

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-423-431>

УДК 621.311.22

## **Контроль достоверности измерений в энергосистемах по первым приращениям и на основе экстраполирующих фильтров**

**В. А. Анищенко<sup>1)</sup>, Т. В. Писарук<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Надежность эксплуатации энергетических систем определяется как надежностью силового оборудования, так и достоверностью измерительной информации, характеризующей состояние энергооборудования и протекающие в нем технологические процессы генерации, передачи, распределения и потребления энергии. Недостоверная информация приводит к ошибкам диагностики неисправностей оборудования, неправильной работе систем управления технологическими процессами и снижению эксплуатационных технико-экономических показателей энергосистем. Наряду с методами аппаратного контроля достоверности измерений, использующих цифровые коды, известны методы программно-логического контроля, основанные на технологическом смысле измеряемых данных, их логической непротиворечивости и согласованности. Часто применяется контроль достоверности измерений по предельным значениям, когда результат измерения переменной сравнивается с ее известными верхней и нижней границами достоверных значений. Разрешающая способность контроля по предельным значениям резко снижается с расширением диапазона достоверных значений. В статье рассматривается контроль достоверности, основанный на анализе скорости изменения контролируемых переменных. При контроле по первым приращениям сравнивается первое приращение, т. е. разность результатов измерений в текущий и предшествующий ему моменты времени, с известным диапазоном первых приращений достоверных результатов измерений. Контроль по первым приращениям наиболее эффективен в случаях, когда контролируемые технологические процессы достаточно инерционны и скорости изменения переменных относительно небольшие. Разрешающая способность контроля по первым приращениям может быть повышена за счет применения экстраполирующих фильтров. В этом случае сравнивается текущее измеренное значение переменной с ее экстраполированным в предыдущий момент времени значением и по результату сравнения выявляется недостоверный результат измерения.

**Ключевые слова:** энергосистема, измерительная информация, контроль достоверности, разрешающая способность контроля, экстраполирующий фильтр

**Для цитирования:** Анищенко, В. А. Контроль достоверности измерений в энергосистемах по первым приращениям и на основе экстраполирующих фильтров / В. А. Анищенко, Т. В. Писарук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 5. С. 423–431. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-423-431>

---

### **Адрес для переписки**

Анищенко Вадим Андреевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-65-52  
[epp@bntu.by](mailto:epp@bntu.by)

### **Address for correspondence**

Anishchenko Vadim A.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-65-52  
[epp@bntu.by](mailto:epp@bntu.by)

---

## Control of Reliability of Measurements in Power Systems According to the First Increment and on the Basis of Extrapolating Filters

V. A. Anishchenko<sup>1)</sup>, T. V. Pisaruk<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Reliability of operation of power systems is determined by reliability of the power equipment, and reliability of the measuring information characterizing a condition of power equipment and the technological processes of generation, transfer, distribution and consumption of energy proceeding in it. Unreliable information causes errors in the diagnosis of equipment malfunctions, improper operation of process control systems and reduction the operational technical and economic performance of power systems. Along with the methods of hardware control of the reliability of measurements using digital codes, there are methods of software and logic control based on the technological meaning of the measured data, their logical consistency and consistency. Control of reliability of measurements by limit values is often applied when the result of measurement of a variable is compared with its known upper and lower limits of reliable values. The resolution of the control by limit values is sharply decreased with the expansion of the range of reliable values. The article deals with the reliability control based on the analysis of the rate of alteration of the controlled variables. At control in accordance with the first increments, the first increment, i.e. the difference of results of measurements in the current and previous moments of time is compared with the known range of the first increments of reliable results of measurements. Control in accordance with the first increments is most effective in cases where the controlled processes are sufficiently inertial and the rate of alteration of variables is relatively small. The resolution of the control by the first increment can be enhanced through the use of extrapolation filters. In this case, the current measured value of the variable is compared with its extrapolated value at the previous time and the result of the comparison reveals an incorrect measurement result.

