

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТОЧНЫХ ВОД ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

В.Н. Клячкин, К.С. Ширкунова, А.Д. Барт

Ульяновский государственный технический университет

Предложена методика анализа стабильности химического состава сточных вод при производстве печатных плат с помощью статистических методов контроля процессов. Оценивается коррелированность и нормальность распределения контролируемых показателей. Выбираются типы контрольных карт, обеспечивающие контроль как среднего уровня процесса, так и его рассеяния. Для контроля стабильности независимых показателей используются карты Шухарта. Мониторинг коррелированных показателей проводится с помощью карты Хотеллинга. При необходимости контроля многомерного рассеяния процесса могут быть использованы карты обобщенной дисперсии. Предлагаемый подход обеспечивает выявление нарушений процесса до того, как контролируемые показатели вышли за допустимые пределы.

Ключевые слова: печатные платы, сточные воды, статистический контроль процессов, карты Шухарта, карта Хотеллинга, обобщенная дисперсия

Analysis of the Stability of the Chemical Composition of Wastewater in the Production of Printed Circuit Boards

V.N. Klyachkin, K.S. Shirkunova, A.D. Bart

Ulyanovsk State Technical University, 432027 Ulyanovsk, Russia

A method for analyzing the stability of the chemical composition of wastewater in the manufacture of printed circuit boards using statistical methods of process control is proposed. The correlation and normal distribution of the monitored indicators is evaluated. Types of control charts are selected that provide control of both the average level of the process and its dispersion. To control the stability of independent indicators, Shewhart charts are used. Monitoring of correlated indicators is carried out using the Hotelling control chart. If it is necessary to control the multidimensional dispersion of the process, generalized variance charts can be used. The proposed approach ensures the detection of process violations before the monitored indicators are out of tolerance.

Keywords: printed circuit boards, wastewater, statistical process control, Shewhart charts, Hotelling control chart, generalized dispersion, statistical process control, generalized variance

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-05-47-51

Основными источниками загрязнения водоемов являются недостаточно очищенные сточные воды предприятий. Производство печатных плат наносит серьезный ущерб окружающей среде из-за наличия ионов тяжелых металлов. При этом анализ уровня загрязненности сточных вод является дорогостоящим и требует специально обученного персонала [1, 2].

Цель работы — разработка методики контроля загрязнен-

ности сточных вод при производстве печатных плат путем анализа стабильности химического состава элементов, попадающих в воду.

Предприятие-производитель печатных плат анализирует данные по кислотно-щелочному балансу pH, содержанию в сточных водах аммиака, нитритов, фосфатов, железа и меди в мг/дм³. Измерения проводятся 2–3 раза в неделю. Для прогнозирования состояния водоема и выявления возможных наруше-

ний (выхода контролируемых показателей за допустимые нормы) могут использоваться методы анализа временных рядов [3–5], однако если задача состоит лишь в контроле стабильности состояния водоема, более эффективны методы статистического контроля процессов [6–8]. Эти методы позволяют обнаружить нарушения процесса статистическими методами до того, как произошел выброс за критические значения, и предотвратить такую ситуацию.



Рис. 1. Выбор распределения Джонсона
Fig. 1. The choice of Johnson distribution

	pH	NH4	NO2	P	Fe	Cu
1	-12.038	-10.456	-8.818	0.500	-6.795	-5.087
2	-11.989	-15.435	-8.122	0.540	-8.611	-5.031
3	-12.014	-13.146	-6.765	0.470	-6.244	-5.022
4	-12.011	-15.309	-10.092	0.450	-5.860	-5.003
5	-12.016	-13.350	-6.912	0.370	-6.001	-5.015
6	-12.004	-15.804	-9.220	0.360	-6.576	-5.024
7	-12.006	-12.509	-6.531	0.390	-6.479	-5.020
8	-11.989	-12.392	-7.097	0.360	-8.507	-5.022
9	-12.006	-12.724	-6.897	0.470	-6.544	-5.030
10	-12.036	-13.374	-6.001	0.550	-5.155	-5.019

Рис. 2. Преобразования Джонсона обеспечили нормализацию pH и содержания нитритов и железа
Fig. 2. Johnson's transformations ensured pH normalization and nitrite and iron levels

Исследование статистических свойств контролируемых показателей. При статистическом контроле многопараметрического процесса часть показателей может быть независима, а некоторые — коррелировать между собой. Для оценки взаимосвязей между показателями строится корреляционная матрица и оценивается значимость корреляций [5]. В рассматриваемом исследовании значимыми (на уровне значимости 0,05) оказались корреляции между содержанием железа и меди: коэффи-

циент корреляции составил 0,54.

