© И.З. Гатиятов, Л. С. Сабитова

УДК 624.074.4

СПОСОБЫ И УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ ОПОР ИЗ ТРУБЧАТЫХ СТЕРЖНЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

И.З. Гатиятов[1], Л.С. Сабитов[1,2]

[1]Казанский государственный энергетический университет
[2] Казанский (Приволжский) федеральный университет
gatiyatov.iz@kgeu.ru

Резюме: *В статье представлены способы и установки контроля опор трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок. Описаны методики испытания.*

Ключевые слова: *опора, соединение трубчатых стержней, способ контроля методика испытания, натурные испытания.*

DOI*:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-93-101*

METHODS AND SYSTEMS CONTROL THE SUPPORTS OF THE TUBULAR RODS USED IN THE ENERGY CONSTRUCTION WHEN EXPOSED TO STATIC AND DYNAMIC LOADS

I.Z. Gatiyatov[1], L.S.Sabitov[1,2]

[1]Kazan state power engineering University
[2]Kazan (Volga region) Federal University
gatiyatov.iz@kgeu.ru

Abstract: *The article presents the methods and installations of control supports tubular rods used in power construction when exposed to static and dynamic loads. Test methods are described.*

Keywords: *support, connection of tubular rods, control method test procedure, full-scale tests*

Электроэнергетический комплекс России является основой роста ее экономики. Для эффективного функционирования электроэнергетического комплекса необходимо дальнейшее развитие воздушных линий электропередач (ВЛ) 0,6–1150 кВ, общая протяженность которых составляет более 2400000 км.

Интенсивное развитие ВЛ за счет широкого внедрения новых опор из трубчатых стержней (включая многогранные опоры), модификации существующих опор с применением прогрессивных материалов, обеспечивающих их высокую надежность и прочность при минимальной металлоемкости, обуславливает необходимость проведения механических испытаний их конструкций.

Отмеченный вывод справедлив и для опор контактной сети городского электрического и железнодорожного транспорта, имеющих конструкцию, схожую с опорами ВЛ. При этом к опорам контактных сетей предъявляются повышенные требования по надежности, вследствие того, что из-за невозможности резервирования они непосредственно влияют на непрерывность процесса перевозки, а в случае разрушения – создают угрозу безопасности движения и жизни людей.

При внедрении новых типов опор возникает необходимость в определении их фактической несущей способности при приложении к ним испытательной нагрузки, соответствующей реальной. Однако из-за сложности и трудоемкости, в некоторых случаях при этих испытаниях моделирование нагрузок сводится в одну силу, приложенную к верхнему концу опоры, что снижает объективность и качество ее контроля.

К наиболее тяжелым авариям на ВЛ относятся гололедные аварии, вследствие которых возникают массовые обрывы проводов, каскадные разрушения опор анкерного участка ВЛ. На долю указанных аварий в РФ приходится 25% повреждений ВЛ, а их продолжительность составляет примерно 40% аварийных отключений. Одним из факторов, обуславливающих эти аварии, по нашему мнению, является недоучет динамических нагрузок при проектировании ВЛ.

Известные способы испытания опор создают продольные и поперечные статические нагрузки, приложенные к опоре. В реальных условиях эксплуатации значительная часть повреждений опор связана с воздействием на них динамических нагрузок, которые могут превосходить статические.

Для получения действительной работы опоры и точной аналитики испытаний необходимо в режиме реального времени смоделировать и приложить на всю конструкцию ветровые и гололедные нагрузки, вес от элементов контактной сети, дорожных и рекламных знаков и т.д.

Исследования, а также проведение механических сертификационных испытаний для унификации новых конструктивных решений опор и приемочных механических испытаний опытных образцов опор предприятиями-изготовителями, в зависимости от уровня их проведения, осуществляются на Полигонах испытания ответственных и уникальных опор ВЛ и башенных сооружений, относящихся к мировым испытательным центрам строительных металлоконструкций, или на испытательных установках, оснащенных системами силовозбуждения и измерения усилий, перемещений и деформаций. При обзоре существующих полигонов испытания учитывался опыт мировых производителей опор и исследовательских центров. Рассмотренные полигоны отличаются друг от друга по ряду технических показателей. Для сравнения были рассмотрены *AL-Batain Industries Tower Testing Station* (Саудовская Аравия) *Butibori Tower Testing Station* (Индия), *Niroo research institute Tower Testing Station* (Иран), Америки: *DAMP Electric Tower Testing Station* (Бразилия), *Bramental Tower Testing Station* (Бразилия, США), Европы: Испытательный полигон башенных сооружений ООО «ОРГРЭС» (Российская Федерация), *Tower Research And Testing Centre*, (Испания), *ABB Corporation Tower Testing Stations* (Германия, Италия), *CELPI Tower Testing Station* (Румыния).

