

КОНТРОЛЬНЫЕ КАРТЫ ПРИ МОНИТОРИНГЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.Н. Фитасов

ORCID: 0009-000-4182-589X e-mail: t7ce@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

С.А. Петрицкий

ORCID: 0009-0002-6267-7036 e-mail: sa540@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.М. Мамонов

ORCID: 0009-0002-8513-2602 e-mail: mam800@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты исследования статистического метода контроля показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на примере контрольных карт Шухарта. Использование метода в системах мониторинга ПКЭ позволяет выполнить оценку динамики изменения показателей во времени и обеспечить оптимизацию процесса путем перехода от постоянного мониторинга ПКЭ к их периодическому выборочному контролю. Приводится пример применения X и R карт Шухарта в процессе обследования объектов систем электроснабжения нефтяной промышленности.

Ключевые слова: выборочный контроль, качество электроэнергии, контрольные карты, мониторинг.

Для цитирования: Фитасов А.Н., Петрицкий С.А., Мамонов А.М. Контрольные карты при мониторинге качества электрической энергии в системах промышленного электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 46-57. EDN SWYQNF

CONTROL CHARTS FOR POWER QUALITY MONITORING IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEMS

A.N. Fitasov

ORCID: **0009-000-4182-589X** e-mail: **t7ce@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Petritsky

ORCID: **0009-0002-6267-7036** e-mail: **sa540@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.M. Mamonov

ORCID: **0009-0002-8513-2602** e-mail: **mam800@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of a study of a statistical method for monitoring power quality indicators using the example of Shewhart control charts. The use of the method in power quality indicators monitoring systems makes it possible to assess the dynamics of changes in indicators over time and ensure process optimization by moving from constant monitoring of power quality indicators to their periodic selective control. The article provides an example of the use of Shewhart's X and R maps in the process of examining objects of power supply systems in the oil industry.

Key words: power quality, monitoring, control charts, selective control.

For citation: A.N. Fitasov, S.A. Petritsky and A.M. Mamonov, "Control charts for monitoring the quality of electrical energy in industrial power supply systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 46-57, 2024. EDN SWYQNF

I. Введение

Обеспечение качества продукции является одной из основных функций промышленного предприятия. Для управления качеством продукции предприятий разработаны и применяются различные методы, позволяющие обеспечить качество продукции на заданном уровне, обеспечивая выходной контроль выпускаемой продукции на наличие брака. С целью снижения затрат были разработаны методы выборочного контроля, основанные на методах математической статистики [1, 2]. Они позволяют сделать заключение о качестве выпускаемой продукции, осуществляя контроль качества не всего объема выпускаемой продукции, а только ее определенной части, т.е.

принять решение о качестве продукции по ограниченному объему выборки. Наиболее широкое применение статистические методы нашли на этапе контроля готовой продукции. В качестве примера можно привести использование, в настоящее время, статистических методов в стандартах качества ИСО серии 9000. Статистические методы для управления качеством производимой продукции нашли применение в различных сферах. К таким сферам можно отнести: сферу промышленного производства, медицину, бизнес и др. [2-4]. Наиболее известными методами, используемыми при управлении качеством производства, являются карты выборочного контроля, карты Шухарта, диаграмма Парето и другие.

Одним из широко используемых простых в реализации инструментов являются карты Шухарта. Метод контрольных карт впервые был реализован в 1924 г. Уолтером Шухартом с целью снижения вариабельности процессов путем исключения отклонений, вызванных несистемными причинами [5]. Контрольные карты представляют собой визуальный инструмент, применяемый в управлении производством, связанным с графиком изменения параметров процесса во времени для осуществления статистического контроля процесса. Своевременное выявление значительной изменчивости процесса позволяет откорректировать его параметры и не допустить брака продукции. Карты Шухарта используются в различных отраслях, однако применение данного метода в системах электроснабжения и, в частности, для анализа качества электрической энергии (КЭЭ) не исследовано.

