

УДК 621.45.018.2 : 629.4.018 : 620.169.1 :

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СПЕЦИАЛЬНОГО СТЕНДА ИС-1 ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОПОР КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

И.З. Гатиятов, Л.С. Сабитов

Казанский государственный энергетический университет
gatiyatov-iz@ya.ru

Резюме: В статье представлена разработанная методика испытания опор контактных сетей электрического транспорта на спроектированном стенде ИС-1. Описана методика испытания. Представлены результаты натурных испытаний.

Ключевые слова: опора контактной сети, соединение трубчатых стержней, электрический транспорт, численные исследования, напряженно-деформированное состояние опор, стенд ИС-1, методика испытания, натурные испытания.

DEVELOPMENT OF METHODS AND SPECIAL STAND IS-1 FOR TESTING OF SUPPORTS OF THE CONTACT NETWORKS OF ELECTRIC TRANSPORT

I.Z. Gatiyatov, L.S. Sabitov

Kazan state power engineering University
gatiyatov-iz@ya.ru

Abstract: The power supply of urban electric and railway transport is a complex multi-level system, consisting of a large number of devices, among which the most important is the contact network.

One of the main elements of a contact network are the supports (poles), providing a specified position of a catenary in the plan and profile above the roadway, thereby implementing a transmission rolling stock and the reliability of the current collection.

The main and important issue is ensuring strength, reliability and less complexity of connecting pipes of different diameters in their manufacture.

To take account of the effect of all applied loads, the authors proposed a unique method and made a special stand is-1, which allow to accurately simulate operating loads and provides ease of load cases in the test process

The studies showed that the proposed method of testing poles is the most accurate method to simulate the load acting on it and provides easy loading support in the testing process.

Held on the proposed methodology of field tests of serial support OGK-7 on a specially made stand is-1 showed a good convergence of the theoretically calculated values of stresses and strains with the experimental ones (discrepancy does not exceed 7%).

Key words: support contact network, the connection of tubular rods, electric transport, numerical analysis, stress-strain state supports, the bench is-1, methods of testing, field tests

Электроснабжение городского электрического и железнодорожного транспорта представляет собой сложную многоуровневую систему, состоящую из большого числа устройств, среди которых важнейшее место занимает контактная сеть. Специфика

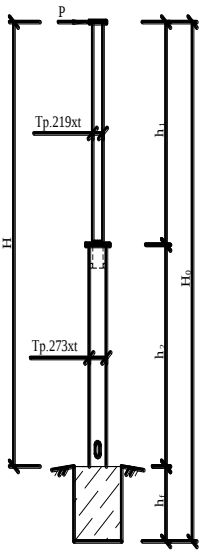
контактной сети заключается в отсутствии резерва в виде дублирующих устройств, а обслуживание ее затруднено потоками транспорта и пешеходов, особенно в условиях интенсивного движения. Следовательно, устройству контактной сети необходимо уделять особое внимание, учитывая тот факт, что повреждение любого элемента может привести к выводу из работы большого участка сети, что повлечет за собой дезорганизацию движения не только электрического, но и другого транспорта [1, 2].

Одним из основных элементов контактной сети являются опоры, обеспечивающие заданное положение контактной подвески в плане и профиле над дорожным полотном, благодаря чему реализуется передача электроэнергии подвижному составу и надежность токосъема. Из-за отсутствия их резервируемости они напрямую влияют на непрерывность технологического процесса перевозок, а в случае разрушения создают угрозу нарушения безопасности движения и жизни людей [3].

В конструкциях опор контактных сетей электротранспорта, опор освещения, рекламных конструкций и других видов опор, типоразмеры которых приведены в табл. 1, применяются трубчатые стержни различной конфигурации. В процессе производства возникает необходимость соединения отдельных звеньев труб разного диаметра между собой [4].

Таблица 1

Типоразмеры унифицированных опор контактной сети.

№ п/п		Норм. горизонт. нагрузка, кг	Геометрические размеры, м				
			H	h ₁	h ₂	h _f	H ₀
1		600	9,5	4,75	4,75	2,0	11,5
2		900					
3		1200					
4		1200	10,0	5,0	5,0	2,5	12,5
5		1200	12,5	6,25	6,25	2,5	15

Главным и важным вопросом является обеспечение прочности, надежности и меньшей трудоемкости соединения труб разного диаметра при их изготовлении [4,10].