Фото некоторых известных в мире полигонов с расположением испытываемых конструкций опор ВЛ показаны на рис. 1:

а) Полигон в Германии (г. Манхейм)

б) Полигон в Италии (г. Ливорно)

в) Полигон в России (г. Хотьково)

г) Полигон в США (штат Техас)

Рис. 1. Наиболее известные испытательные полигоны мира

Изученные методики моделирования статической нагрузки, действующей на опору, представляют ее в виде единственной равнодействующей поперечной силы, которая фактически не отражает в полной мере реальную картину действующих на опору нагрузок. В качестве альтернативных вариантов моделирования были рассмотрены варианты испытаний многогранных опор на Полигоне испытаний опор линий электропередачи и башенных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (рис. 2) и в Университете Северной Каролины, США (рис. 3) [16; 17].

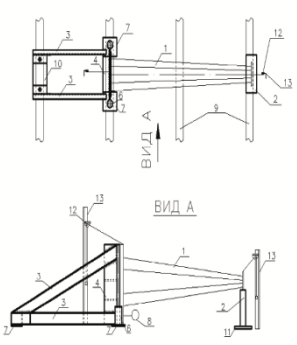

Рис. 2 Схема экспериментальной установки Донбасской национальной академии строительства и архитектуры

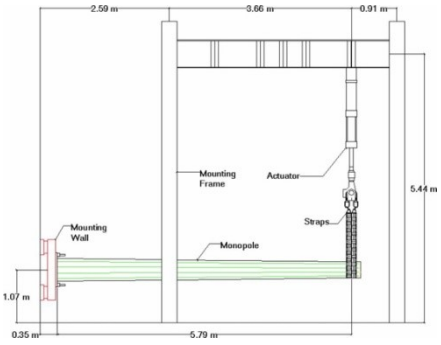

Рис 3. Испытательный стенд, Университет Северной Каролины, США

Для учета воздействия всех прикладываемых нагрузок была предложена уникальная методика и изготовлена установка, которые позволяют наиболее точно смоделировать действующие статические нагрузки и обеспечивают простоту загружений в процессе испытания [14; 15].

В ходе разработки методики испытаний по заказу завода изготовителя опор был спроектирован и изготовлен стенд для проведения испытаний ИС-1 (рис. 4).

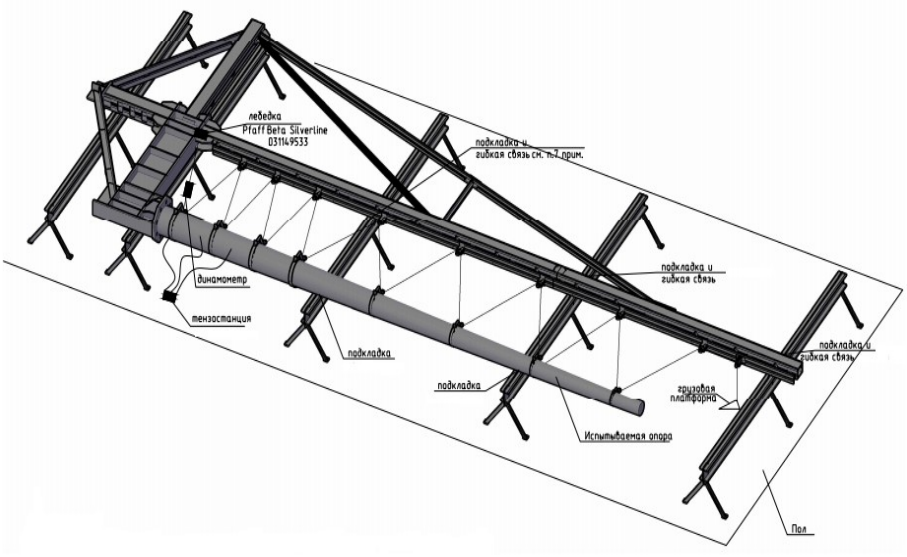

Рис. 4. Общий вид испытательного стенда ИС-1

Целью испытания опоры является определение ее фактической несущей способности и жесткости, а также определение соотношения этих параметров с результатами расчета [14; 15].

