

С.В. Быткин, Т.В. Критская

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATHCAD РОСТА СЛОЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ НЕДОСТАТОЧНОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Аннотация. В среде MathCAD проведено моделирование и прогнозирование усложнения бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космических аппаратов (КА), что связывается с недостаточной радиационной стойкостью элементной компонентной базы (ЭКБ). Предлагается внедрение в технологию БРЭА КА эффективных технологий увеличения радиационной стойкости активных при структур ИС на основе монокристаллов кремния, легированных германием (CZ-Si<P,Ge>).

Ключевые слова: прогнозирование, избыточность, недостаточная радиационная стойкость элементной компонентной базы

Постановка проблемы в общем виде. Использование КА для решения прикладных задач и научных проблем целесообразно и экономически оправдано только в случае их длительной безаварийной эксплуатации [1]. Значительные потенциальные риски с точки зрения обеспечения безаварийной эксплуатации КА, определяющие ресурс работы аппаратуры КА, связаны с неблагоприятными факторами космического пространства. Основным фактором риска для КА на орбитах внутри магнитосферы (от ионосферных до геостационарных высот), являются радиационные воздействия потоков заряженных частиц радиационных поясов Земли (преимущественно протонов и электронов \bar{e}) на технологические системы КА. Наблюдается деградация солнечных батарей, сбои в работе электронных схем управления и связи КА; примерно треть всех наблюдаемых на КА отказов связаны с потоками ускоренных в магнитосфере релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли. В англоязычной литературе такие электроны рассматриваются как «электроны-убийцы» (killer electrons). Факторы космического пространства, отрицательно влияющие на функционирование оборудования и аппаратуры КА, систематизированы в [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Экономические причины определяют рост требований к срокам активного функционирования (САФ) КА: необходимо создание КА со сроком эксплуатации на геостационарной орбите ≥ 15 лет, при реально достигаемой ≤ 8 [3], т.к. обеспечение длительных САФ ограничиваются недостаточной радиационной стойкостью электронной компонентной базы (ЭКБ) [4]. В работе [5] на примере группировки Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES), состоящей из 8 спутников, показано, что длительность работы КА мониторинга окружающей среды в условиях протонного и электронного облучения существенно ниже ожидаемой, рис. 1:

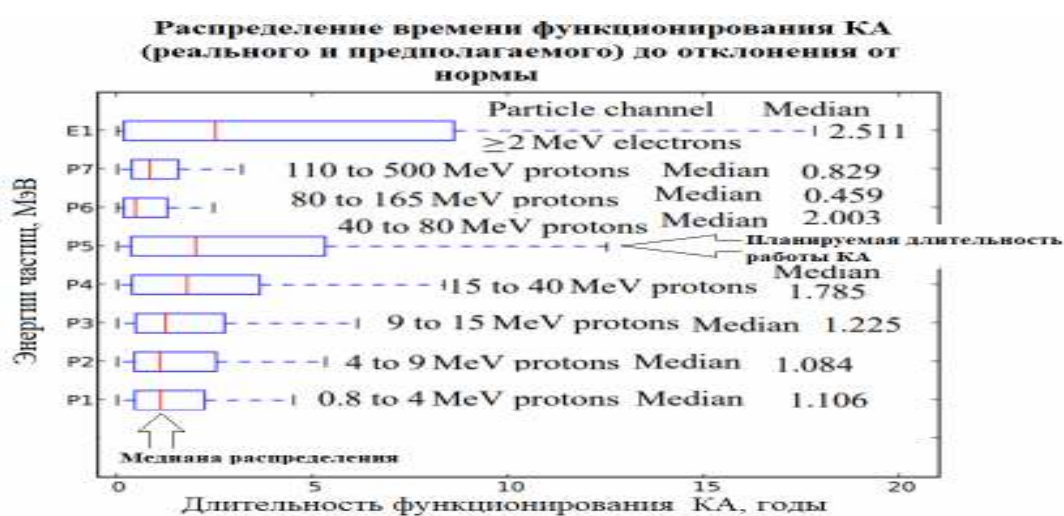
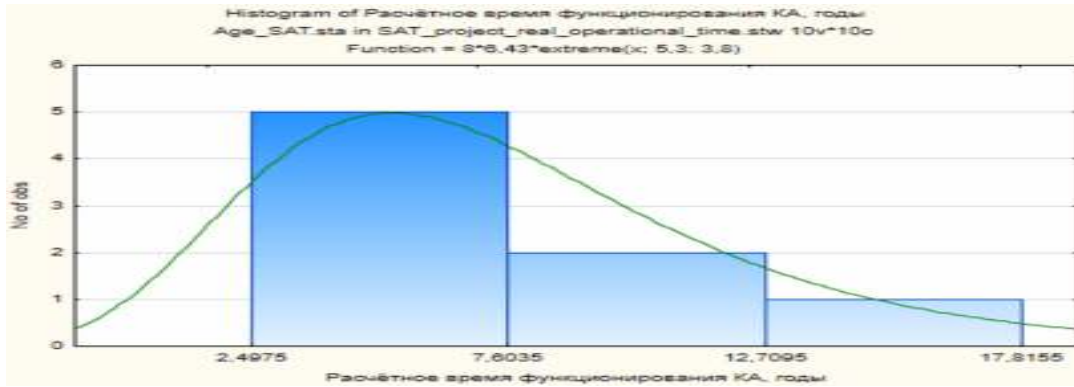
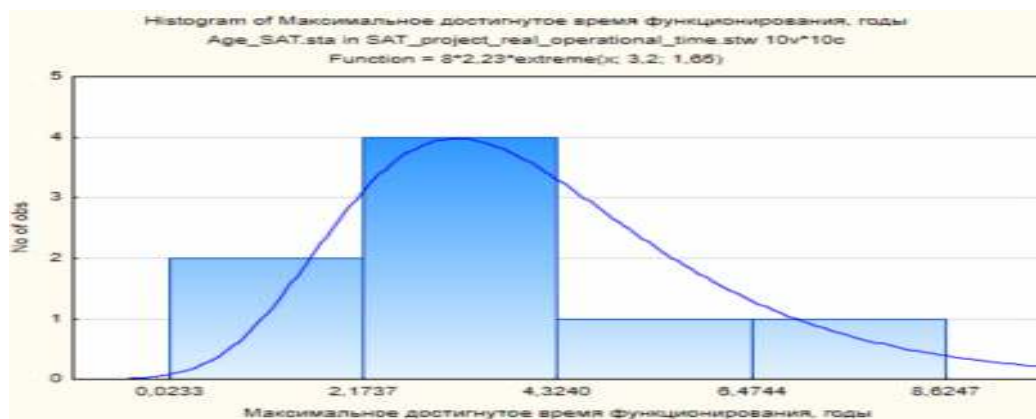


Рисунок 1 – Распределение фактических и прогнозируемых данных длительности функционирования КА (box and whisker representation).

Приведенный материал является не *информацией*, а *данными*, требующими дополнительной обработки с применением статистических методов [6], которая проведена после оцифрования меток, относящихся к реально достигнутому максимальному времени функционирования КА в различных условиях (энергия и тип облучения) и предполагаемой длительности работы КА до возникновения сбоя в работе аппаратуры. В среде STATISTICA10 построены соответствующие гистограммы, рис.2:



а)



б)

Рисунок 2 - Расчётное распределение количества наблюдений прогнозируемой (а) и максимально достигнутой (б) длительности функционирования КА по данным [Ошибка! Закладка не определена.

Сравнение распределений удобно проводить в Mathcad15, листинг 1:

<p>Функция плотности распределения вероятности extreme value distribution в явном виде имеет вид:</p>
$f(x) = \frac{1}{b} \cdot e^{-\frac{(x-a)}{b}} \cdot e^{-e^{-\frac{(x-a)}{b}}}$ <p>, где a – параметр местоположения, b – параметр масштаба, e – основание естественного логарифма</p>
<p>Параметры функции распределения (a, b) для прогнозируемых значений длительности функционирования (единица измерения – годы, переменная project_operational_time):</p>
<p>project_operational_time := 0.000001,0.0001...30</p>