Эксплуатация и многолетняя практика выявили существующие проблемы в таких опорах (рис.1).

Для решения этих проблем были предложены новые конструктивные решения узлов соединения труб разного диаметра, на которые были получены патенты РФ [7, 8]. Важной задачей было изучение действительной работы и определение фактического напряжённо-

деформированного состояния узлов соединений фрагментов опор контактных сетей электротранспорта.

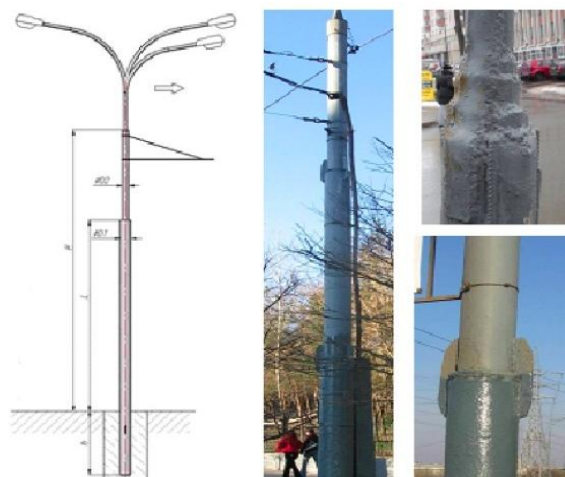
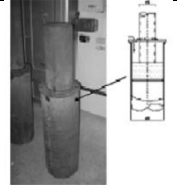


Рис. 1. Общий вид опоры контактной сети электротранспорта и характерные дефекты в их узлах соединения

Для достижения поставленной цели были изготовлены три опытных образца с различными видами узловых решений: соединение посредством торцевой фасонки (образец 1); соединение труб разного диаметра, осуществленное заполнением бетона в кольцевую полость (образец 2) [7]; соединение «труба в трубе» при помощи щелевых прорезей на сварке (образец 3) [8]. Общий вид, характеристики материала и сечений испытываемых образцов представлены в табл. 2. Экспериментальные исследования выполнялись на натурных образцах. Образцы представляли собой варианты узловых соединений труб разного диаметра двухзвеньевой опоры.

Таблица 2

Характеристики сечений и материала образцов

Параметры	 Образец 1	 Образец 2	 Образец 3
Нижнее звено труба 325x10 ГОСТ 10706-76*	длина трубы,		
	800	800	800
Верхнее звено труба 219x9 ГОСТ 10704-91	длина трубы,		
	800	450	450
Торцевая фасонка	10	8	8
Вид соединения труб	Трубы стыкуются без заделки посредством торцевой фасонки	Полость заполнена бетоном	Сквозь прорези наложена сварка (6 шт.)

Испытания проводились на прессе УММ-200№107 (ГОСТ 25.06762-76) поэтапным нагружением до полного разрушения образцов. Образцы укладывались на две опоры и

загружались ступенями сосредоточенной силой $0,2F_n$, где F_n – теоретическая разрушающая нагрузка для соответствующего образца.

$$F_1^* = \frac{4W \times R_{wf} \cdot \gamma_c}{l} = \frac{4 \times 299,5 \times 1848 \times 0,95}{80} = 26287 \text{ кг} = 26,3 \text{ т}, \quad (1)$$

F_1^* – теоретическая разрушающая нагрузка для первого образца, где $W = 299,5 \text{ см}^3$; $R_{wf} = 1848 \text{ кг/см}^2$ – расчётное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва

$$F_{2,3}^* = \frac{4W \cdot R_y \cdot \gamma_c}{l} = \frac{4 \times 299,5 \times 2400 \times 0,95}{80} = 34139 \text{ кг} = 34,1 \text{ т}, \quad (2)$$

$F_{2,3}^*$ – теоретическая разрушающая нагрузка для второго и третьего образца, где $W = 299,5 \text{ см}^3$, $R_y = 2400 \text{ кг/см}^2$ – расчётное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести.

Для определения напряжённого состояния по поверхности труб обоих диаметров наклеивались электротензорезисторы, которые подключались к цифровой тензостанции ММТС-64.01. Общая схема испытания образцов и расположение измерительных приборов показаны на рис. 2 [9, 11, 12].