**Keywords:** power system, measurement information, monitoring accuracy, resolution of the control, extrapolating filter

**For citation:** Anishchenko V. A., Pisaruk T. V. (2018) Control of Reliability of Measurements in Power Systems According to the First Increment and on the Basis of Extrapolating Filters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (5) 423–431. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-423-431> (in Russian)

### Введение

Наибольшее применение в энергетике получил программно-логический контроль достоверности измерений по методу предельных значений (уставок), учитывающий технологический смысл контролируемых переменных. В соответствии с этим методом достоверным принимается результат измерения, попадающий в диапазон между верхней и нижней границами допустимых в нормальных режимах работы значений переменных. Основной недостаток метода состоит в низкой разрешающей способности в случае широкого диапазона допустимых значений. Максимальная возможная не обнаруженная погрешность измерения при таком контроле равна разности верхней и нижней границ допустимых значений переменных [1, 2].

Если скорости изменения достоверных результатов измерений переменных относительно невелики, более эффективным может оказаться контроль

по первым приращениям, т. е. разности измерений в текущий и предшествующий ему моменты времени. Грубая погрешность измерения определяется в этом случае сравнением измеряемого первого приращения с диапазоном приращений, соответствующим достоверным измерениям [3, 4].

Разрешающая способность контроля, основанного на анализе скоростей изменения переменных, может быть повышена с помощью фильтра, экстраполирующего значения переменной в текущий момент времени по результатам ее измерений в предыдущие моменты. При таком подходе недостоверные измерения выявляются сравнением разности измеренного и экстраполированного значений переменной с диапазоном допустимых первых приращений [5].

### **Контроль достоверности измерений по первым приращениям контролируемой переменной**

Условие достоверности по первым приращениям имеет вид

$$\Delta x(t) = |x(t) - x(t-h)| \leq \gamma(t), \quad (1)$$

где  $\Delta x(t)$  – первое приращение переменной;  $x(t)$  – результат измерения переменной в текущий момент времени  $t$ ;  $x(t-h)$  – то же в предыдущий момент времени  $t-h$ ;  $h$  – интервал времени дискретизации, соответствующий частоте опроса измерений;  $\gamma(t)$  – граница принятия решения, определяющая допустимый диапазон  $[0, \gamma(t)]$  первых приращений при отсутствии грубых погрешностей измерений.

Контроль по первым приращениям, как и по предельным значениям, сводится к решению дихотомической задачи допускового контроля [6, 7]. Результаты измерения первого приращения разделяют на два класса: достоверные  $\Delta x_1(t)$  и недостоверные  $\Delta x_2(t)$ . Признаком распознавания этих приращений является граница принятия решения  $\gamma(t)$ .

Под достоверным понимается первое приращение

$$\Delta x_1(t) = \Delta x(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где  $\Delta x(t)$  – неизвестное истинное первое приращение;  $\varepsilon(t)$  – случайная погрешность измерения первого приращения, соответствующая априорной (паспортной) точности измерительного прибора.

Недостоверное первое приращение

$$\Delta x_2(t) = \Delta x(t) + \varepsilon(t) + n(t), \quad (3)$$

где  $n(t)$  – грубая погрешность первого приращения, превышающая априорную точность измерительного прибора.

Исходя из наиболее вероятного предположения о нормальном законе распределения результатов измерений  $x(t)$  и  $x(t-h)$ , полагаем распределение достоверного первого приращения также нормальным

$$f[\Delta x_1(t)] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{[\Delta x_1(t)]^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение достоверного первого приращения от нулевого среднего значения, определяемое путем статистической обработки ретроспективной информации о скоростях изменения контролируемого процесса.

Распределение грубых погрешностей измерений переменной с учетом их предварительной отбраковки по правилу «трех сигм» принимаем равномерным

$$f(n) = (12\sigma)^{-1}. \quad (5)$$

Тогда распределение недостоверного первого приращения [8]

$$f[\Delta x_2(t)] = \frac{1}{12\sigma} \left[ \Phi_0\left(\frac{3\sigma - \gamma}{\sigma}\right) + \Phi_0\left(\frac{3\sigma + \gamma}{\sigma}\right) \right], \quad (6)$$

где  $\Phi_0\left(\frac{3\sigma - \gamma}{\sigma}\right)$ ,  $\Phi_0\left(\frac{3\sigma + \gamma}{\sigma}\right)$  – нормированные функции Лапласа.

