

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ

М.М. Кутень, А.Л. Бобров
ФГБОУ ВО СГУПС, г. Новосибирск

Данная работа посвящена исследованию изменений амплитуды сигналов дискретной акустической эмиссии (АЭ) от источников разного типа, в том числе усталостных трещин. Для прогнозирования работоспособного состояния большое значение имеет анализ параметров дискретной АЭ несквозных дефектов в ответственных объектах, например, сосудах, трубопроводах, объектах авиационной техники, строительных конструкциях и т.п. Идентификация типов дефектов по параметрам акустико-эмиссионного контроля является актуальной практической задачей. В статье представлены результаты нагружения группы образцов, изготовленных из низколегированных и низкоуглеродистых сталей, с концентраторами напряжений при различных условиях воздействия, а именно, осуществлялись статическое, циклическое и комбинированное типы воздействий. Цель работы заключалась в анализе частоты распределения сигналов от одного источника, находящегося на разных этапах развития, по амплитудам. Результаты исследования позволяют использовать эмпирические зависимости, характеризующие связь параметров дефекта с характеристиками АЭ, при поиске критерия определения типа дефекта, а также стадии его развития. В ходе работы было установлено, что развивающаяся трещина характеризуется степенным распределением сигналов по амплитудам. Увеличению надежности идентификации типа дефекта, а также его отысканию, способствует использование данных циклических испытаний. Кроме того, полученные данные позволяют использовать амплитудное распределение сигналов для идентификации некоторых типов источников, таких как трещины, на фоне АЭ от других источников. Также данные исследований позволяют осуществлять восстановление некоторых потоковых параметров дискретной АЭ. Применение данных АЭ контроля для оценки опасности дефектов в объекте возможно только при использовании вероятностных методик оценки и совмещения результатов с данными других методов неразрушающего контроля.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, амплитуда сигналов, амплитудное распределение, концентратор напряжений, усталостная трещина, потоковые параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля является одним из самых востребованных при испытаниях опасных производственных объектов. Его преимущества заключаются в возможности получения ценной информации об объекте контроля в режиме реального времени, а также в обладании высокой чувствительности к обнаружению развивающихся дефектов по сравнению с другими существующими методами неразрушающего контроля.

Наряду с преимуществами существует и ряд недостатков, одним из которых является трудность в определении типа развивающегося дефекта по полученным параметрам АЭ сигналов в процессе нагружения. Это существенно затрудняет качество оценки состояния объекта, если есть ограничения для использования других методов неразрушающего контроля. Поэтому идентификация опасных дефектов в объектах, подвергаемых АЭ контролю, по-прежнему, является актуальной задачей. Решение этой задачи сильно затруднено различиями в акустических трактах, формируемых волной на пути от источников к приемным преобразователям. Учет или методическое снижение влияния этих отличий

предпринимались в различных направлениях: осуществлялся выбор параметров, предсказуемо чувствительных к акустическому тракту [1], приводили решения проблемы аппаратными способами [2] или методически [3, 4]. Тем не менее, большинство используемых критериев оценки опасности источников базируются на использовании амплитуды [5] или энергии сигналов АЭ [6].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основной целью исследований был анализ частотного распределения сигналов АЭ в зависимости от их амплитуды. Такие исследования помогают понять перспективу использования амплитуды или энергии сигналов в качестве критериев оценки.

В рамках проведенных исследований были проанализированы динамика изменения амплитуды сигналов АЭ на разных этапах развития трещины в конкретных экспериментах, полученных при механическом деформировании образцов в процессе равномерного растяжения и для сравнения от других типов источников акустических волн.