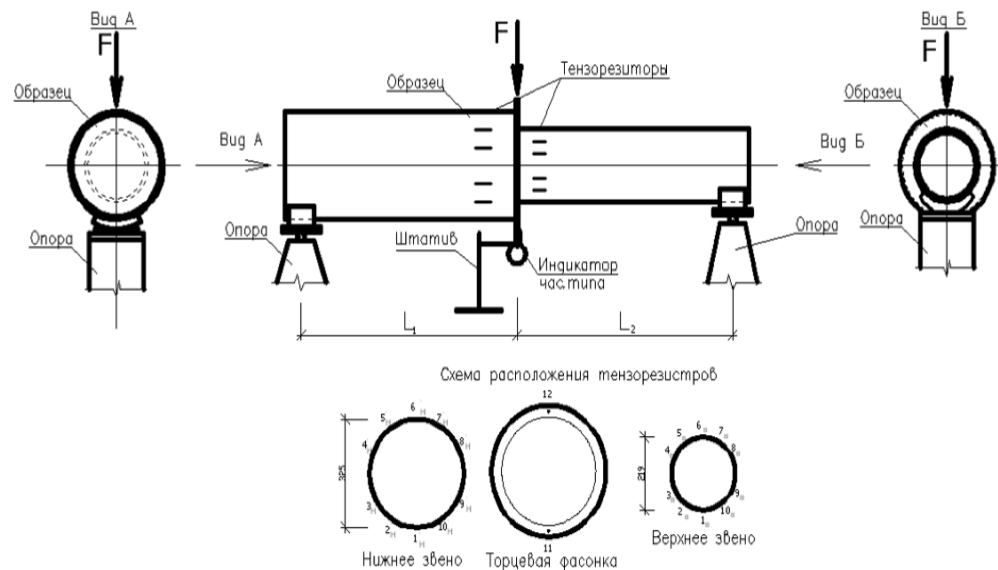


Рис. 2. Схема испытания образцов и расположение измерительных приборов

Сравнивая напряжения, полученные экспериментальным путём, с напряжениями, полученными при расчёте по МКЭ в ПК ANSYS (рис.4), мы видим, что полученные результаты по МКЭ меньше экспериментальных и расхождение составляет примерно 1,5 – 7%. Далее сравнивая экспериментальные и данные, полученные по инженерной методике, видим расхождение 7–20,6%.



Рис. 3. Натурные образцы узлов соединения двухзвеньеовой опоры после испытания

Анализ результатов испытания показал хорошую их сходимость с результатами теоретических расчётов, выполненных по ПК «Лира», ANSYS [5, 6].

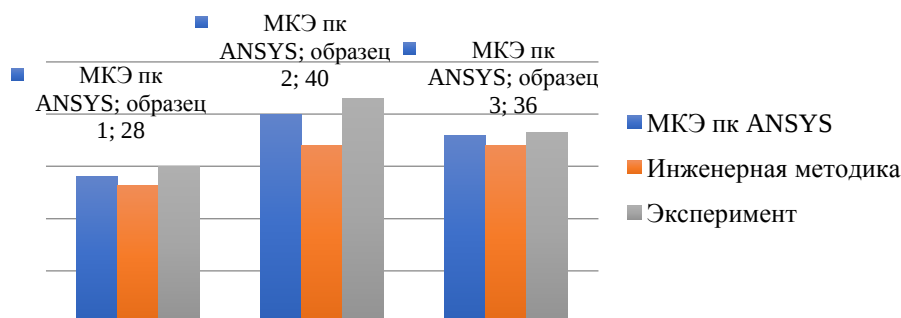


Рис. 4. Сравнение результатов расчёта по МКЭ, инженерной методике и экспериментальных

Проведенные механические испытания фрагментов опор контактной сети электрического транспорта не дают полной картины напряженно-деформированного состояния всей конструкции. Эти испытания направлены только для иллюстрации эффективности предложенных узлов соединения труб разного диаметра [7, 8].

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.