С учетом случайной природы погрешностей измерений и первого достоверного приращения переменной можно представить границу принятия решения следующим образом:

$$\gamma(t) = k\sigma, \quad (7)$$

где  $k$  – квантиль, определяющий степень усечения нормального распределения переменной.

Разрешающая способность контроля достоверности представляет компромисс между ошибочным решением о недостоверности измерения (ложной тревогой) и пропуском действительно имеющей место грубой погрешности. Эта задача может быть решена на основе теории статистических решений. Искомый компромисс достигается оптимизацией границы принятия решения и соответственно величины квантиля  $k$  по критерию Байеса [6, 7]

$$C_{\text{ср}} = (1 - q)C_{\text{лт}}F_{\text{лт}} + qC_{\text{пр}}F_{\text{пр}} = \min, \quad (8)$$

где  $C_{\text{ср}}$  – средняя цена многократного распознавания недостоверного измерения;  $q$  – априорная вероятность грубой погрешности измерения;  $F_{\text{лт}}$  – вероятность ложной тревоги (ошибки 1-го рода);  $F_{\text{пр}}$  – вероятность пропуска грубой погрешности (ошибки 2-го рода);  $C_{\text{лт}}$  – цена ложной тревоги;  $C_{\text{пр}}$  – цена пропуска грубой погрешности.

Вероятности  $F_{\text{лт}}$  и  $F_{\text{пр}}$  определяются по формулам:

$$F_{\text{лт}} = 2 \int_{\gamma}^{3\sigma} f[\Delta x_1(t)] dx. \quad (9)$$

$$F_{\text{пр}} = 2 \int_0^{\gamma} f[\Delta x_2(t)] dx. \quad (10)$$

При неполной или неточной информации о значениях  $q$ ,  $C_{\text{лт}}$ ,  $C_{\text{пр}}$  оптимальная граница  $\gamma$  может быть найдена по критерию минимакса [6, 7, 9]

$$C = (1 - q)C_{\text{лт}}F_{\text{лт}} + qC_{\text{пр}}F_{\text{пр}} = \min \max; \quad q = \text{var}; \quad C_{\text{пр}} / C_{\text{лт}} = \text{var}. \quad (11)$$

Целесообразно производить контроль достоверности одновременно методом предельных значений и по первым приращениям. Оба метода дополняют друг друга. При широком диапазоне допустимых значений переменной разрешающая способность контроля по предельным значениям низкая, и в этом случае может оказаться более эффективным контроль по первым приращениям, если предполагаемая скорость изменения переменной относительно невелика.

### Контроль достоверности измерений на основе экстраполирующих фильтров

Максимально возможные амплитуды неопознанных грубых погрешностей измерений определяются диапазоном значений контролируемой переменной, соответствующим естественному разбросу их достоверных первых приращений. Фильтры, экстраполирующие переменные, дают возможность повысить разрешающую способность контроля достоверности по сравнению с методом первых приращений [5, 10]. Условие достоверности измерений с использованием экстраполирующего фильтра имеет вид

$$\Delta x_3(t) = |x(t) - x_3(t)| \leq \gamma(t), \quad (12)$$

где  $\Delta x_3(t)$  – погрешность экстраполяции, определяемая как разность измерения переменной в текущий момент времени  $x(t)$  и ее экстраполированного значения  $x_3(t)$ ;  $\gamma(t)$  – граница принятия решения о достоверности измерений.

Постановку задачи экстраполяции значений контролируемой переменной поясняет рис. 1.