$a_{\text{project_operational_time}} := 5.3$ $b_{\text{project_operational_time}} := 3.8$

$$f2(\text{project_operational_time}) := 8 \cdot 6.43 \cdot \frac{1}{b_{\text{project_operational_time}}} \cdot e^{-\frac{\text{project_operational_time} - a_{\text{project_operational_time}}}{b_{\text{project_operational_time}}}} \cdot e^{-e^{-\frac{\text{project_operational_time} - a_{\text{project_operational_time}}}{b_{\text{project_operational_time}}}}}$$

Параметры функции распределения для реально достигнутых максимальных значений длительности функционирования (переменная $\text{max_operational_time}$):

$\text{max_operational_time} := 0.001, 0.01 \dots 20$

$a_{\text{max_operational_time}} := 3.255$

$$f1(\text{max_operational_time}) := 8 \cdot 2.23 \cdot \frac{1}{b_{\text{max_operational_time}}} \cdot e^{-\frac{\text{max_operational_time} - a_{\text{max_operational_time}}}{b_{\text{max_operational_time}}}} \cdot e^{-e^{-\frac{\text{max_operational_time} - a_{\text{max_operational_time}}}{b_{\text{max_operational_time}}}}}$$

Средневзвешенное значение прогнозируемых значений длительности функционирования КА данной группировки до возникновения сбоев:

$$m_{\text{project_operational_time}} := \int_0^{\infty} \text{project_operational_time} \cdot \left[\frac{1}{b_{\text{project_operational_time}}} \cdot e^{-\frac{\text{project_operational_time} - a_{\text{project_operational_time}}}{b_{\text{project_operational_time}}}} \cdot e^{-e^{-\frac{\text{project_operational_time} - a_{\text{project_operational_time}}}{b_{\text{project_operational_time}}}}} \right] d\text{project_operational_time}$$

$m_{\text{project_operational_time}} = 7.507$

Средневзвешенное значение, m , максимально достигнутых значений функционирования КА данной группировки до возникновения сбоев (годы):

$$m_{\text{max_operational_time}} := \int_0^{\infty} \text{max_operational_time} \cdot \left[\frac{1}{b_{\text{max_operational_time}}} \cdot e^{-\frac{\text{max_operational_time} - a_{\text{max_operational_time}}}{b_{\text{max_operational_time}}}} \cdot e^{-e^{-\frac{\text{max_operational_time} - a_{\text{max_operational_time}}}{b_{\text{max_operational_time}}}}} \right] d\text{max_operational_time}$$

$m_{\text{max_operational_time}} = 4.153$

Расчёт дисперсии D и среднеквадратичного отклонения d максимально достигнутых значений функционирования КА данной группировки до возникновения сбоев (годы):

$$D_{\max_operational_time} := \int_0^{\infty} (max_operational_time - m_max_o) \cdot d_D_max_operational_time = 2.112 \cdot e^{-e} \cdot b_{max_operational_time} \cdot d_{max_operational_time}$$

$$d_D_max_operational_time := \sqrt{D_max_operational_time} \cdot \frac{-(max_operational_time - a_{max_operational_time})}{b_{max_operational_time}}$$

Визуализация расчётов:



Наименование признака	Наиболее вероятное значение, годы	Средневзвешенное значение, годы
<u>Прогнозируемая длительность функционирования КА</u>	5,4	7,507 ± 4,747
<u>Достигнутые максимальные значения</u>	3,2	4,153

Листинг 1. Сравнительный анализ расчётной и максимальной длительности функционирования КА по данным [Ошибка! Залкадка не определена.].

Выделение нерешенных научно-технических задач. Основной практически важной задачей является поиск технологических решений для увеличения длительности функционирования БРЭА КА.

Целью настоящей работы является расчётное прогнозирование увеличения сложности БРЭА при сохранении существующего уровня радиационной стойкости элементной компонентной базы (ЭКБ).