Изученные авторами методики моделирования 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. 5) и в Университете Северной Каролины, США (рис. 6) [16, 17]

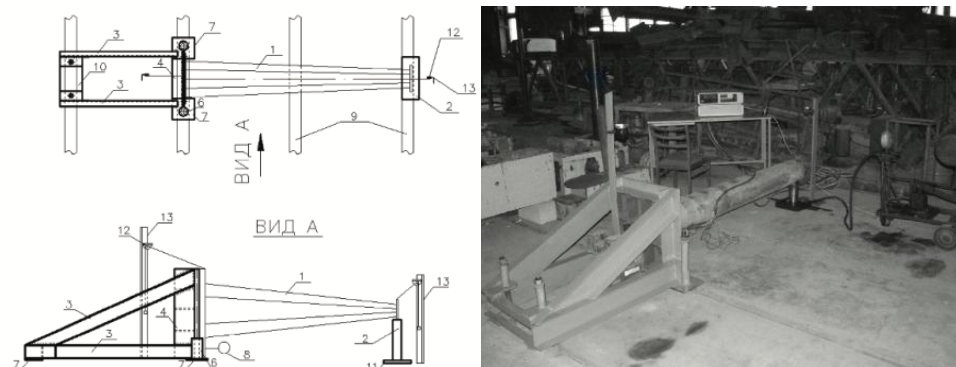


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: (1 — испытательный образец МГС; 2 — гидравлический домкрат ДГ-20; 3 — контрфорсы; 4 — система ребер жесткости; 5 — опорная плита крепления МГС; 6 — переходные элементы для крепления опорной плиты к силовому полу; 7 — металлические подкладки; 8 — индикатор часового типа; 9 — силовой пол; 10 — поперечное соединение контрфорсов; 11 — опонная тумба под домкрат ДГ-20; 12 — прогибомеры Максимова; 13 — опорные стойки крепления прогибомеров

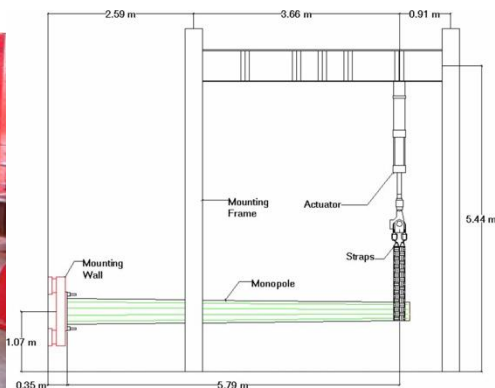


Рис. 6. Испытательный стенд в университете Северной Каролины, США

С целью учета воздействия всех прикладываемых нагрузок, авторами была предложена уникальная методика и изготовлен специальный стенд ИС-1 (рис. 7), который позволяет наиболее точно смоделировать действующие нагрузки и обеспечивает простоту загрузений в процессе испытания [14, 15].

Отличие методики испытания и конструкции стенда в горизонтальном положении испытуемой опоры [15]

Цель испытаний — определение фактической несущей способности и жесткости опоры, и сопоставление этих параметров с результатами теоретических расчетов [6].

Испытания проводятся в несколько этапов [13]:

1. Выбор образца.
2. Определение значений испытательной нагрузки и расстановка блоков по длине опоры.
3. Подготовка стенда и опоры.
4. Процесс проведения испытаний.

5. Анализ результатов натурных испытаний

В качестве натурального образца рассмотрим опору ОГК-7 (рис. 8).