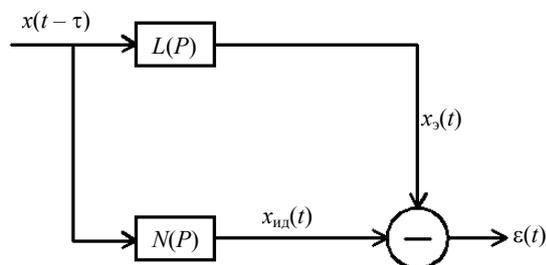


Рис. 1. Схема экстраполяции контролируемой переменной

Fig. 1. Scheme of extrapolation of the controlled variable

Строгое решение задачи синтеза оптимального экстраполирующего фильтра по методу Винера – Колмогорова состоит в определении его физически реализуемой передаточной функции  $L(P)$  по критерию минимума дисперсии среднеквадратической погрешности  $\varepsilon(t)$  между идеальной оценкой экстраполированного значения переменной  $x_{ид}(t)$  на выходе физически нереализуемого идеального фильтра  $N(P) = \exp(P\tau)$ , где  $\tau$  – интервал экстраполяции, и физически реализуемой оценкой  $x_3(t)$  на выходе фильтра экстраполяции  $L(P)$  [11]. Для этого необходимо знать спектральную плотность или автокорреляционную функцию случайных колебаний контролируемой переменной.

Если отсутствует достоверная информация о вероятностных характеристиках переменной, возможен упрощенный подход, обеспечивающий достаточную точность экстраполяции для решения задачи контроля достоверности. Предполагается, что процесс изменений переменной дифференцируем и выбрана структура экстраполирующего фильтра, состоящая из усилительного с коэффициентом  $k_0$  и дифференцирующего с коэффициентом  $k$  звеньев [5, 12]:

$$L(P) = k_0 + kP. \quad (13)$$

На выходе фильтра формируется экстраполированное значение переменной в текущий момент времени  $t$  по результатам измерений в предыдущие моменты времени

$$x_3(t) = k_0 x(t - \tau) + k[x(t - \tau) - x(t - \tau - h)], \quad (14)$$

где  $x(t - \tau)$ ,  $x(t - \tau - h)$  – измеренное значение переменной в момент времени  $t - \tau$  и  $t - \tau - h$ .

При экстраполяции на короткие интервалы времени  $\tau$  можно принять коэффициент  $k_0$  усилительного звена равным единице, тогда точность экстраполяции будет зависеть только от коэффициента  $k$  при первом приращении. Выбрав характерную реализацию случайного процесса изменений исследуемой переменной и полагая вероятностные характеристики процесса стабильными, можно путем перебора значений коэффициента  $k$  найти оптимальное значение  $k_{опт}$ , обеспечивающее наибольшую точность экстраполяции по критерию минимума дисперсии рассогласования (12) измеренного и экстраполированного значений переменной в один и тот же момент времени:

$$D[\Delta x_3(t)] = D[x(t) - x_3(t)] = \min. \quad (15)$$

Рассмотренный метод контроля достоверности был опробован на примере резкопеременной нагрузки промышленного предприятия. Результаты оптимизации коэффициента  $k$  при первом приращении измеряемых значений переменной приведены на рис. 2. В расчетах принимали интервал

экстраполяции  $\tau = 2$  мин, равный интервалу времени дискретизации  $h$ . При  $k = 0$  имеем наивную экстраполяцию по правилу «без изменений».

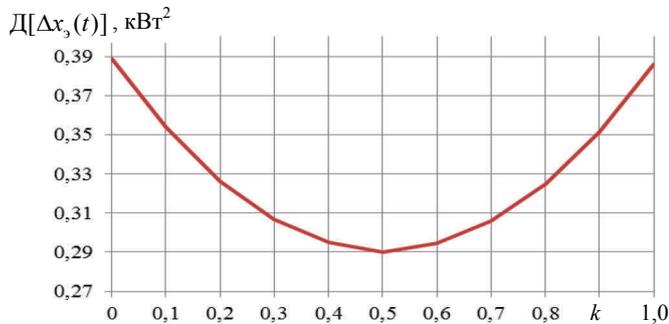


Рис. 2. Погрешность экстраполяции в зависимости от коэффициента  $k$  при первом приращении переменной

Fig. 2. Extrapolation error depending on the coefficient  $k$  at the first increment of the variable

Сопоставление контроля достоверности по первым приращениям согласно условию (1) и на основе экстраполяции согласно условию (12) показывает, что при небольших интервалах экстраполяции, когда  $k_0 \approx 1$ , контроль по первым приращениям представляет частный случай контроля на основе экстраполяции по правилу «без изменений».