Испытанию подвергли образцы из низколегированных (20ГФЛ) и низкоуглеродистых сталей (СтЗпс, Сталь 20). Регистрацию АЭ осуществляли с помощью шестнадцатиканальной

системы СЦАД 16.03, основные характеристики которой приведены в [7], а принцип работы в [8]. Участки с обнаруженными источниками дополнительно контролировали другими методами неразрушающего контроля, позволяющими идентифицировать дефекты и определить их тип и размеры. Регистрацию сигналов АЭ проводили как при статическом виде нагружения образцов, так и при циклическом. Для приема АЭ информации использовали полосовые преобразователи. Чувствительность приемных преобразователей проверяли с помощью электронного имитатора. Ослабление сигналов от источника до приемников было не более 20 дБ на расстоянии 0,1 м от излучающего преобразователя. Порог чувствительности каналов был установлен в режим автоматического превышения уровня шумов и имел минимальное значение – 5 мкВ.

Нагружения образцов осуществляли на установках с равномерным растяжением. При этом образцы имели V-образные концентраторы. Часть образцов нагружали статически на всем интервале деформирования (6 образцов). Другие образцы подвергли предварительному циклическому нагружению с выращиванием усталостной трещины площадью 20-30 % от общей площади сечения в области концентратора и последующему статическому нагружению до разрушения. Третья группа образцов была подвергнута комбинированному нагружению. Последовательно проводили серии циклического нагружения $(3...15) \cdot 10^3$ циклов с частотой 5 Гц в малоцикловом режиме и между ними статическое нагружение с усилием, превышающим силу циклической фазы на 25 %.

Несмотря на то, что потоковые параметры, такие как суммарный счет, активность, суммарная энергия за время испытания или определенный временной интервал, хорошо зарекомендовали себя для отслеживания стадии развития процесса деформирования или усталостной трещины, существует проблема идентификации типов дефектов, что часто существенно как для тактики дальнейшего контроля (какие методы и средства использовать для подтверждения наличия дефекта, определения его размеров и местоположения), так и для прогнозирования поведения дефектного участка. В первом приближении с точки зрения координат источников их можно разделить на локальные (например, трещины, области концентрации напряжений на несплошностях производственного и эксплуатационного происхождения) и распределенные (например, участки коррозии, дефектные структуры). Кроме того, сложность идентификации типов дефектов заключается в том, что некоторые процессы, такие как, например, пластическая деформация или развивающаяся

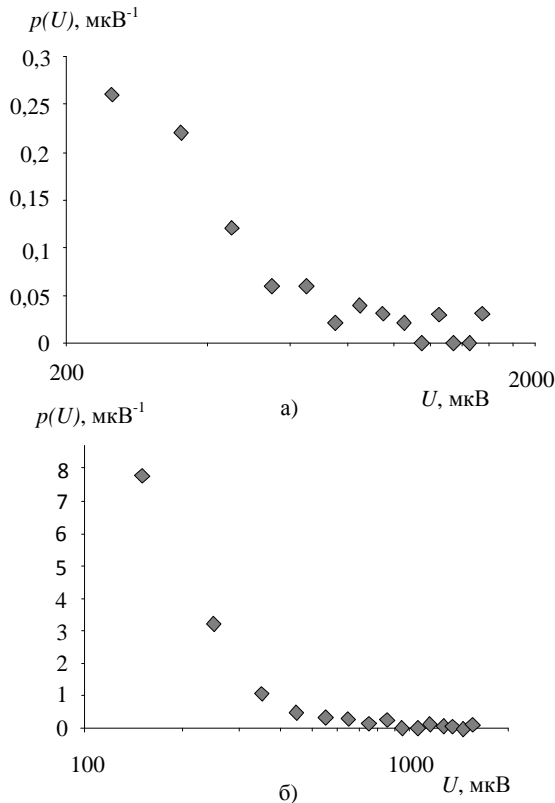
усталостная трещина, имеют несколько стадий, характеризующихся некоторыми физическими различиями. Это обстоятельство сильно затрудняет выявление и типа дефекта и его стадию развития. В этом случае перспектива эволюции метода может идти по пути анализа признаков сигналов, несущих информацию об источнике.