Стандартные методы статистического контроля процессов ориентированы на нормально распределенные данные. Это особенно существенно тогда, когда наблюдения проводятся сравнительно редко (как в нашем исследовании) и приходится строить карты по индивидуальным наблюдениям (а не так называемым мгновенным выборкам по нескольким наблюдениям, которые "сглаживают" возможные нарушения нормальности).

Для проверки нормальности использовался критерий Шапиро-Уилка. Нормальность была подтверждена для содержания аммиака и фосфатов.

Для остальных показателей необходима процедура нормализации данных. В исследованиях были использованы преобразования Джонсона, имеющие следующий вид:

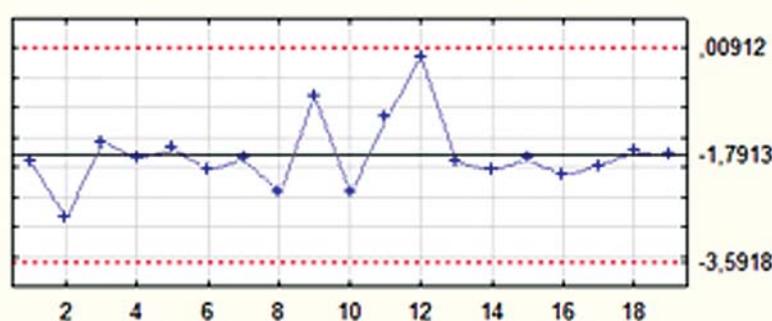
$$Y = c_1 + c_2g(X, c_3, c_4),$$

где Y — величина, имеющая стандартное нормальное распределение; c_1 и c_2 — параметры формы распределения; g — некоторая функция, зависящая от выбранного вида распределения Джонсона; X — нормализуемая случайная величина; c_3 — параметр, характеризующий центр распределения; c_4 — параметр масштаба.

В зависимости от выборочных оценок асимметрии a и эксцесса e выбирается один из трех типов распределения Джонсона (рис. 1). Условия применимости того или иного варианта распределения Джонсона можно представить в виде неравенств:

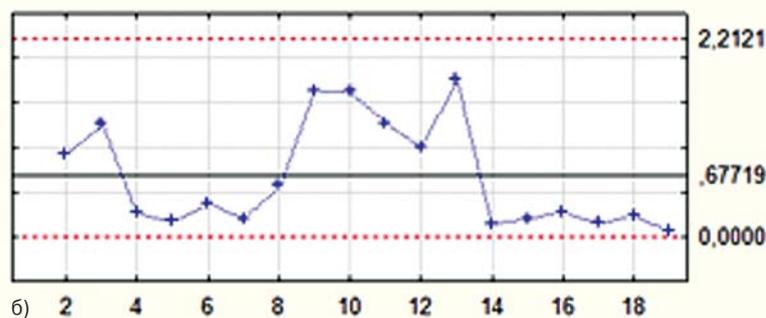
- S_L — распределение при $e \approx 1,93a^2$;
- S_B — распределение при $a^2 - 2 \leq e < 1,93a^2$;
- S_U — распределение при $e > 1,93a^2$;
- при $e < a^2 - 2$ — критическая область — подбор распределения невозможен.

При предварительном анализе результатов нормализации с помощью распределений Джонсона было выяснено, что



а)

Скользя. R: ,67719 (.67719); Сигма: ,51163 (.51163); n: 1,



б)

Рис. 3. Карты Шухарта для содержания нитритов (а, б): нарушений нет
Fig. 3. Shewhart chart for nitrite content (a, b): no violations

наилучший результат дает распределение S_{ij} . После его применения были нормализованы значения рН, а также содержание нитритов и железа. С меньшей точностью нормализовано содержание меди. На рис. 2 показаны преобразованные данные.

Контроль стабильности состава сточных вод по независимым показателям. Если данные некоррелированы и нормально распределены, то по ним строятся стандартные карты Шухарта. В случае, когда проведение измерений связано с большими затратами, используют контрольные карты индивидуальных наблюдений и скользящих размахов. При этом объем мгновенной выборки $n = 1$. На рис. 3 показан пример построения таких карт в системе Statistica [9]. Процесс стабилен по рассматриваемому показателю, точек вне контрольных границ нет.