Фрагмент случайного процесса изменений нагрузки ее экстраполированных с интервалом  $\tau = 2$  мин по формуле (14) значений с оптимальным коэффициентом  $k_{\text{опт}} = 0,5$  и  $k = 0$  (наивная экстраполяция) представлен на рис. 3.

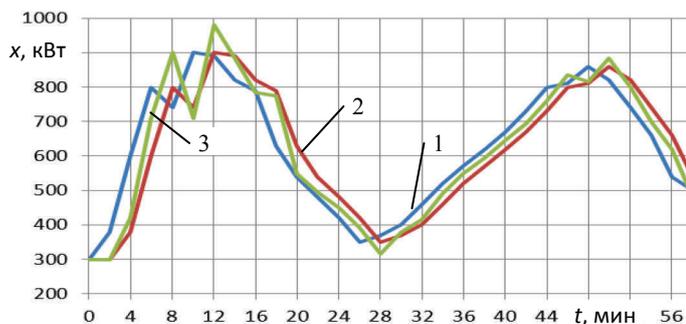


Рис. 3. Измеренная (1) и экстраполированная нагрузка:  
2 – экстраполяция по правилу «без изменений»; 3 – оптимальная экстраполяция

Fig. 3. Measured (1) and extrapolated load:  
2-extrapolation according to the “no alteration” rule; 3 – optimal extrapolation

Переход от контроля достоверности по первым приращениям к контролю с помощью оптимальных экстраполирующих фильтров увеличивает вероятность обнаружения недостоверных измерений. Количественно этот эффект можно оценить повышением разрешающей способности (РС) контроля

$$\Delta PC = \frac{D_n - D_{opt}}{D_n} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где  $D_n$  – дисперсия погрешности наивной экстраполяции;  $D_{opt}$  – то же экстраполяции с оптимальным коэффициентом  $k_{opt}$ .

В рассматриваемом иллюстративном примере, исходя из результатов оптимизации коэффициента  $k$ , представленных на рис. 2, получаем  $\Delta PC = 25 \%$ .

Влияние границы принятия решения о достоверности  $\gamma(t)$  показано на рис. 4. Параметр  $r$  определяет долю выявленных недостоверных измерений  $N_1$ , когда  $\Delta x_3(t) > \gamma(t)$ , от общего числа измерений  $N$

$$r = \frac{N_1}{N} \cdot 100 \%. \quad (17)$$

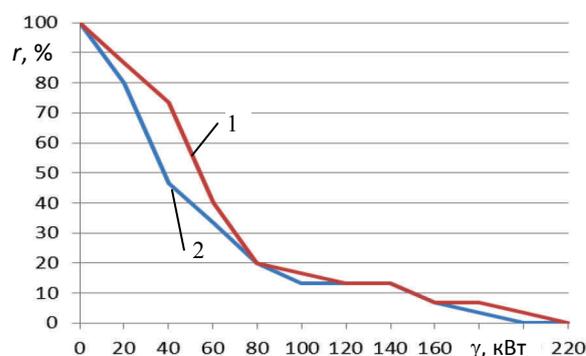


Рис. 4. Доля выявленных недостоверных измерений в зависимости от границы принятия решения: 1 – оптимальная экстраполяция ( $k_{opt} = 0,5$ ); 2 – наивная экстраполяция ( $k_{opt} = 0$ )

Fig. 4. The fraction of detected unreliable measurements depending on the decision-making bound: 1 – optimal extrapolation ( $k_{opt} = 0.5$ ); 2 – naive extrapolation ( $k_{opt} = 0$ )

## ВЫВОДЫ

1. Эффективность программно-логического контроля достоверности измеряемых технологических переменных можно повысить за счет использования данных о скоростях изменений переменных в нормальных режимах работы.