Для анализа использовали оцифрованные волновые пакеты сигналов АЭ. Локация сигналов позволила разделить полученные сигналы АЭ на четыре группы. Во-первых, сигналы появляются в результате трения образца в области захватного механизма нагружающего устройства. Во-вторых, группа сигналов возникает в связи с деформацией (сначала упругой, а затем – пластической) в области концентратора напряжений и около него. В-третьих, сигналы вызваны единичными локальными дискретными динамическими изменениями структуры в объеме образца в процессе его упругого деформирования. В-четвертых, группа сигналов появляется в результате локального поверхностного эффекта, например, отслоение окалины и других инородных материалов.

Противоречивой особенностью дискретной АЭ при деформировании образцов и реальных объектов является то, что в ряде случаев частоту появления сигналов от источника по амплитуде в некоторых исследованиях характеризуют экспоненциальной зависимостью [9], которая была получена при развитии трещины в стекле, или степенной зависимостью, приведенной в работе [10], полученной в стальных образцах. Есть также другие исследования на эту тему. Такие данные способствуют возникновению рассуждений о природе АЭ в материалах при разрушении. Более того, порождают вопросы о том, каким же образом формируются эти распределения и имеют ли они практический смысл при диагностике состояния конкретных материалов и объектов.

Для создания гипотезы о том, как может формироваться распределение актов АЭ по амплитудам от конкретных источников необходимо получить некоторый набор экспериментальных наблюдений. Для этого были построены распределения сигналов от разных типов источников, при этом были выбраны источники, от которых было зарегистрировано не менее 300 сигналов. При этом для снятия эффекта влияния незарегистрированных низкоамплитудных сигналов, связанных с наличием порога чувствительности U_n , сигналы с амплитудами ниже уровня $2U_n$ не учитывали при построении гистограмм частоты попадания сигналов в тот или иной диапазон амплитуд. Однако сигналы с высокой амплитудой встречаются в большинстве экспериментов гораздо реже, что объяснимо, и поэтому корректное отображение данных с логарифмической шкалой по амплитуде часто дает в

некоторых случаях противоречивый результат. На рис. 1 приведены графики распределения частоты появления сигналов с определенной амплитудой (представлены средние значения из равных по интервалу амплитуд диапазонов). Частоту определяли как отношение числа сигналов из интервала амплитуд к величине этого интервала в мкВ.



а - при плановом испытании сосуда под давлением; б - при вдавливании шарообразного индентора в тело стального образца

Рис. 1. Распределения сигналов по частоте появления в диапазонах амплитуд по 100 мкВ

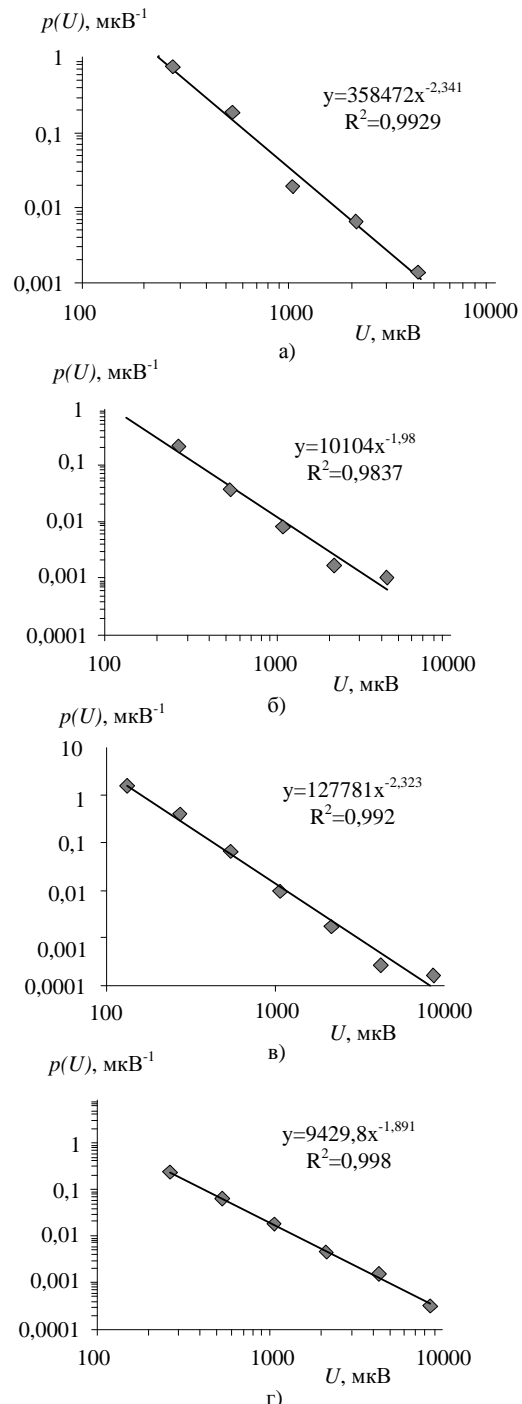
Результаты показывают, что при относительно малом числе сигналов (рис. 1, а) у нас появляются участки не позволяющие однозначно идентифицировать тип распределения, когда же все диапазоны заполнены, то есть число сигналов достаточно велико, чтобы обеспечить приближение к непрерывному распределению, то полученный результат более однозначен, и в случае на рис. 1, б может быть описан с помощью степенной функции.