Изложение основного материала. Длительность функционирования КА увеличивают, в том числе, путём многократного резервирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). При существующем технологическом уровне ЭКБ (≈ 45% отказов оборудования КА связаны с низким качеством элек-

тродорадиоизделий (ЭРИ), прежде всего, их радиационной стойкости. Работоспособность большинства находящихся на *геостационарной орбите* (ГСО) КА поддерживается за счет значительной *избыточности* ЭКБ БРЭА [7]. При высокой функциональной и аппаратной сложности электронных систем КА, оцениваемой количеством (тыс. шт.) применяемых в них комплектующих ЭРИ, для прогнозирования количества ЭРИ на КА используем данные, приведенные в [Ошибка! Закладка не определена., с. 4]. В MathCAD вычисления организованы следующим образом (листинг 2):

Обобщённые статистические данные (год, тыс. шт. ЭРИ):

```

data_KA_complexity :=
    (1979  12
     1982  23
     1986  65
     2000  90
     2004 100
     2012 120
     2014 150)

X_complexity := data_KA_complexity<0>
Y_complexity := data_KA_complexity<1>
    
```

Модель изменения количества ЭРИ в период до 1990г.:

```

a_KA_before_1990 := 9.016411      c_KA_before_1990 := 1984.897
b_KA_before_1990 := 1120.287     d_KA_before_1990 := 95.01448

f_KA_before_1990(year) := d_KA_before_1990 +
    (a_KA_before_1990 - d_KA_before_1990) /
    (1 + (year / c_KA_before_1990)^b_KA_before_1990)
    
```

Модель изменения количества ЭРИ 2000-2015 гг.

```

A1_after_1990 := 95  A2_after_1990 := 150
LOGx0_after_1990 := 2012.33333  p_after_1990 := 0.5
    
```

$$f_KA_after_1990(year) := A1_after_1990 + \frac{A2_after_1990 - A1_after_1990}{\left[1 + 10^{(LOGx0_after_1990 - year) \cdot p_after_1990}\right]}$$

Модель изменения количества ЭРИ после 2015 г.

$$f_KA_after_2015(year) := 1.3162 \cdot 10^{-29} \cdot \exp(0.0355 \cdot year)$$

Обобщённая модель для прогнозирования:

$$KA_complexity(year) := \begin{cases} f_KA_before_1990(year) & \text{if } year \leq 2005 \\ f_KA_after_1990(year) & \text{if } year \geq 2005 \\ f_KA_after_2015(year) & \text{if } year \geq 2015 \end{cases}$$

Листинг 2. Организация вычисления количества ЭРИ на КА.

Результаты расчётов проведены на рис. 3:

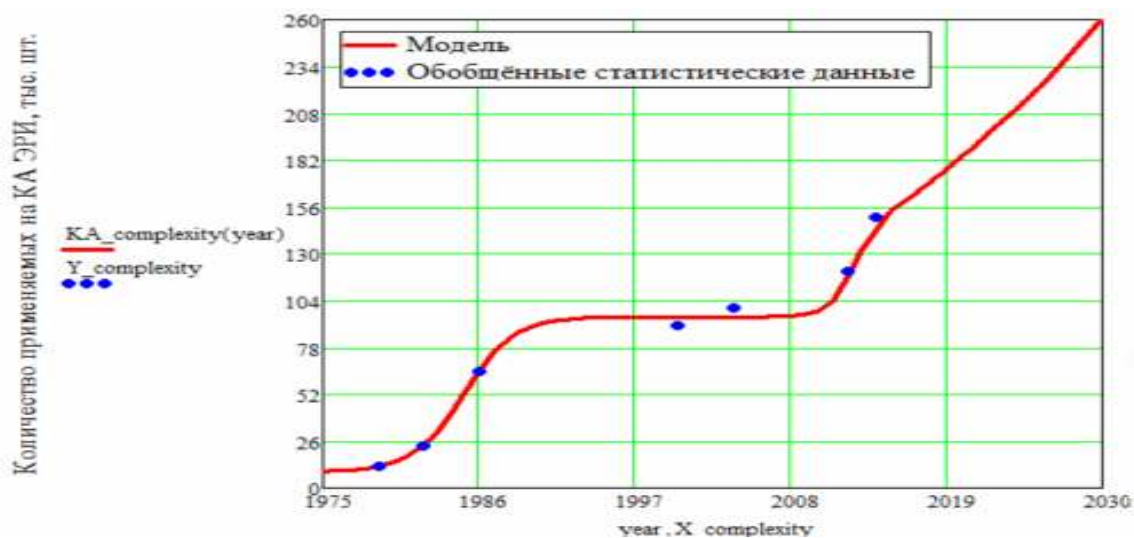


Рисунок 3 - Прогноз роста количества ЭРИ на КА связи

Быстрое увеличение сложности БРЭА приводит к негативным последствиям с точки зрения обеспечения надёжности КА [8]. Вероятность безотказной работы $P(t_q, \tau_1)$ в системе в интервале времени $(t_q, t_q + \tau_1, \tau_1 = t_{q+1} - t_q)$ равна

$$P(t_q, \tau_1) = \exp \left[- \int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \sum_{i=k,m,n} \Lambda_i(\tau) \cdot d\tau \right]$$

$\Lambda_i(\tau)$ - интенсивность отказов, связанных со спецификой конструкции элементов компонентной базы (например, деградация h_{21E} транзисторов ИС ($i = k$), либо в результате параметрических отказов элементов (например, уровня логических сигналов (U_{OL}) элементов ($i=m$), либо по причинам, обусловленным действием факторов космического пространства (галактические космические лучи, протоны солнечного ветра) или плазмы, окружающей КА ($i=n$).

Увеличение сложности БРЭА КА приводит к уменьшению вероятности её безотказной работы, а увеличение радиационной стойкости ЭКБ позволит отказаться от избыточного резервирования.

Выводы из проведенного исследования и перспективы дальнейшего поиска. Необходимо внедрение в технологию БРЭА КА эффективных технологий увеличения радиационной стойкости активных при структур ИС. В частности, показана возможность замедления радиационной деградации h_{21E} тестовых при структур ИС с диэлектрической изоляцией, изготовленных на основе монокристаллов кремния, легированных германием(CZ-Si<P,Ge>)[9].

REFERENCES

1. Morozova Ye.I. Radiatsionnyye faktory riska dlya kosmicheskikh apparatov. / Ye.I. Morozova, I.P. Bezrodnykh V.T. Semenov Voprosy elektromekhaniki. T. 112. 2009. S. 35-40.
2. Mazur J. E. An Overview of the Space Radiation Environment. Crosslink. The Aerospace Corporation Magazine of advances in aerospace technology. Summer 2003. Vol. 4 No. 2, pp. 12 – 16.
3. Sevast'yanov N.N. Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi srokami ekspluatatsii / N.N.Sevast'yanov, A.I. Andreyev. pod obshch. red. N.N. Sevast'yanova. – Tomsk: Izdatel'skiy Dom TGU, 2015. – 266 s. Radiatsionnyye efekty v kosmose. Chast' 3. Vliyaniye ioniziruyushchego izlucheniya na izdeliya elektronnoy tekhniki / I. P. Bezrodnykh, A. P. Tyutnev,
4. V. T. Semonov. – М.: АО «Корпорация «VNIIEМ», 2017. – 64 s.
5. Welling D. T.. The long-term effects of space weather on satellite operations. Ann. Geophys., 28, 1361–1367, 2010. www.ann-geophys.net/28/1361/2010/
doi:10.5194/angeo-28-1361-2010

6. Orazbayev B.B. Teoriya i metody sistemnogo analiza: uchebnoye posobiye. / B.B. Orazbayev, L.T. Kurmangaziyeva, SH.K. Kodanova. – M.: Izdatel'skiy dom Akademii Yestestvoznaniya, 2017. – 248
7. Akhmetov R. N. Osobennosti upravleniya zhivuchest'yu kosmicheskikh apparatov monitoringa Zemli / R. N. Akhmetov, V. P. Makarov, A. V. Sollogub Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta 4 (35) 2012 g. S. 18-28.
8. Zelenskiy A.V. Nadezhnost' slozhnykh elektronnykh sistem spetsial'nogo naznacheniya: elektron, ucheb. posobiye / A. V. Zelenskiy, B. A. Zelenskiy; Minobrnauki Rossii. Samar. gos. aerokosm. un-t im. C.P. Koroleva (nats. issled. un-t). Samara 2012. [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: <http://rtfmoodle.ssau.ru>
9. Bytkin S.V. T.V. Kritskaya. Modelirovaniye degradatsii h21E testovykh npnstruktur, izgotovlennykh na kremnii, legirovannom germaniyem, v vychislitel'noy srede OriginPRO / S.V. Bytkin, T.V. Kritskaya. Materialy II mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (12-13 noyabrya 2020-go goda) «Aktual'nyye voprosy prikladnoy fiziki i energetiki». Sumgait'skiy gosudarstvennyy universitet (Azerbaydzhan). S.117-122.

