPP operators on training complexes. To do this, propose to present our work with a working model that reflects a consistent change in the current state of discrete controllers on the NPP console compared to the reference model of its activity. Based on this, propose to use a three-level structure of monitoring and evaluation criteria-"task-mode-parameter". According to the adopted*

*structure, the lower level of the hierarchy is a criterion for assessing the activities of the operator by parameters, which in this case is the state of the controls in a separate mode. The method of evaluation and control of NPP operators' activity during their training on training complexes based on the concepts of "initiative" and "forbidden" combinations introduced in the article in the transformation matrices characterizing the current activities of NPP operators is proposed.*

**Михалёв А.И.** – д.т.н., профессор, зав. кафедрою інформаційних технологій та систем Національної металургічної академії України.

**Стенин А.А.** – д.т.н., профессор кафедры технической кибернетики Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

**Дроздович И.Г.** – к.т.н., с.н.с Института телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г.Киев.

**Стенин С.А.** –заместитель начальника Управления экспертиз и исследований химической и промышленной продукции Государственной фискальной службы Украины, Департамент налоговых и таможенных экспертиз ДНТЭ.

**Михальов О.І.** - д.т.н., професор, зав. кафедрою інформаційних технологій та систем Національної металургічної академії України.

**Стенін О.А.** - д.т.н., професор кафедри технічної кибернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Дроздович І.Г.** - к.т.н., с.н.с Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м.Київ.

**Стенін С.О.** -заступник начальника Управління експертиз та досліджень хімічної та промислової продукції Державної фискальної служби України, Департамент податкових і митних експертиз ДНТЕ.

**Mikhalev A.I.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Department of Information Technologies and Systems of the National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Stenin A.A.** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Cybernetics of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

**Drozдович I.G.** - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Telecommunications and the Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

**Stenin S.A.** – Deputy Head of the Directorate for Expertise and Research of Chemical and Industrial Products of the State Fiscal Service of Ukraine, Department of Tax and Customs Expertise DNTE