Методика была апробирована на многогранной опоре ОГК-7, с фланцевым соединением основания опоры с элементами фундамента. Исследование опоры ОГК-7 проводилось на испытательном полигоне ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». На рис. 5 показана установка тензодатчиков на опоре, на рис. 6 – испытания опоры на стенде ИС-1, на рис. 7 – характер разрушения опоры.

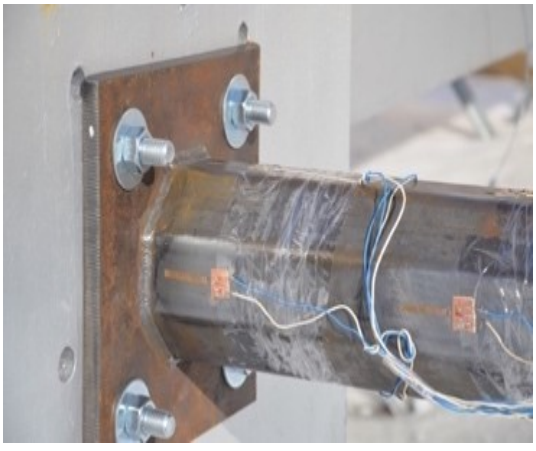

Рис. 5. Установка тензодатчиков на опоре

Рис. 6. Испытание опоры ОГК-7 на стенде ИС-1

Рис. 7. Опора ОГК-7 после испытания

Для получения данных о напряженно-деформированном состоянии при натурном испытании на стенде ИС-1 был использован автоматический электронный измеритель деформаций АИД-4. Нагрузки на опору прикладывались мерными грузами через грузовую площадку. Тензодатчики на опоре ОГК-7 7 высотой 7 м были установлены в пиках напряжений согласно изополям напряжений, полученным численно на программном комплексе *Autodesk Simulation*. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований представлено в таблице.

Таблица

Сравнение результатов испытания опоры ОГК-7

№ точки испытания	Напряжение по Мизесу Рм (МПа), при результирующей нагрузке, P*i* МПа									
	Результаты моделирования на *Autodesk Simulation*					Результаты испытания на стенде ИС-1				
	50	**100**	**150**	**200**	**250**	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**
1	75	113,6	152,1	190,8	229,4	72	100	148	182,3	225,4
2	10,7	16	21,2	26,6	31,9	10	14	18,9	25,6	29,9
3	7,1	10,3	13,6	16,9	20,9	7	9,8	13,01	15,4	18,1
4	115,7	174,7	233,7	287,7	351,7	103	165	220	274,3	349,5
5	75,2	112,4	149,7	187	224,3	72	111	139,6	187	220,8
6	3,2	4,1	4,9	5,7	6,6	3,3	3,8	5,01	5,8	6,8
7	120	179,1	238,3	297,4	356,5	105	165	220,5	280	338
8	21,1	31,3	41,5	51,8	62	20	29,7	38,2	48,8	58,9

Проведенные исследования показали, что предложенная методика испытания опор позволяет смоделировать действующие на опору нагрузки и обеспечить простоту ее загружений в процессе испытания.

Результаты испытаний по предложенной методике на стенде ИС-1 показали хорошую сходимость теоретических значений напряжений и деформаций с экспериментальными. Значения указанных параметров отличались не более, чем на 7%. Как было отмечено ранее, наибольшее число нарушений в работе приходится на аварии вызванные гололёдообразованием. В результате налипания льда возникают массовые обрывы проводов, поломка опор ВЛ. По мнению авторов одним из факторов, обусловивших эти аварии, является недоучет динамических нагрузок при проектировании опор ВЛ, а также

проведение их испытаний в статических режимах, при том что нагрузки в динамических режимах могут превосходить статические почти в два раза.

На рис. 8 в качестве примера показано каскадное разрушение анкерного пролета ВЛ 330кВ на территории Крыма, произошедшее в зимний период 2009 г. В статье отмечено, что причинами, вызвавшими каскадное разрушение строительных конструкций, является превышение гололедноветровыми нагрузками расчетных значений, а также несовершенство конструкций опор.