II. Постановка задачи

Понятие КЭЭ связывают с поддержанием в пределах установленных нормативов величин показателей КЭЭ (ПКЭ). Выход за установленные пределы ПКЭ оказывает негативное воздействие на систему электроснабжения предприятия и его технологический процесс. Хотя негативное воздействие может быть незначительным, однако ущерб от его проявления приводит к финансовым издержкам при производстве продукции. Потери обусловлены, как правило, увеличением брака выпускаемой продукции и выходом из строя оборудования.

Проведенные исследования по искажению ПКЭ в России и за рубежом показывают, что наибольший процент искажений ПКЭ приходится на электроустановки потребителей и порядка 30 % оставшихся искажений ПКЭ приходится на оборудование сетевых и генерирующих организаций. В структуре показателей качества электрической энергии наибольшее искажение ПКЭ приходится на провалы напряжения, скачки напряжения, перенапряжения (из-за переключения конденсатора), возникновение гармоник [6, 7]. Согласно п. В.1.3, ГОСТ 30804.4.30, минимальная продолжительность одного измерения ПКЭ составляет одна неделя, а по некоторым показателям (провалы напряжения, перенапряжения, прерывания напряжения) –

один год [8, 9]. С такими длительными измерениями, говорить об оперативном реагировании на приведение ПКЭ к нормативным величинам не приходится. Для оперативного реагирования на отклонение ПКЭ (выход величин за допустимые пределы) для потребителей электрической энергии (промышленных предприятий) рекомендуется установка систем мониторинга ПКЭ. Полноценная система мониторинга ПКЭ на основе стационарных средств измерений предполагает значительные финансовые затраты на реализацию и содержание системы. Для снижения затрат на содержание системы возможно использовать выборочный контроль ПКЭ. Использование выборочного контроля или полного контроля ПКЭ можно оценить на основе анализа изменения значений ПКЭ. Рассмотрим применение выборочного контроля на примере отклонения напряжения в системе электроснабжения предприятия нефтяной промышленности.

Схема электроснабжения предприятия нефтяной промышленности приведена на рис.1. Для нее получены фактические данные замеров величины напряжения на шинах 10 кВ ГПП в точке 1. На рис. 2 приведен график замеров напряжения на шинах ГПП в точке 1 с 00 ч 00 мин до 23 ч 50 мин. Для суточного графика напряжения (рис. 2) проведен выборочный контроль значений напряжения, данные которого будут использоваться при анализе отклонения напряжения. Выборочные значения взяты на участке времени 3:20 – 6:40.

Анализ выборочных значений ПКЭ будет проводиться с помощью статистического метода. Процессы изменения параметров рабочего режима в электроэнергетике являются, как правило, случайным и зависят от характера изменения нагрузок. Изменение нагрузок случайным образом влечет за собой случайное изменение величин ПКЭ, отклонение напряжения. Поскольку отклонение напряжение будет являться случайно величиной, то для определения соответствия отклонения напряжения требованиям ГОСТ возможно применение вероятностно-статистического метода. С учетом того, что изменение нагрузки подчиняется, как правило, нормальному закону распределения, то и изменение ПКЭ будет подчиняться нормальному закону распределения.

В основу статистического метода заложен закон нормального распределения случайной величины или правило « 3σ ». На основе данного правила реализованы контрольные карты Шухарта. Необходимо учитывать, что при использовании данного метода существует вероятность 0,3 %, что параметр ПКЭ выйдет за границы допустимых значений [1, 10, 11]. Применение контрольных карт позволяет оценить статическую управляемость процесса изменения напряжения, соответственно, реализация процедуры непрерывного мониторинга ПКЭ представляется необоснованной.