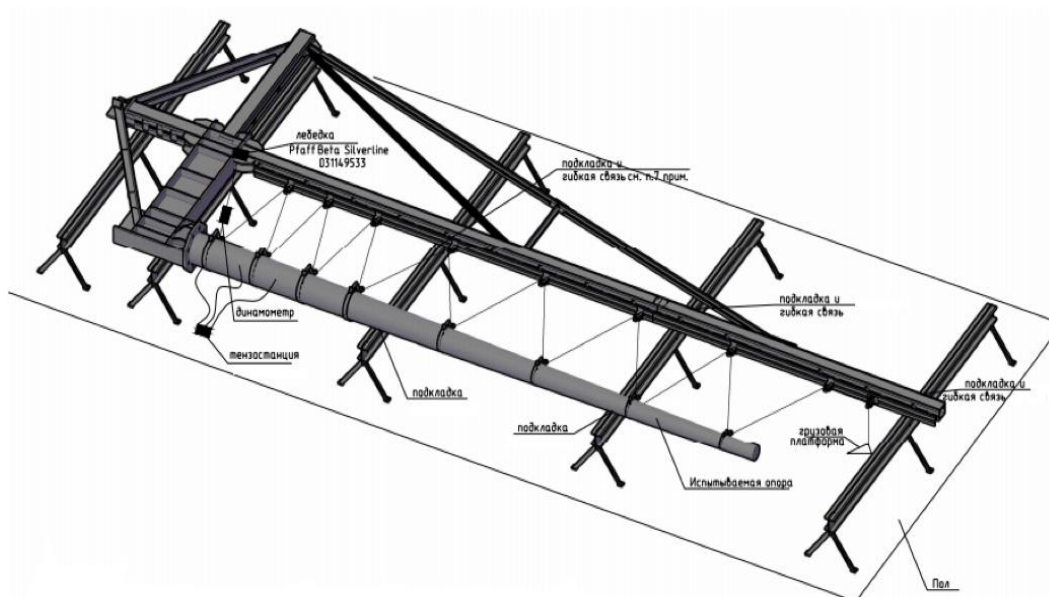


Рис. 7. Испытательный стенд ИС-1

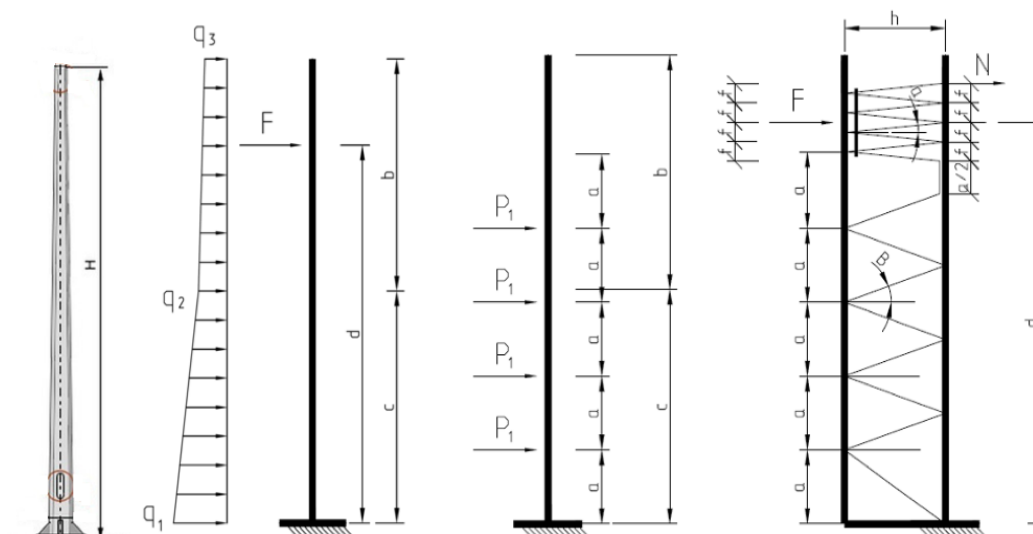


Рис. 8. Геометрические параметры опоры ОГК-7

Параметры для расчета:

q_1 – погонная ветровая нагрузка на опору на отм. 0,000 с учетом грузовой площади опоры;

q_2 – погонная ветровая нагрузка на опору на отм. 3,000 с учетом грузовой площади опоры;

q_3 – погонная ветровая нагрузка на опору на отм. 7,000 с учетом грузовой площади опоры;

принимая, что $q_1 > q_2 > q_3$, поскольку опора переменного сечения с отношением верхнего диаметра к нижнему более 1,6;

F – локальное расчетное усилие, прикладываемое в заданной точке;

d – расстояние от точки приложения усилия F до заделки;

P – нагрузка на блок в эксперименте;

n – количество блоков, заменяющих нагрузки q_1, q_2, q_3 , (блоки, моделирующие усилие F не учитываются);

N – усилие в тросе (вес балласта в грузовой платформе);

h – расстояние между осями блоков на стенде и на испытываемой опоре;

Принцип получения стендовой нагрузки состоит в следующем:

- нагрузки q_1, q_2, q_3 приводятся к стендовой нагрузке P , расположенной с шагом a ;
- усилие F прикладывается с помощью равнодействующего усилия от двух блоков, расположенных на расстоянии $2f$ от друга при расположении отметки приложения силы F равноудаленно на расстояние f между этими двумя блоками (рис. 8).