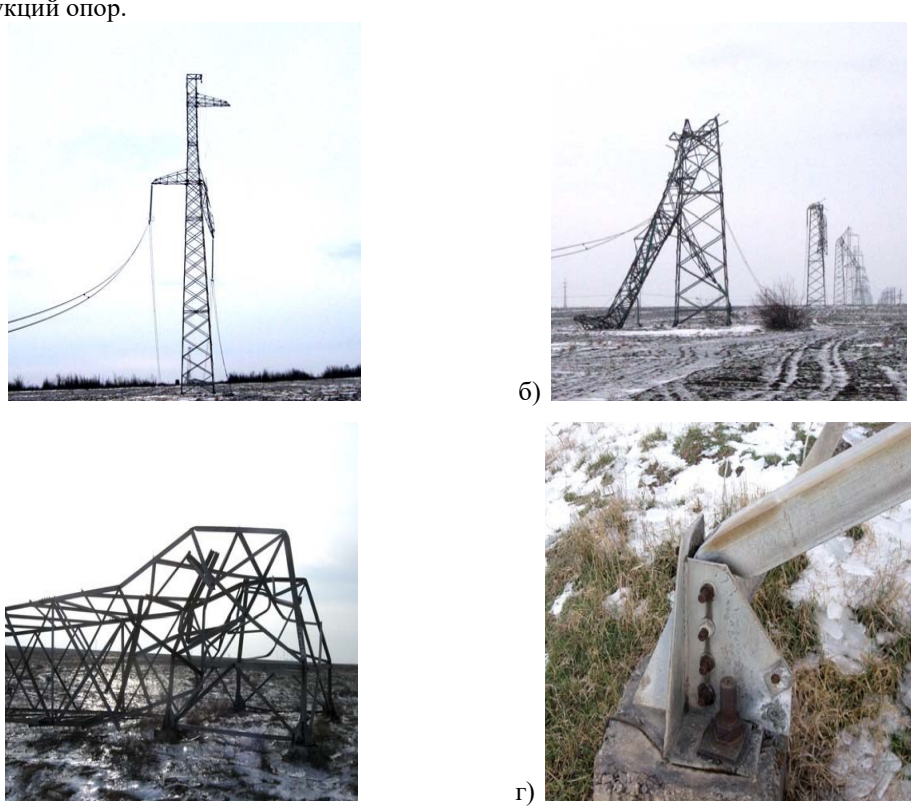

Рис. 8. Повреждения опор вследствие аварий на ВЛ 330 кВ:
а) при обрыве гирлянды изоляторов верхней траверсы;
б) каскадное разрушение опор в средней части ствола; *в*) излом поясов ствола опоры;
г) в месте болтового соединения пояса с базой

Указанные обстоятельства вызвали необходимость разработки способа динамических испытаний опор ВЛ.

Способ относится к энергетическому строительству, а именно к способу динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи, который позволяет определить влияние динамических нагрузок, связанных, например, с обрывом проводов вследствие гололедных аварий или усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима, на прочность и деформативность опор.

Технический результат от применения нового способа заключается в обеспечении динамических испытаний единой системы опор, моделирующей реальный анкерный участок для определения их динамических характеристик. Способ испытаний основан на объединении опор упругими механическими связями, выполненными в виде тросовых тяг со встроенными пружинами растяжения. Представленная схема моделирования проводов позволяет определить динамические характеристике системы опор как в расчетных условиях, так и в аварийных режимах, вызванных воздействием гололедных нагрузок, превышающих предельные значения, включающих разрушение конструкций опор.

На рис. 9 показана схема стенда для динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи.

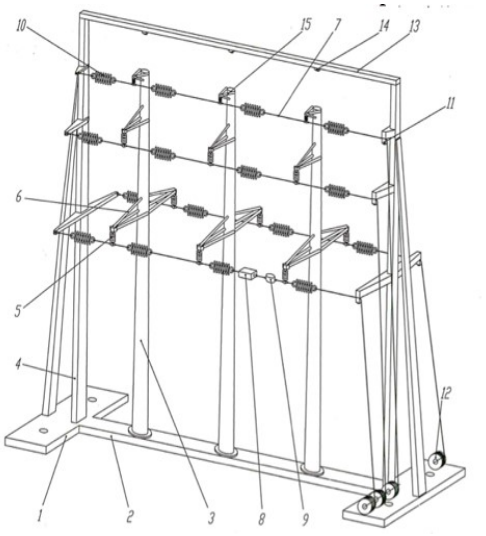

Рис. 9. Схема стенда для динамических испытаний опор ВЛ
1 – силовая прямоугольная рама; *2* – основание силовой рамы; 3, 15 – испытуемые опоры;
4 – боковые стойки; *5* – изоляторы; *6* – траверсы; *7* – тросовые тяги;
8 – калиброванные вставки; *9* – динамометр; *10* – пружины растяжения; *11* – блоки;
12 – лебедки; *13* – верхняя балка рамы; *14* – датчики перемещения