Для дальнейших исследований использовали диапазоны, которые с увеличением значений амплитуд возрастали в 2 раза. Тогда, частоту появления сигналов с определенным значением амплитуды вычисляли по формуле:

$$p(U) = \frac{N_{U_{(i)} - U_{(i-1)}}}{U_{(i)} - U_{(i-1)}}$$

где $N_{U_{(i)} - U_{(i-1)}}$ - число сигналов в диапазоне амплитуд от значения $U_{(i-1)}$ до значения $U_{(i)}$.

Полученные результаты для разных типов источников приведены на рис. 2.



а - от развивающейся трещины; б - при пластической деформации в области концентратора напряжений; в - при вдавливании индентора в стальной образец; г - при испытании сосуда при повышенном давлении

Рис. 2. Степенное распределение частоты появления сигналов по амплитудам

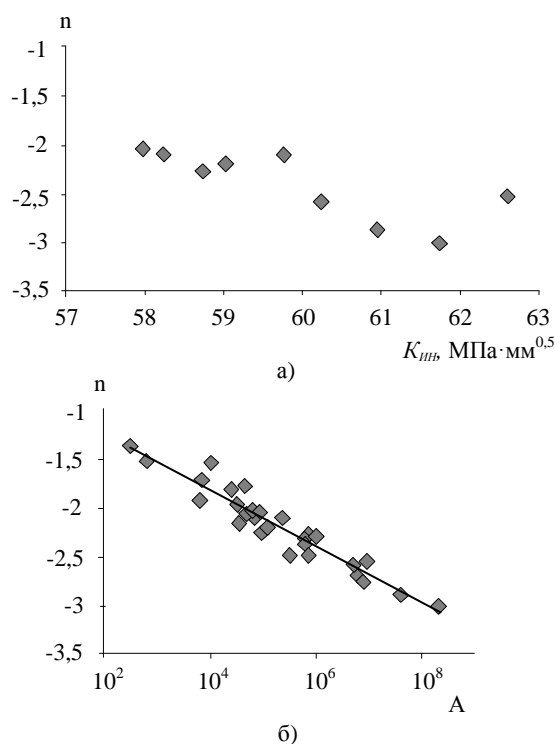
Распределение можно описать с помощью функции:

$$p(U) = A \cdot U^n,$$

где A и n – множитель и показатель степенной зависимости.

Все проанализированные случаи показывают, что распределения сигналов по амплитудам независимо от объема, в котором происходит развитие источников АЭ, и типа самого источника имеют степенной вид. Характерно, что для одного и того же источника на разных стадиях развития (усталостная трещина) характер распределения не изменяется, однако неоднозначно изменяются множитель и показатель степени этой зависимости, который почти во всех случаях был отрицательным.

В ходе дальнейших исследований был проведен анализ зависимости параметров степенного распределения, а именно множителя и показателя степени (рис. 3). Для анализа использовались данные АЭ сигналов, полученные от развивающихся усталостных трещин на разных этапах развития, характеризующих коэффициентом интенсивности напряжений $K_{инт}$.