Усилие в тросе (грузового балласта в платформе) при 4-х блоках, заменяющих локальное усилие, необходимо производить по формуле

$$N = \frac{F}{8 \cos \alpha}, \quad (3)$$

$$\text{где } \cos \alpha = \frac{h}{\sqrt{f^2/4 + h^2}}.$$

Момент, заменяющий в заделке погонную ветровую нагрузку, определяется по формуле

$$M_{\text{экв}} = \frac{1}{6} [(q_1 + 2q_2)c^2 + (q_2 + 2q_3)b^2 + 3(q_2 + q_3)bc]. \quad (4)$$

Шаг расстановки блоков равен:

$$a = \frac{8hM_{\text{экв}}}{\sqrt{F^2(f^2 + h^2)(n^2 + n)^2 - 16M_{\text{экв}}^2}}. \quad (5)$$

Описанный метод был апробирован натурными испытаниями металлической многогранной опоры ОГК-7.

Натурному обследованию предшествовал теоретический расчет программного продукта *Autodesk Simulation*, в котором была смоделирована опора ОГК-7 и исследованы зоны, которые являются наиболее напряженными (рис. 9).

Данные о напряженно-деформированном состоянии опоры при натурном испытании на стенде ИС-1 (рис. 10, 11) получали с помощью автоматического электронного измерителя деформаций АИД-4. Нагрузки прикладывались мерными грузами через грузовую площадку (рис. 7). Тензорезисторные датчики на опоре устанавливались в пиках напряжений согласно изополям напряжений, полученным с помощью *Autodesk Simulation*. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований, представленных в табл. 3, показало хорошую сходимость (расхождение не более 7%).

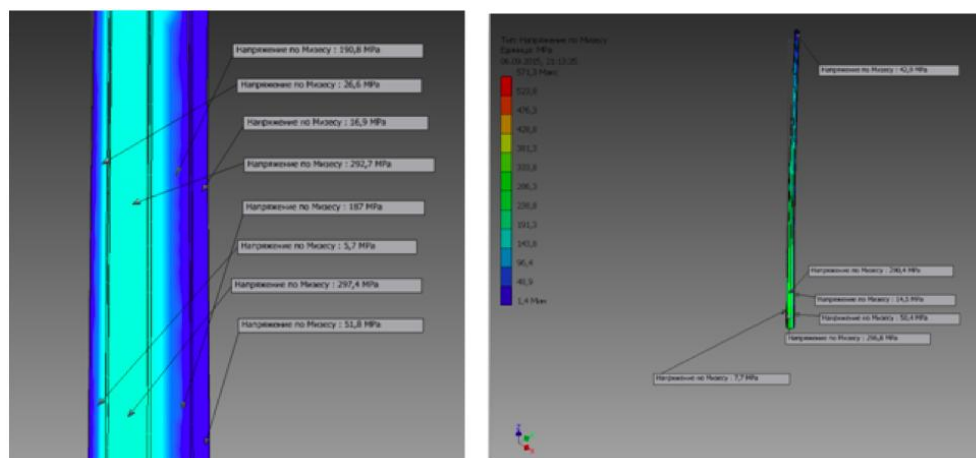


Рис. 9. Моделирование механических нагрузок на опоре ОГК-7 на Autodesk Simulation

Таблица 3

Сравнение результатов испытания опоры ОГК-7

№ Точки испытания	Напряжение по Мизесу при результирующей нагрузке, МПа									
	Результаты моделирования Autodesk Simulation					Результаты испытания стенд 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



Рис.10. Испытание опоры ОГК-7 на стенде ИС-1 (Испытательный полигон КГЭУ, июль 2015г.)



Рис.11. Характер разрушения опоры ОГК-7

Выводы

1. Выполненные исследования показали, что предлагаемая методика испытания опор позволяет наиболее точно смоделировать действующие на неё нагрузки и обеспечивает простоту загрузки опоры в процессе испытания.

2. Проведенные по предложенной методике натурные испытания серийной опоры ОГК-7 на специально изготовленном стенде ИС-1 показали хорошую сходимость теоретически рассчитанных значений напряжений и деформаций с экспериментальными (расхождение не превышало 7%).