Контроль стабильности среднего уровня процесса с использованием многомерной карты Хотеллинга. На рис. 4 показан пример построения такой карты в системе Statistica для пары коррелированных показателей о содержании железа и меди.

Из рис. 4 видно, что имеют место нарушения в наблюдениях 1-ом и 11-ом. Эти нарушения состоят в превышении значений статистики Хотеллинга (которые откладываются по вертикальной оси) критического значения (12,981), но свидетельствуют лишь о нарушении стабильности процесса. Если в процесс внести коррективы, возможно восстановление стабильности и тогда можно исключить ситуацию, при которой произойдет выход одного или обоих контролируемых показателей за допустимые пределы.

Карта Хотеллинга не показывает непосредственно, с каким из показателей (или совместным влиянием показателей) связано нарушение процесса. Интерпретация карты включает задачу выявления того показателя, по которому

именно произошло нарушение процесса.

Пусть при некотором $t = t_0$ на карте зафиксировано нарушение технологического процесса. Для проверки гипотезы о том, что ответственность за нарушение процесса лежит на j -ом показателе (или на нескольких показателях), может быть использован частный критерий Хотеллинга

$$T_j^2 = [c_j^T(y_{t_0} - \bar{y})]^2 / (c_j^T S c_j) > T_{kp}^2,$$

где c_j — вектор-столбец, состоящий из нулей во всех строках, кроме j -й, и единицы в j -й строке, y_{t_0} — вектор значений контролируемых показателей в наблюдении t_0 ; \bar{y} — вектор средних значений, S — ковариационная матрица, T_{kp}^2 — критическое значение статистики Хотеллинга.

Например, для наблюдения 1 имеем (см. рис. 4): по содержанию железа $c = (0; 1)$, $T_j^2 = 14,972$; по содержанию меди $c = (1; 0)$, $T_j^2 = 2,776$; по совместному влиянию обоих показателей $c = (1; 1)$, $T_j^2 = 7,118$. Критическое значение 12,891 превышено только в первом случае, таким образом, нарушение процесса связано с повышением содержания железа.

Еще один подход, который позволяет определить показатель, по которому произошло нарушение, — это построение карт Шухарта по каждому из показателей отдельно. Карта Хотеллинга строится обычно на уровне значимости 0,005. Можно показать, что при контроле двух показателей приблизительно эквивалентный результат для карты Шухарта может быть получен на уровне значимости 0,0025. На рис. 5 показаны соответствующие карты Шухарта для показателей железо и медь.

Построенные карты подтверждают выводы, полученные при интерпретации карты, путем применения частного критерия Хотеллинга для наблюдения 1. Одновременно видно, что в наблюдении 11 нарушение связано с влиянием обоих показателей.

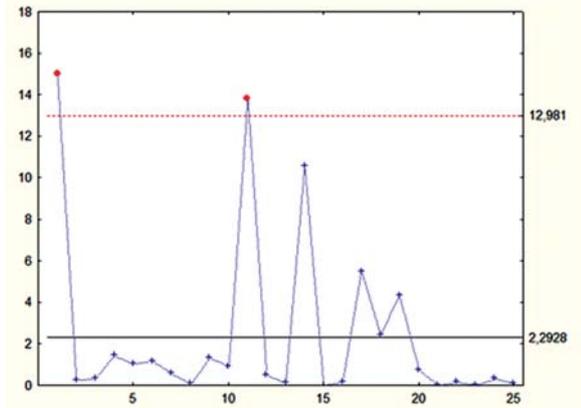


Рис. 4. Карта Хотеллинга для группы показателей железо-медь: нарушения в наблюдениях 1 и 11
Fig. 4. Hotelling chart for the iron-copper index group: violations in observations 1 and 11

Контроль стабильности по критерию многомерного рассеяния. Иногда, кроме контроля среднего уровня процесса, целесообразно проверить и стабильность рассеяния процесса. Для независимых показателей для этого используется карта размахов (в нашем исследовании — скользящих размахов) или стандартных отклонений, при многомерном контроле — карта обобщенной дисперсии. Карта обобщенной дисперсии [10, 11] является аналогом карты скользящих размахов в многомерном случае. Под обобщенной дисперсией при многомерном контроле понимается определитель ковариационной матрицы.