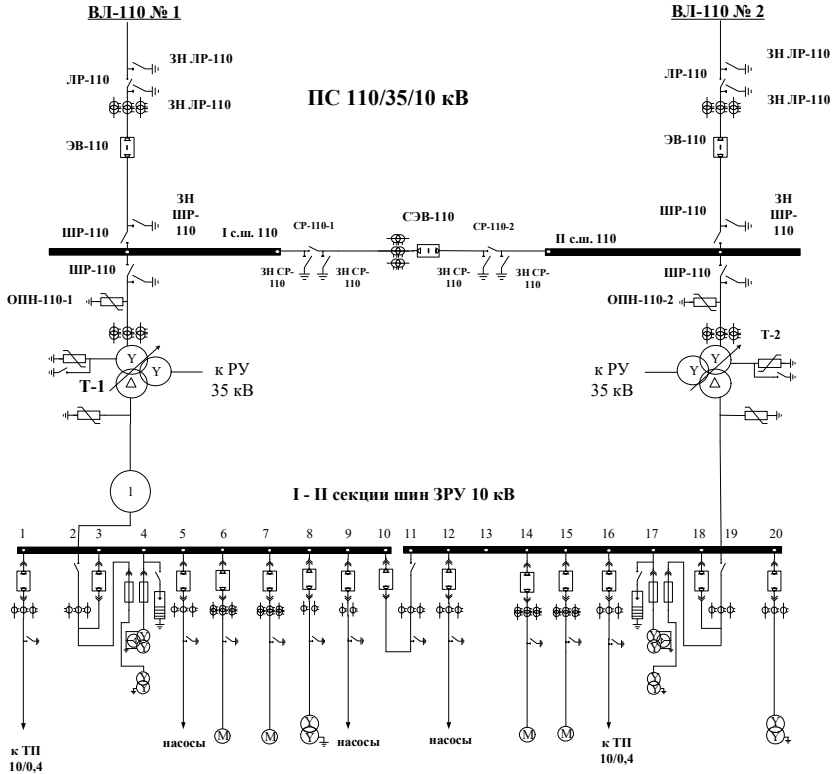


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения предприятия нефтяной промышленности

Fig. 1. Simplified power supply system diagram for an oil industry enterprise



Рис. 2 - График замеров напряжения на шинах ГПП, точка 1

Fig. 2. Voltage measurements on the main substation buses, point 1

III. Принцип построения контрольных карт и анализа данных

Карты Шухарта являются визуальным инструментом, позволяющим наглядно определять изменения параметров процесса во времени для осуществления статистического контроля стабильности процесса. Для анализа используются, как правило, парные контрольные карты. В статье рассматривается применение карты «средний» (X -карта) и карты «разброса» (R -карта). На данных картах наносятся центральная линия (CL_X и CL_R) и точки значения величин X_i и величин разброса R_i . Так же на картах нанесены контрольные границы верхних областей (UCL и LCL). На рис. 3 приводится алгоритм анализа данных с использованием карт Шухарта.

Построение контрольных карт начинается с определения участков стационарности процессов изменения напряжения и выбора статистических коэффициентов, зависящих от объема выборки ($D3, D3, d2, d3, A2$) [1, 10]. На основании выборочных данных рассчитываются центральные линии X -карт и R -карт (CL_X и CL_R), затем контрольные границы (UCL и LCL). Далее определяются границы областей А, В, С относительно средних величин на картах «средних» и картах «разброса». Каждая из областей соответствует величине разброса: область А – $\pm 3\sigma$, область В – $\pm 2\sigma$ и область С – $\pm 1\sigma$. После определения всех границ на карты наносятся значения величин X_i и R_i . Величина X_i соответствует средней величине напряжения в выборке, а величина R_i соответствует разбросу относительно средней величины в выборке. По построенным картам проводим анализ по восьми признакам, которые указывают на наличие особых причин отклонений ПКЭ. Признаки, связанные с расположением характерных структур точек относительно центральной линии, можно разделить на две группы: 1) характерные структуры точек, расположенные по одну сторону от центральной линии; 2) характерные структуры точек, расположенные по обеим сторонам от центральной линии. Восемь признаков сформулированы и исследуются в графическом виде. Поскольку предлагается использовать контрольные карты в системе мониторинга ПКЭ, необходимо дать математическую формулировку указанным восьми признакам для системы мониторинга ПКЭ, которая автоматически будет производить расчет контрольных карт и анализ по картам.