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. 96с.
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. Пат.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. 4 с.
8. Пат.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. 4 с.
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. Исследование напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей электрического транспорта / И.З. Гатиятов, И.Н. Хамидуллин, Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов // 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. Российская Федерация: МПК G01 М 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 // Металлические конструкции 2010. N1, Т.16 (2010). 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.

Авторы публикации

Гатиятов Ильнур Зиннурович – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» (ЭТКС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: gatiyatov-iz@ya.ru

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

References

1. Afanas'ev A. S. the Contact network of tram and trolleybus: a Textbook for the vocational school. M.: Transport, 1988. - 264 p.
2. Podolsky V. I. reinforced Concrete supports of a contact network. Design, operation, and diagnostics // Proceedings of VNIIZHT. M: Intext, 2007. - 152 p.
3. Seledtsov E. P., Baranov, E. A., and Operation support of a contact network. M.: Transport, 1970. - 96 p
4. Kuznetsov I. L., Sabitov L.S., Isaev A. V. Structures with joints of steel pipes of different diameters: a Monograph for graduate and undergraduate students, construction and engineering specialties of universities/ Kazan: ksuae, 2012. - 123 S.
5. Gatiyatov I. Z. Sabitov, L. S., Kuznetsov I. L. Analysis of the results obtained in mechanical tests of the fragments supports electric transport //Materials of 14-th international scientific-technical conference "Effective building designs: theory and practice", town of Penza, 2014. - S. 42-45;
6. Sabitov, L. S., Kuznetsov I. L., Gatiyatov I. Z. an Experimental study of the connections of pipes of different diameters in supports of contact system of electric vehicle // Bulletin of civil engineers. 2014. - № 6(47). - P. 90-95.
7. RF patent №2288399, Russia. The node connecting pipes / I. L. Kuznetsov, A.V. Isaev, L. S. Sabitov. Appl. 07.04.2005; publ.: 27.11.2006. Bull. No. 18. - 2007. - 4.
8. RF patent №2337268, Russia. The method for connecting pipes of different diameter / I. L. Kuznetsov, L. S. Sabitov, A. V. Isayev. L. S. Appl. 28.03.2007; published. 27.10.2008. Bull. No. 30. 4 s
9. Gatiyatov I. Z. Sabitov, L. S., Kuznetsov I. L. Determination of stress-strain state of the supports of the contact networks of urban electric transport // Cities of Russia: problems of construction, engineering, landscaping and ecology: a collection of articles XVII International scientific-practical conference / mnic pgskha. - Penza: RIO pgskha, 2015. - P. 37-40.
10. Brodka Ian Tubular steel construction. Per. with the Polish. M; 1975, 207
11. SNIP II-23-81. Steel construction – Moscow, GUP tspp publ., 2001. – 96 p
12. Investigation of the stress-strain state of the supports of the contact networks of electric transport / I. Z. Gatiyatov, I. N. Khamidullin, L. S. Sabitov, I. L. Kuznetsov // Energetika Tatarstana. 2015. No. 2(38). S. 57-62.
13. Kuznetsov L. I., Gimranov L. R., Sabitov, S. L. the Development of stand structures and testing methods of steel multifaceted supports. Kazan: ksuae, 2013.
14. Pat. No. 2554285 from 01.11.2013. Russian Federation: MPK G01 M 5/00. Testing method supports / L. R. Gimranov, I. L. Kuznetsov, L. S. Sabitov. Publ. 27.06.2015. Bull. No. 18.
15. Gatiyatov I.Z., Khamidullin I. N., Sabitov, L. S., Kuznetsov I. L. Methodology and results of the test supports a special exhibit EC-1 // Bulletin of civil engineers. - 2015. - № 5 (52). - P. 70-75.

16. V. N. Vasilev I. M. Garanga Methodology of experimental research work is multi-faceted roll-formed racks (MGS) in the support area of the supports of air-lines (VL) transmission // Journal "Metal constructions" - 2010. N1, VOLUME 16 (2010) 51-60

Authors of the publication

Ilnur Z. Gatiyatov – senior lecturer of the Department "Electrotechnical complexes and systems FSBEI Kazan state power emerging University. E-mail: gatiyatov-iz@ya.ru.

Linar S. Sabitov - Ph. D., associate Professor of the Department Energy Supply companies and energy-saving technologies FSBEI Kazan state power emerging University.

Поступила в редакцию

09 февраля 2017 г.