Received 28.04.2021.

Accepted 11.05.2021.

Прогнозування в середовищі mathcad зростання складності бортової апаратури космічних апаратів при недостатньої радіаційної стійкості елементної компонентної бази

Економічні причини визначають зростання вимог до термінів активного функціонування космічних апаратів. Необхідно забезпечення терміну їх експлуатації на геостаціонарній орбіті ≥ 15 років, при реально досягаємому ≤ 8 . Забезпечення тривалих термінів активного функціонування обмежуються недостатньою радіаційною стійкістю електронної компонентної бази. На прикладі угруповання Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES), що складається з 8 супутників, показано, що тривалість роботи апаратів моніторингу навколишнього середовища в умовах протонного і електронного опромінення істотно нижча за очікувану. Основним практично важливим завданням є пошук технологічних рішень для збільшення тривалості функціонування бортовий радіоелектронної апаратури космічних апаратів (БРЕА).

Метою цієї роботи є розрахункове прогнозування збільшення складності БРЕА при збереженні існуючого рівня радіаційної стійкості елементної компонентної бази.

У середовищі MathCAD проведено моделювання і прогнозування ускладнення бортовий радіоелектронної апаратури космічних апаратів, що пов'язується з недостатньою радіаційною стійкістю елементної компонентної бази. Пропонується впровадження в технологію виготовлення бортової радіоелектронної апаратури ефективних технологій збільшення радіаційної стійкості активних при структур ІС на основі монокристалів кремнію, легованих германієм (CZ-Si <P, Ge>).

Forecasting in the mathcad environment of the increasing complexity of the on-board equipment of space vehicles with insufficient radiation resistance of the elementary component base

Economic reasons determine the growth of requirements for the terms of active operation of spacecraft. It is necessary to ensure their service life in the geostationary orbit ≥ 15 years, with the actually attainable ≤ 8 . Provision of long periods of active functioning is limited by insufficient radiation resistance of the electronic component base. Using the example of the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) constellation, which consists of 8 satellites, it is shown that the duration of operation of environmental monitoring devices under conditions of proton and electron irradiation is significantly lower than expected.

The main practically important task is the search for technological solutions to increase the duration of the operation of the onboard radio electronic equipment of spacecraft (BREA).

In the MathCAD environment, modeling and forecasting of the complication of the on-board radio-electronic equipment of space vehicles was carried out, which is associated with insufficient radiation resistance of the elementary component base. It is proposed to introduce effective technologies for increasing the radiation resistance of active npn IC structures based on silicon single crystals doped with germanium (CZ-Si <P, Ge>) into the technology of manufacturing on-board electronic equipment.

Биткін Сергій Віталійович – к.т.н., доцент, здобувач, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, м Запоріжжя, Україна.

Критська Тетяна Володимирівна – д.т.н., професор, завідувачка кафедри мікроелектронних і електронних інформаційних систем, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, м Запоріжжя, Україна.

Быткин Сергей Витальевич – к.т.н., доцент, соискатель, Инженерный учебно-научный институт Запорожского национального университета, г. Запорожье.

Критская Татьяна Владимировна – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой микроэлектронных и электронных информационных систем, Инженерный учебно-научный институт Запорожского национального университета, г. Запорожье.

Bytkin Sergey Vital'evich - Cand.Tech.Sci., AssociateProf., Applicant, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporozhye National University, Zaporozhye.

Kritskaya Tatyana Vladimirovna - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Microelectronic and Electronic Information Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporozhye National University, Zaporozhye.