Для примера приведем описание признака № 2: две из трех последовательных точек лежат в одной из зон А. Словесному и графическому описанию признака можно сформулировать математическое выражение:

$$\begin{cases} X_0 + 2A_1\sigma_0 / 3 < \bar{U}_{knj} < X_0 + 3A_1\sigma_0; \\ X_0 - 2A_1\sigma_0 / 3 < \bar{U}_{knj} < X_0 - 3A_1\sigma_0; \\ k = 1..25, n = 1..3, j = 1..2; \\ \text{при условии, что одно из условий выполнилось.} \end{cases} \quad (1)$$

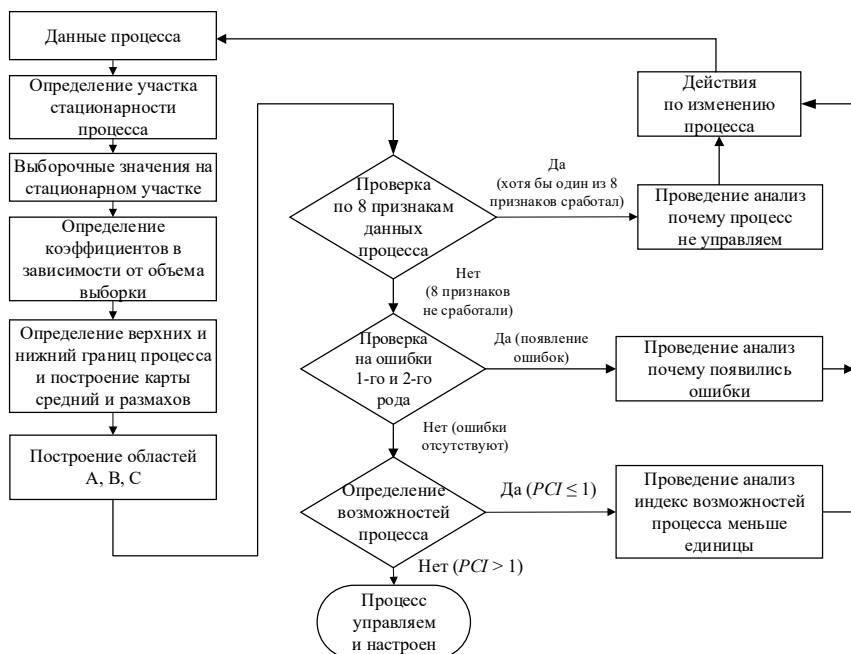


Рис. 3. Анализ данных по картам Шухарта:
 PCI – индекс возможностей процесса

Fig. 3. Data analysis using Shewhart charts: PCI – Process Capability Index

Восемь признаков сформулированы под определенное расположение и сочетание исследуемых величин. Если одно из сочетаний и расположений точек совпадает с описанным, признак считается выполненным [1, 5, 10]. Появление любого из признаков является свидетельством присутствия в процессе особых (специальных, неслучайных) причин, действующих на ход процесса. Эти причины должны быть определены, и по отношению к ним должны быть осуществлены корректирующие действия. Если при проведении анализа один из восьми признаков дал положительный результат (проявился), то необходимо установить, почему произошло проявление признака. После анализа необходимо осуществить воздействие на процесс, повторно построить карты и провести анализ по 8 признакам и так до момента, пока процесс не будет статически устойчив.

Признаки управляемости или неуправляемости процесса в литературе приводятся в графическом виде. В настоящее время с учетом применения вычислительной техники необходимо дать математическую формулировку каждого из признаков. Применение вычислительной техники для

принятия решения «выполнения» или «невыполнения» признаков позволит ускорить время обработки данных.