Пусть контролируются p коррелированных показателей: m раз снимаются показания по p показателям объема в мгновенных выборках n . На карте откладываются выборочные значения обобщенной дисперсии $|S|$ для каждой t -ой выборки. Ковариационная матрица имеет вид:

$$S_t = \begin{pmatrix} s_{11t} & s_{12t} & s_{1pt} \\ s_{21t} & s_{22t} & s_{2pt} \\ s_{p1t} & s_{p2t} & s_{ppt} \end{pmatrix}$$

Элементы этой матрицы вычисляются по формуле

$$s_{jkt} = [1/(n-1)] \sum (y_{jt} - \bar{y}_j)(y_{kt} - \bar{y}_k),$$

где \bar{y}_j и \bar{y}_k — средние значения j -го и k -го показателей соответственно.

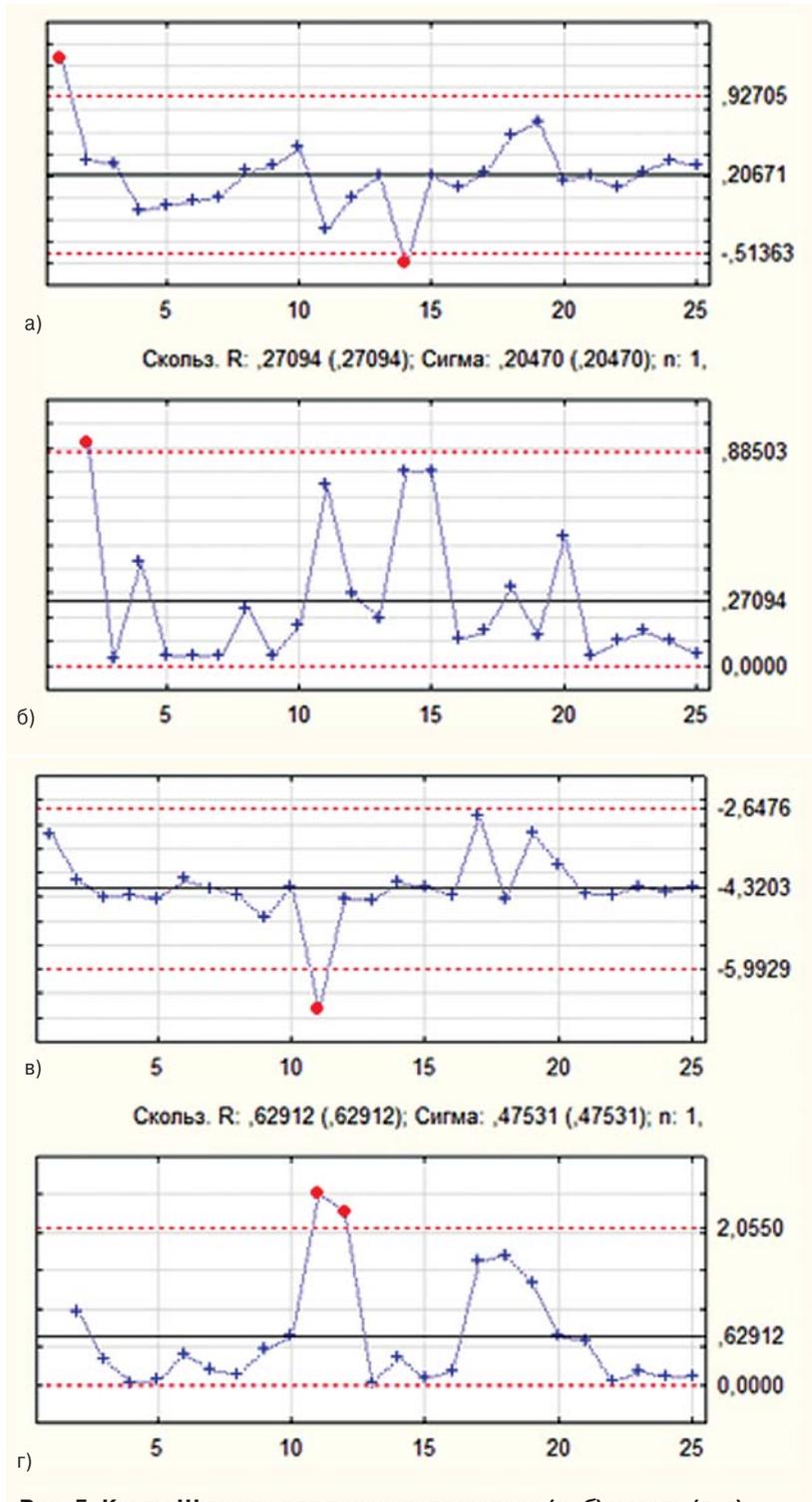


Рис. 5. Карты Шухарта для показателя железа (а, б) и медь (в, г)
 Fig. 5. Shewhart charts for iron (a, b) and copper (c, d)

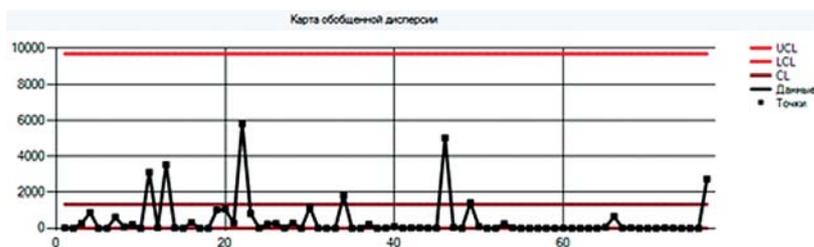


Рис. 6. Карта обобщенной дисперсии: процесс стабилен
 Fig. 6. The chart of generalized variance: the process is stable

Так же вычисляются оценки средней ковариации по всем выборкам, которые образуют ковариационную матрицу S , определитель которой используется как оценка целевой обобщенной дисперсии $|\Sigma_0|$:

$$\bar{s}_{jk} = (1/m) \sum_{i=1}^m s_{jki}$$

Средняя линия карты обобщенной дисперсии находится по формуле:

$$m_{|s|} = b_1 |\Sigma_0|$$

Верхняя и нижняя контрольные границы:

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = |\Sigma_0| (b_1 \pm 3\sqrt{b_2})$$

Если нижняя граница окажется меньше нуля, то она считается равной нулю.

Коэффициенты b_1 и b_2 вычисляются по формулам

$$b_1 = [1/(n-1)^p] \prod_{j=1}^p (n-j);$$

$$b_2 = [1/(n-1)^p] \prod_{j=1}^p (n-j) \prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k).$$