Разработанный способ основан на впервые предложенной концепции контроля опор ВЛ при их динамическом нагружении, которая заключается в проведении динамических испытаний единой системы опор, устанавливаемых в силовой раме компактной установки. Система опор моделирует анкерный участок ВЛ, опоры которого объединены упругими механическими связями, выполненными в виде тросовых тяг со встроенными в них пружинами растяжения, являющимися упругими эквивалентами проводов.

Предложенная концепция контроля опор ВЛ при их динамическом нагружении является предпосылкой общетеоретического подхода к изучению напряженно-деформированного состояния конструкций опор под воздействием динамических нагрузок, совершенствованию методик расчета новых конструкций опор и объективной оценки их соответствия требованиям надежности и долговечности.

Литература

1. Афанасьев А.С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: Учебник для СПТУ. М.: Транспорт, 1988. 264 с.

2. Подольский В.И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика. Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2007. 152 с.

3. Селедцов Э.П., Баранов Е.А. Эксплуатация опор контактной сети. М.: Транспорт, 1970. 96 с.

4. Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С., Исаев А.В. Конструкции с соединениями стальных труб разного диаметра: монография для аспирантов и студентов, строительных и машиностроительных специальностей вузов. Казань: КГАСУ, 2012. 123 с.

5. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Анализ результатов, полученных при механических испытаниях фрагментов опор электрического транспорта //Материалы 14-й международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика», г. Пенза, 2014. С. 42–45;

6. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Гатиятов И.З. Экспериментальные исследования узлов соединения труб разного диаметра в опорах контактных сетей электротранспорта // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 90–95.

7. Патент №2288399 РФ. Узел соединения труб / И.Л. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.С. Сабитов. Заявл. 07.04.2005; опубл. : 27.11.2006. Бюл. № 18. 2007.

8. Патент №2337268 РФ. Способ соединения труб разного диаметра / И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов, А.В. Исаев. Л.С. Заявл. 28.03.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.

9. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Определение напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей городского электрического транспорта // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2015. С. 37–40.

10. Брудка Ян. Трубчатые стальные конструкции. Пер. с польского. М; 1975, 207 с.

11. СНиП II-23-81. Стальные конструкции. М.: ГУП ЦПП, 2001. 96 с.

12. Гатиятов И.З., Хамидуллин И.Н., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Исследование напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей электрического транспорта // Энергетика Татарстана. 2015. № 2 (38). С. 57–62.

13. Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р., Сабитов Л.С. Разработка конструкций стенда и методики испытаний стальных многогранных опор. Казань: КГАСУ, 2013.

14. Пат. № 2554285 от 01.11.2013. Российская Федерация: МПК G01 M 5/00. Способ испытания опор / Л. Р. Гимранов, И. Л. Кузнецов, Л. С. Сабитов. Опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.

15. Гатиятов И.З., Хамидуллин И.Н., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Методика и результаты испытаний опор на специальном стенде ИС-1 // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 70–75.

16. Васылев В.Н., Гаранжа И.М. Методика экспериментальных исследований работы многогранных гнутых стоек (МГС) в опорной зоне опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи // Журнал «Металлические конструкции». 2010. Т. 16, № 1. С. 51–60 .

17. Lanier, B.K. (2005), “Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism,” M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.

18. Сабитов Л.С., Гатиятов И.З., Исханов Р.М., Патрушев Г.А., Кашапов Н.Ф. Способ динамических испытаний опор воздушных линий электропередачи // Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы. – 2017» Казань. В двух частях. Ч. 1. С. 139–141.

Авторы публикации

Гатиятов Ильнур Зиннурович – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» (ЭКС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Сабитов Линар Салихзанович **–** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), доцент Казанского (Приволжского) федерального университета.

References

1. Afanas’yev A.S. Kontaktnyye seti tramvaya i trolleybusa: Uchebnik dlya SPTU. M.: Transport, 1988. 264 p.

2. Podol’skiy V.I. ZHelezobetonnyye opory kontaktnoy seti. Konstruktsii, ekspluatatsiya, diagnostika. Trudy VNIIZHT. M.: Intekst, 2007. 152 p.