2. Контроль достоверности измерений по первым приращениям их значений можно производить на основе теории статистических решений по критериям Байеса и минимакса.

3. Обосновано использование экстраполирующих фильтров для повышения разрешающей способности контроля достоверности измерений по первым приращениям.

4. Контроль достоверности измерений по первым приращениям можно рассматривать как частный случай контроля с использованием наивной экстраполяции по правилу «без изменений».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаракшанэ, А. С. Сложные системы / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов, В. А. Ивницкий. М.: Высш. шк., 1977. 248 с.
  2. Мамиконов, А. Г. Достоверность, защита и резервирование информации в АСУ / А. Г. Мамиконов, В. В. Кульба, А. Б. Шелков. М.: Энергоатомиздат, 1986. 304 с.
  3. Зингер, И. С. Обеспечение достоверности данных в автоматизированных системах управления производством / И. С. Зингер, Б. С. Куцык. М.: Наука, 1974. 298 с.
  4. Ицкович, Э. Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин / Э. Л. Ицкович. М.: Энергия, 1975. 416 с.
  5. Анищенко, В. А. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В. А. Анищенко. Минск: БГПА, 2000. 128 с.
  6. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
  7. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. М.: Высш. шк., 1984. 208 с.
  8. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. М.: Наука, 1969. 512 с.
  9. Анищенко, В. А. Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям / В. А. Анищенко, Т. В. Писарук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 407–416. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416>.
  10. Анищенко, В. А. Контроль достоверности измерений в энергетических системах на основе теории статистических решений / В. А. Анищенко // Энергетика. Изд. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2003. № 6. С. 5–15.
  11. Свешников, А. А. прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. М.: Наука, 1968. 464 с.
  12. Анищенко, В. А. Контроль достоверности измерений параметров энергетических объектов на основе экстраполирующих фильтров / В. А. Анищенко // Энергетика. Известия высших учебных заведений. 1990. № 8. С. 49–52.
- Поступила 30.04.2018 Подписана в печать 18.06.2018 Опубликована онлайн 28.09.2018

## REFERENCES

1. Sharakshane A. S., Zheleznov I. G., Ivnickii V. A. (1977) *Complex Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 248 (in Russian).
2. Mamikonov A. G., Kul'ba V. V., Shelkov A. B. (1986) *Reliability, Protection and Reservation of Information in ACS*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 304 (in Russian).
3. Zinger I. S., Kutsyk B. S. (1974) *Ensuring Data Reliability in Automated Production Management Systems*. Moscow, Nauka Publ. 298 (in Russian).
4. Itskovich E. L. (1975) *Production Control Using Computers*. Moscow, Energiya Publ. 416 (in Russian).
5. Anishchenko V. A. (2000) *Reliability of Measurement Information in Power Supply Systems*. Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy. 128 (in Russian).
6. Birger I. A. (1978) *Engineering Diagnostics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
7. Gorelik A. L., Skripkin V. A. (1984) *Methods of Recognition*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 208 (in Russian).
8. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskii I. V. (1969) *Course in Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications*. Moscow, Nauka Publ. 512 (in Russian).
9. Anishchenko V. A., Pisaruk T. V. (2017) The Effectiveness of Validation Measurements in Automated Systems of the Power Supply Systems Control in Accordance with Limit Values. *Energetika Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 407–416 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416>.
10. Anishchenko V. A. (2003) Monitoring of Measurement Reliability in Power Systems on the Basis of Statistical Decision Theory. *Energetika Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 5–15 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-6-5-15>.
11. Sveshnikov A. A. (1968) *Applied Methods of Random Function Theory*. Moscow, Nauka Publ., 464 (in Russian).
12. Anishchenko V. A. (1990) Monitoring of Control of reliability of Measurements of Parameters of Power Objects on the Basis of Extrapolating Filters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Energetika [Proceedings of CIS Higher Education Institutions. Energetika]*, (8), 49–52 (in Russian).