а – изменение показателя степени от коэффициента интенсивности напряжений; б – зависимость показателя степени от множителя в степенной зависимости

Рис. 3. Динамика изменения параметров степенного распределения частоты появления сигналов по амплитудам с увеличением коэффициента интенсивности

Результаты анализа показывают, что показатель степени колеблется и не имеет выраженной

тенденции к изменению с увеличением коэффициента интенсивности напряжений (рис. 3, а), а доверительный интервал имеет значение большее, чем рассчитываемые параметры корреляционной зависимости. Так же ведет себя и множитель степенной зависимости. Более того, между показателем и множителем степенной зависимости для разных образцов существует очевидная корреляция (рис. 3, б). Таким образом, параметры степенного распределения частоты появления сигналов по амплитудам показывает, что использование амплитуды и энергии сигналов АЭ в качестве критериев при оценке состояния материала не подтверждаются. Кроме того, параметры A и n степенного распределения частоты распределения сигналов АЭ по амплитудам видимо зависят от одних и тех же параметров формирования волн АЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что развивающаяся трещина характеризуется степенным распределением сигналов по амплитудам во всех наблюдаемых случаях, а именно:

- от развивающихся трещин на всех стадиях их развития;
- при пластической деформации объекта в области искусственного концентратора;
- при вдавливании индентора в тело стального объекта;
- при нагружении сосуда без выраженного источника АЭ.

Характер поведения таких степенных распределений по амплитуде от каждого источника требует дальнейшего изучения в более широком масштабе.

Устойчивость параметров формулы степенного распределения сигналов по амплитудам к стадии развития усталостной трещины не позволяет использовать суммарную или среднюю амплитуду и рассчитываемую по амплитудам энергию сигналов АЭ в качестве самостоятельного критерия оценки степени развитости этих усталостных трещин при испытаниях стальных объектов, так как он связан с суммарным счетом сигналов АЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов, А.Ю. Природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлических материалах / А.Ю. Виноградов, Д.Л. Мерсон // Физика низких температур. – 2018. – №9. – С. 1186-1195.
2. Идентификация источников и новые виды волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии / О.В. Башков [и др.] // Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018. – С. 140.
3. Бобров, А.Л. Анализ изменений динамических характеристик источников акустической эмиссии при статическом нагружении металлических образцов / А.Л. Бобров // Дефектоскопия. – 2009. – №5. – С. 18-24.
4. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В.В. Носов,

А.И. Потапов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2009. - №2. – С.47-57.

5. Ченцов, В.П. Акустическая эмиссия при упругопластическом деформировании конструкционных материалов и опыт её применения в неразрушающем контроле: монография / В.П. Ченцов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 268 с.

6. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О.В. Башков [и др.]; под ред. Семашко Н.А. – Томск: Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета, 2014. – 301 с.

7. Муравьев, В.В. Физические основы и технологии акустико-эмиссионного контроля металлоконструкций на железнодорожном транспорте: учеб. пособие / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2014. – 392 с.

8. Пат. 2664795 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/14. Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций. / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Ельцов А.Е., Бехер С.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». - № 2017111160/29; заявл. 03.04.2017; опубл. 22.08.2018, Бюл. № 24 – 14 с.: ил.

9. Попков, А.А. Корреляционные методы анализа информативности параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) / А.А. Попков, С.А. Бехер // Политранспортные системы. – 2017. – С. 440-444.

10. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионная диагностика: справочник / В.И. Иванов, В.А. Барат. – Москва: Спектр, 2017. – 362 с.

Кутень Мария Михайловна – аспирант кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», Сибирский государственный университет путей сообщения ФГБОУ ВО СГУПС, тел. +79529452023, e-mail: mariabychkova94@mail.ru.

Бобров Алексей Леонидович – д.т.н., профессор кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», Сибирский государственный университет путей сообщения ФГБОУ ВО СГУПС, тел. (3833)280302, e-mail: beaver@stu.ru.