3. Seledtsov E.P., Baranov E.A. Ekspluatatsiya opor kontaktnoy seti. M.: Transport, 1970. 96 p.

4. Kuznetsov I.L., Sabitov L.S., Isayev A.V. Konstruktsii s soyedineniyami stal’nykh trub raznogo diametra: monografiya dlya aspirantov i studentov, stroitel’nykh i mashinostroitel’nykh spetsial’nostey vuzov. Kazan’: KGASU, 2012. 123 p.

5. Gatiyatov I.Z., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Analiz rezul’tatov, poluchennykh pri mekhanicheskikh ispytaniyakh fragmentov opor elektricheskogo transporta //Materialy 14-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Effektivnyye stroitel’nyye konstruktsii: teoriya i praktika», g. Penza, 2014. P. 42–45;

6. Sabitov L.S., Kuznetsov I.L., Gatiyatov I.Z. Eksperimental’nyye issledovaniya uzlov soyedineniya trub raznogo diametra v oporakh kontaktnykh setey elektrotransporta // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2014. No. 6 (47). P. 90–95.

7. Patent RF No. 2288399, RF. Uzel soyedineniya trub / I.L. Kuznetsov, A.V. Isayev, L.S. Sabitov. Zayavl. 07.04.2005; opubl. : 27.11.2006. Byul. No. 18. 2007.

8. Patent RF No. 2337268, RF. Sposob soyedineniya trub raznogo diametra / I.L. Kuznetsov, L.S. Sabitov, A.V. Isayev. L.S. Zayavl. 28.03.2007; opubl. 27.10.2008. Byul. No. 30.

9. Gatiyatov I.Z., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Opredeleniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya opor kontaktnykh setey gorodskogo elektricheskogo transporta // Goroda Rossii: problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya, blagoustroystva i ekologii: sbornik statey XVII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / MNITS PGSKHA. Penza: RIO PGSKHA, 2015. P. 37–40.
10. Brudka YAn. Trubchatyye stal'nyye konstruktsii. Per. s pol'skogo. M; 1975, 207 p.
11. SNiP II-23-81. Stal'nyye konstruktsii. M.: GUP TSPP, 2001. 96 p.
12. Gatiyatov I.Z., KHamidullin I.N., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya opor kontaktnykh setey elektricheskogo transporta // Energetika Tatarstana. 2015. No. 2 (38). P. 57–62.
13. Kuznetsov I.L., Gimranov L.R., Sabitov L.S. Razrabotka konstruktsiy stenda i metodiki ispytaniy stal'nykh mnogogrannykh opor. Kazan': KGASU, 2013.
14. Pat. № 2554285 ot 01.11.2013. Rossiyskaya Federatsiya: MPK G01 M 5/00. Sposob ispytaniya opor / L. R. Gimranov, I. L. Kuznetsov, L. S. Sabitov. Opubl. 27.06.2015. Byul. No. 18.
15. Gatiyatov I.Z., KHamidullin I.N., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L. Metodika i rezul'taty ispytaniy opor na spetsial'nom stende IS-1 // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2015. No. 5 (52). P. 70–75.
16. Vasylev V.N., Garanzha I.M. Metodika eksperimental'nykh issledovanih raboty mnogogrannykh gnutykh stoyek (MGS) v opornoĭ zone opor vozdushnykh linih (VL) elektroperedachi // ZHurnal «Metallicheskiye konstruktsii». 2010. Vol.. 16, No. 1. P. 51–60 .
17. Lanier, B.K. (2005), "Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism," M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC
18. Sabitov L.S., Gatiyatov I.Z., Iskhanov R.M., Patrushev G.A., Kashapov N.F. Sposob dinamicheskikh ispytaniy opor vozdushnykh liniy elektroperedachi // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i materialy. – 2017» Kazan'. V dvukh chastyakh. Ch. 1. P. 139–141.

Authors of the publication

Ilnur Z. Gatiyatov– senior lecturer of the Department "Electrotechnical complexes and systems" FSBEI "Kazan state power emerging University".

Linar S. Sabitov *– PhD, associate Professor, associate Professor of the Department Of "energy supply of enterprises and energy saving technologies", KAZAN state energy University, associate Professor Kazan (Volga region) Federal University.*

Поступила в редакцию ***04 мая 2018 г.***