Из приведенных зависимостей следует, что построение карты обобщенной дисперсии по индивидуальным наблюдениям невозможно, необходимо иметь мгновенные выборки, объем которых хотя бы на единицу превышает количество контролируемых показателей. Поскольку ведется контроль двух коррелированных показателей, использовано $n = 3$ (каждые три наблюдения рассматриваются как одна выборка). На рис. 6 показана карта обобщенной дисперсии. По карте видно, что нарушений стабильности нет, так как нет выходов за контрольные границы.

Методика анализа стабильности химического состава. Статистический анализ шести показателей — кислотно-щелочного баланса и содержания в сточных водах аммиака, нитритов, фосфатов, железа и меди, попадающих в сточные воды при производстве печатных плат, показал, что в различные периоды времени (исследованы данные за два года) стабильность процесса периодически нарушалась по различным показателям. Часто это

связанно с тем, что приобретение очистных сооружений оказывается на порядок дороже, чем оплата штрафов за несоблюдение допустимых значений загрязнения производственных сточных вод. В связи с этим предприятия, стараясь получить максимальную прибыль, пренебрегают законами о защите окружающей среды.

Контроль стабильности химического состава с помощью статистических методов может в определенной степени снять остроту этой проблемы. При этом необходимо:

- проводить регулярный мониторинг содержания различных вредных веществ в сточных водах;
- периодически оценивать коррелированность и нормаль-

ность распределения контролируемых показателей;

- использовать соответствующие контрольные карты для оценки стабильности процесса;
- применять меры оперативного реагирования в случае выявления нарушений по картам.

Это позволит исключить возможные нарушения допустимого уровня содержания химических показателей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект №18-48-730001.