IV. Пример анализа отклонения напряжения на предприятии нефтяной промышленности по картам Шухарта

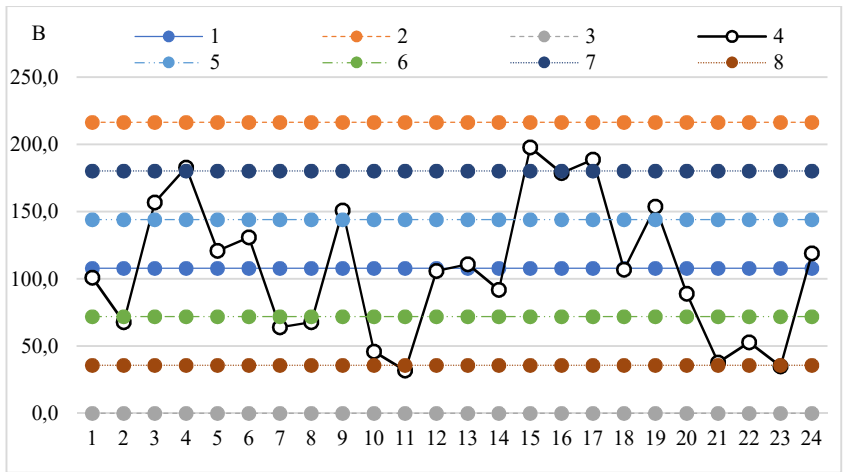
В примере рассматривается анализ отклонения напряжения при условиях, что границы разброса величины напряжения составляют $\pm 10\%$ от U_n и являются допустимыми границами, а верхние и нижние границы определяются расчетным путем, величина разброса σ_0 не задана. Операции по построению контрольных карт описаны выше. Построение начинается с R -карты, потом строится X -карта. На рис. 4 приведены диаграммы R -карты и X карты.

Проведем анализ контрольных карт средних значений напряжения и размахов напряжения по восьми признакам в соответствии с [1, 10]. Проведем проверку на примере признака № 4. Формулировка признака № 4 – девять точек подряд лежат по одну сторону от центральной линии (в зоне C или вне ее). Данному признаку можно сформулировать математическое описание:

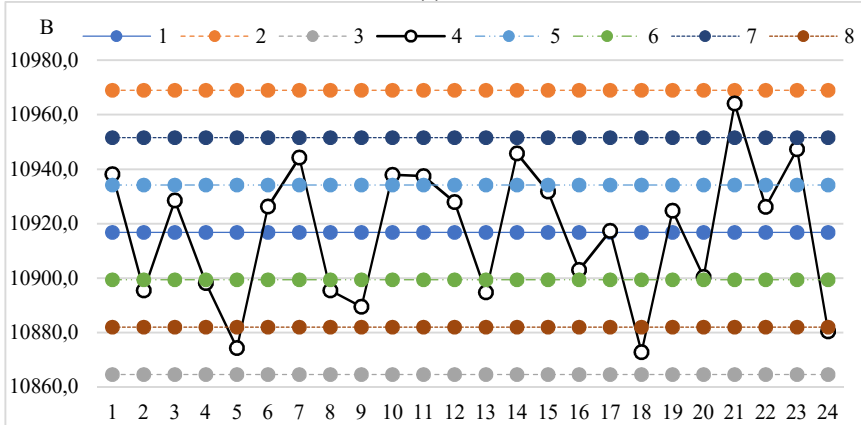
$$\begin{cases} X_0 < \bar{U}_{kn} \text{ или } \bar{U}_{kn} < X_0; \\ k = 1..25, n = 1..9. \end{cases} \quad (2)$$

Проверка контрольных X -карт и R -карт показала, что признаки 1-8 носят отрицательный характер, т.е. не выполняются. Исходя из этого, можно говорить, что процесс статически управляем, т.е. величина напряжения в этом случае не выйдет за пределы диапазона 10,97-10,87 кВ или будет находиться в пределах 8,7 до 9,7 % от U_n с вероятностью 99,72 %.