RESEARCH OF AMPLITUDE BEHAVIOR WITHIN ACOUSTIC EMISSION TESTING

M.M. Kuten, A.L. Bobrov

Siberian Transport University, Novosibirsk

Abstract – This work is devoted to the study of changes in the amplitude of discrete acoustic emission (AE) signals from various sources, for example, fatigue cracks. Importance is the analysis of discrete AE in critical facilities for predicting a healthy state: pressure vessels, pipelines, objects of aircraft, building structures, etc. Identification of defects types by AE parameters is an urgent task. The article presents the results of loading samples of low alloy and low carbon steels with stress concentrators under various exposure conditions. Static, cyclic and combined types of loading were carried out. The purpose of the work is to analyze the frequency of the signals distribution from one source over the amplitudes. The results of the study can be applied when searching for a criterion for determining the type of defect, as well as the stage of its growth. A growing crack is characterized by a power-law distribution of the signals amplitudes. The use of cyclic test data helps to increase the reliability of identifying the type of defect and finding it. In addition, the amplitude distribution of signals can be used to identify some types of sources (for example, fatigue cracks) against the background of AE from other sources. Also, research data allows the restoration of some flow parameters in a discrete AE. The combined use of probabilistic assessment methods and the results of other non-destructive testing methods are necessary to assess the danger of defects.

Index terms: acoustic emission, stress concentrator, fatigue crack, flow parameters, amplitude distribution.

REFERENCES

1. Vinogradov, A.Y. and D.L. Merson, “The nature of acoustic emission during deformation processes in metallic materials”, *Low Temperature Physics*, vol. 44, no. 9, pp. 930-937, 2018.
2. Bashkov, O.V. and A.A. Bryanskiy, R.V. Romashko, A.A. Popkova, V.I. Zaikov and I.O. Bashkov, “Source identification and new types of fiber optical sensors in acoustic emission”, *Strength of heterogeneous structures – PROST 2018*, Moscow, RF, p. 140, 2018.
3. Bobrov, A.L., “Analysis of variations of the dynamic characteristics of acoustic-emission sources under static loading of metal specimens”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, no. 5, pp. 304-309, 2009.
4. Nosov, V.V., and A.I. Potapov, I.N. Burakov, “Estimation of the strength and lifetime of technical objects using the acoustic-emission method”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, no. 2, pp. 109-117, 2009.
5. Chentsov, V.P., *Acoustic emission during elastoplastic deformation of structural materials and the experience of its use in non-destructive testing: monograph*, Tomsk, RF, 2014.
6. Bashkov, O.V. and S.V. Panin, P.S. Lyubutin, A.V. Byakov, S. Ramasubbu, *Stage-by-stage deformation of polycrystalline materials. Research by acoustic emission and optical television methods*, N.A. Semashko, Ed., Tomsk, RF, 2014.
7. Muraviev V.V. and O.V. Muravieva, “Physical foundations and technologies of acoustic emission control of metal structures in railway transport”, Izhevsk, RF, 2014.
8. Stepanova, L.N. and S.I. Kabanov, A.E. Eltsov, S.A. Bekher, “Multi-channel acoustic-emission system for diagnostics of structures”, RU Patent 2 664 795, April 3, 2017.
9. Popkov, A.A., and S.A. Bekher, “Correlation analysis methods of the parameters informativity of acoustic emission signals (AE)”, *Scientific problems of transport projects implementation in Siberia and the far East*, Novosibirsk, RF, pp. 440-444, Nov. 2016.
10. Ivanov, V.I., and V.A. Barat, *Acoustic emission diagnostics*, Moscow, RF, 2017.

Kuten Mariya Mikhaylovna – post-graduate student, department of electrical engineering, diagnostics and certification, Siberian Transport University, STU, +79529452023, e-mail: mariabychkova94@mail.ru.

Bobrov Aleksey Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, professor, department of electrical engineering, diagnostics and certification, Siberian Transport University, STU, (3833)280302, e-mail: beaver@mail.ru.