Литература

1. Алексеев М.И., Рублевская О.Н. Очистка сточных вод. СПб., Новый журнал, 2013. 496 с.
2. Ширкунова К.С. Мониторинг стабильности химического состава сточных вод при производстве печатных плат. IN MEMORIAM. Султан Галимзянович Валеев: сб. памяти С.Г. Валеева. Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет. 2016. С. 151–158.
3. Кувайскова Ю.Е., Клячкин В.Н., Бубырь Д.С. Прогнозирование состояния технического объекта на основе мониторинга его параметров. Тр. XII Всеросс. совещания по проблемам управления. М., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7616–7626.
4. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Бубырь Д.С. Прогнозирование состояния объекта с использованием систем временных рядов. Радиотехника. 2015. № 6. С. 45–47.
5. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алексеева В.А. Статистические методы анализа данных. М., Финансы и статистика, 2016. 240 с.
6. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. М., Альпина Бизнес Букс, 2009. 409 с.
7. Клячкин В.Н., Барт А.Д. Оценка стабильности показателей качества при очистке питьевой воды. Экологические системы и приборы. 2017. № 8. С. 14–20.
8. Клячкин В.Н., Константинова Е.И. Диагностика многопараметрического технологического процесса с использованием контрольных карт на главных компонентах. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 3. С. 59–61.
9. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных. Для профессионалов. СПб., Питер, 2001. 656 с.
10. Святова Т.И., Клячкин В.Н. Многомерный статистический контроль технологического рассеяния процесса. Радиотехника. 2014. № 11. С. 123–126.
11. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. New York, John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

References

1. Alekseev M.I., Rublevskaya O.N. Ochistka stochnykh vod. SPb., Novyi zhurnal, 2013. 496 s.
2. Shirkunova K.S. Monitoring stabil'nosti khimicheskogo sostava stochnykh vod pri proizvodstve pechatnykh plat. IN MEMORIAM. Sultan Galimzyanovich Valeev: sb. pamyati S.G. Valeeva. Ul'yanovsk, Ul'yanovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 2016. S. 151–158.
3. Kuvaiskova Yu.E., Klyachkin V.N., Bubyr' D.S. Prognozirovaniye sostoyaniya tekhnicheskogo ob'ekta na osnove monitoringa ego parametrov. Tr. KhII Vseross. soveshchaniya po problemam upravleniya. M., Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014. S. 7616–7626.
4. Klyachkin V.N., Kuvaiskova Yu.E., Bubyr' D.S. Prognozirovaniye sostoyaniya ob'ekta s ispol'zovaniem sistem vremennykh ryadov. Radiotekhnika. 2015. № 6. S. 45–47.
5. Klyachkin V.N., Kuvaiskova Yu.E., Alekseeva V.A. Statisticheskie metody analiza dannykh. M., Finansy i statistika, 2016. 240 s.
6. Uiler D., Chambers D. Statisticheskoye upravleniye protsessami. Optimizatsiya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta. M., Al'pina Biznes Buks, 2009. 409 s.
7. Klyachkin V.N., Bart A.D. Otsenka stabil'nosti pokazatelei kachestva pri ochistke pit'evoy vody. Ekologicheskie sistemy i pribory. 2017. № 8. S. 14–20.
8. Klyachkin V.N., Konstantinova E.I. Diagnostika mnogoparametricheskogo tekhnologicheskogo protsesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart na glavnykh komponentakh. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2007. № 3. S. 59–61.
9. Borovikov V. STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh. Dlya professionalov. SPb., Piter, 2001. 656 s.
10. Svyatova T.I., Klyachkin V.N. Mnogomernyi statisticheskii kontrol' tekhnologicheskogo rassseyaniya protsesa. Radiotekhnika. 2014. № 11. S. 123–126.
11. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. New York, John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

V.N. Klyachkin – д-р техн. наук, профессор, Ульяновский государственный технический университет, 432027 Россия, г. Ульяновск, Северный Венец 32, e-mail: v_kl@mail.ru • К.С. Ширкунова – магистрант, e-mail: kristinashirkunova19@mail.ru • А.Д. Барт – магистрант, e-mail: nasyabart1995@mail.ru

V.N. Klyachkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Ulyanovsk State Technical University, 432027 Russia, Ulyanovsk, Severny Venets 32, e-mail: v_kl@mail.ru • K.S. Shirkunova – Undergraduate, e-mail: kristinashirkunova19@mail.ru • A.D. Bart – Undergraduate, e-mail: nasyabart1995@mail.ru