Величина средних значений напряжений (рис. 4, б) находится достаточно близко к верхней допустимой границе напряжения, составляющей +10 % от U_n . Проведенный анализ с применением карт Шухарта показал, что в узле 1 (рис. 1) величина напряжения не будет выходить за пределы допустимых значений в ближайшей перспективе. Для принятия решений об организации непрерывного мониторинга ПКЭ на основе стационарных средств измерения необходимо провести оценку выборочных величин всех ПКЭ. И если по всем показателям качества электрической энергии процесс окажется статически управляемым, то можно говорить об организации только выборочного контроля показателей, без применения методов постоянного мониторинга. Необходимо отметить, что, хотя процесс и оказался статически управляемым, но величины напряжения находятся очень близко к верхней допустимой границе +10 % от U_n . В связи с этим целесообразно установить причину того, что величина напряжения находится близко к верхнему допустимому значению.



(а)



(б)

Рис. 4. Диаграммы контрольных карт размахов напряжения (а);
выборочных средних значений напряжения (б):

- 1 – центральная R_{cp} / X_{cp} ; 2 – верхняя граница средний $UCL R_{cp} / X_{cp}$;
3 – нижняя граница средний $LCL R_{cp} / X_{cp}$; 4 – разброс R / среднее X ;
5 – верхняя граница $C R_{cp} / X_{cp}$; 6 – нижняя граница $C R_{cp} / X_{cp}$;
7 – верхняя граница $B 2R_{cp} / 2X_{cp}$; 8 – нижняя граница $B 2R_{cp} / 2X_{cp}$

Fig. 4. Control chart diagrams: voltage range (а); sample average voltage values (б):

- 1 – central R_{av} / X_{av} ; 2 – upper limit of average $UCL R_{av} / X_{av}$;
3 – lower limit average $LCL R_{av} / X_{av}$; 4 – range R / average X ;
5 – upper limit $C R_{av} / X_{av}$; 6 – lower limit $C R_{av} / X_{av}$; 7 – upper limit $B 2R_{av} / 2X_{av}$;
8 – lower limit $B 2R_{av} / 2X_{av}$

Анализ причинно-следственных связей возможно проводить, например, с помощью метода Исикавы [11, 12], позволяющего выявить причины нахождения величины напряжения практически у границы допустимой границы +10 % от U_n . При существующей ситуации регистрацию событий в системе мониторинга желательно все же оставить на учащенном контроле до момента определения причин приближения к верхней допустимой границе.

Для анализа ПКЭ, с применением карт Шухарта, можно использовать измеренные значения ПКЭ, полученные ранее и хранящиеся в базах данных, а на основании их анализа принимать решения о необходимости реализации постоянного мониторинга ПКЭ. Если процесс статически не управляем, необходимо проводить дополнительный анализ данных, или переходить к непрерывному мониторингу параметров режима электрической сети.

V. Выводы

В системах электроснабжения предприятий различных отраслей промышленности необходимо применение мониторинга КЭЭ. При определенных условиях возможна реализация периодического выборочного контроля показателей вместо непрерывного контроля, что, в свою очередь, снижает эксплуатационные затраты на мониторинг. Перспективным является применение контрольных карт Шухарта в системах мониторинга КЭЭ. Их рекомендуется использовать при обработке и анализе больших массивов данных. Применение контрольных карт открывает возможность их применения не только для анализа ПКЭ в системах мониторинга, но и для анализа режимов работы электрической сети, использования в устройствах автоматики.

© Фитасов А.Н., 2024

© Петрицкий С.А., 2024

© Мамонов А.М., 2024

Поступила в редакцию 30.01.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Received 30.01.2024

Accepted 28.02.2024

Библиографический список

- [1] Солонин С.И. Метод контрольных карт. Екатеринбург: ЦНОТ ИТОО УрФУ, 2014. – 213 с.
- [2] Афанасьев В.Б., Воробьев Т.К., Мамаев В.А., Медведев В.М., Тихменев Н.В. Автоматизация процесса анализа отказов, оценки надежности и эффективности доработок изделий // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 1 (36). С. 76-84. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-1-76-84

- [3] Biswas R.K., Masud M.S., Kadir E. Shewhart control chart for individual measurement: an application in a weaving mill // *Australasian Journal of Business, Social Science and Information Technology*. 2016. № 2 (2). P. 89-100.
- [4] Микшина В.С., Шайторова И.А., Лысенкова С.А. Идентификация угроз аварийных ситуаций объектов в нефтяной промышленности // *Вестник кибернетики*. 2018. № 4 (32). С. 211-216.
- [5] Shewhart W.A. Economic control of quality of manufactured product. American Society for Quality Control, 1931. – 501 p.
- [6] Emanuel A.E., McNeil J.A. Electric power quality // *Annual Review of Energy and the Environment*. 1997. № 22. P. 263-303. DOI: 10.1146/annurev.energy.22.1.263
- [7] Kusic E., Petrovic V., Jakovljevic M., Djurovic Z. Fault detection in electric power systems based on control charts // *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2013. № 10 (1). P. 73-90. DOI: 10.2298/SJEE1301073K
- [8] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [9] ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 51 с.
- [10] ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. Введ. 2012-12-01. М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
- [11] Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Фитасов А.Н. Применение контрольных карт для оценки статистических характеристик показателей качества электрической энергии в системах промышленного электроснабжения // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, Сентябрь 13-17, 2021, Волжский, Россия: ИСЭМ СО РАН, 2021. С. 182-190.
- [12] Ishikawa K. Guide to Quality Control. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1976. – 226 p.

References

- [1] S.I. Solonin, *Metod kontrol'nyh kart [Control chart method]*. Ekaterinburg: CNOT ITOO UrFU, 2014 (in Russian).
- [2] V.B. Afanasyev, T.K. Vorobiev, V.A. Mamaev, V.M. Medvedev and N.V. Tikhmenev, “Automation of the processes of failure analysis, reliability assessment and product completion efficiency”, *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antey»*, vol. 1, no. 36, pp. 76-84, 2021. DOI: 10.38013/2542-0542-2021-1-76-84
- [3] R.K. Biswas, M.S. Masud and E. Kadir, “Shewhart control chart for individual measurement: an application in a weaving mill”, *Australasian Journal of Business, Social Science and Information Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 89-100, Apr. 2016.
- [4] V.S. Mikshina, I.A. Shaytorova and S.A. Lysenkova, “Threat identification of emergency situations at oil industry facilities”, *Proceedings in Cybernetics*, vol. 4, no. 32, pp. 211-216, 2018.
- [5] W.A. Shewhart, *Economic control of quality of manufactured product*. American Society for Quality Control, 1931.

- [6] A.E. Emanuel and J.A. McNeil, "Electric power quality", *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 22, pp. 263-303, Nov. 1997. DOI: 10.1146/annurev-energy.22.1.263
- [7] E. Kistic, V. Petrovic, M. Jakovljevic and Z. Djurovic, "Fault detection in electric power systems based on control charts", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 73-90, Feb. 2013. DOI: 10.2298/SJEE1301073K
- [8] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [9] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Methods for measuring electrical energy quality indicators, GOST 30804.4.30-2013, Jan. 2014.
- [10] Statistical methods. Control charts. Part 1. General guidelines, GOST R ISO 7870-1-2011, December 2012.
- [11] G.Ya. Vagin, A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov and A.N. Fitasov, "Primenenie kontrol'nyh kart dlya ocenki statisticheskikh harakteristik pokazatelej kachestva elektricheskoy energii v sistemah promyshlennogo elektrosnabzheniya [Application of control charts for assessing the statistical characteristics of electrical energy quality indicators in industrial power supply systems]", in proc. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki [Methodological issues in studying the reliability of large energy systems]*, Sep. 13-17, 2021, Volzhsky, Russia, pp. 182-190 (in Russian).
- [12] K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1976.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фитасов Анатолий Николаевич, **Anatoly N. Fitasov**, senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Петрицкий Сергей Александрович, **Sergey A. Petritsky**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Мамонов Андрей Михайлович, **Andrey M. Mamonov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, Russian Federation.