

ПАО «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР»

**РАЗРАБОТКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 110 КВ
ИЗ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ СЕКЦИОНИРОВАННЫХ СТОЕК**

*Авторский коллектив:
Романов Петр Игоревич,
Туркина Ольга Викторовна,
Качановская Любовь Игоревна,
Касаткин Сергей Петрович.*

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ

Задача поиска конструктивных решений опор и фундаментов, позволяющих сократить затраты на строительство и эксплуатацию воздушных линий электропередачи, актуальна для разработчиков всех поколений.

Железобетонные конструкции по своей сути всегда дешевле металлических. Этот факт был использован немецкими инженерами, которые еще в 1934 г. построили несколько линий электропередачи напряжением 60 кВ на опорах из центрифугированных железобетонных стоек. Отдельные конструкции таких опор и сегодня находятся в эксплуатации в АО «Янтарьэнерго».

Основными преимуществами железобетонных опор по сравнению со стальными являются:

- простота монтажа (стойка опоры устанавливается в пробуренный котлован);
- стоимость изготовления и монтажа опор из центрифугированных стоек в 2,8 раза ниже этих показателей для решетчатых и в 1,6 раза для многогранных опор, рассчитанных на восприятие тех же нагрузок;
- стоимость строительства ВЛ с применением железобетонных опор в среднем на 20-30% ниже стоимости строительства ВЛ с применением стальных многогранных и решетчатых опор.

Этими факторами обусловлена экономическая эффективность их применения, которая явилась основанием для широкого внедрения в СССР серии унифицированных железобетонных опор напряжением 35 – 750 кВ в 1960-х годах.

Объективные данные о параметрах потока отказов воздушных линий, обработанные Открытым акционерным обществом «Фирма ОРГРЭС» в 2014 году, говорят о равной надежности и металлических и железобетонных опор.

Выход в свет седьмой редакции Правил устройства электроустановок (ПУЭ-7), в которой существенно повышены требования к надежности конструкций, привел к необходимости резкого сокращения пролетов типовых опор при их установке на трассу, то есть к увеличению количества опор, линейной арматуры и гирлянд изоляторов на каждый километр воздушных линий электропередачи.

Отдельные недостатки конструкции, выявленные за многие годы эксплуатации, были связаны:

- со сложностями при доставке на трассу длиномерных конструкций с фиксированной длиной (до 26 м);
- с повреждениями (разрушениями) стоек опор при доставке, не позволяющими их эксплуатировать;
- с проблемами в эксплуатации, вызванными скрытыми повреждениями стоек во время доставки;
- с необходимостью установки ригелей в грунтах с низкой несущей способностью, обусловленной невозможностью увеличения глубины заделки опор из-за фиксированной длины стоек.

Изучение опыта производства, строительства и эксплуатации железобетонных опор позволили разработчикам конструкций и заводским специалистам преодолеть все технологические и организационные проблемы путем разработки и внедрения в жизнь центрифугированных стоек в **секционированном варианте**.

Современные стойки, как и прежде, изготавливаются в конических или цилиндрических опалубках длиной 26 или 20 метров соответственно. Для сокращения расходов на перевозку длиномерных конструкций стойки делятся на секции, которые соединяются между собой на строительной площадке при помощи болтов.

Первым вариантом узла соединения секций был внешний фланец, привариваемый к элементам сек-

ций после распалубки. В процессе оптимизации узла соединения секций был разработан вариант внутреннего фланца, в котором все закладные элементы помещаются в опалубку перед центрифугированием. Это обеспечило выпуск полностью готового изделия сразу после распалубки стойки, отказавшись от приварки внешних фланцев после ее изготовления (рис. 1). Такое решение было проверено испытаниями известных (армированных по ГОСТ 22687.1-85) центрифугированных конических стоек длиной 26 м, выполненных в секционированном варианте.

Секционирование стоек позволило в 3-4 раза сократить время и затраты на их транспортировку.



Рис. 4. Общий вид смесителя.

В рамках Научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки (НИОКР) Публичного акционерного общества «Ленэнерго» (ПАО «Ленэнерго») специалисты Публичного акционерного общества «Федеральный испытательный центр» (ПАО «ФИЦ») и Научно-исследовательской лаборатории конструкций электросетевого строительства (НИЛКЭС) Общества с ограниченной ответственностью «ПО «Энергожелезобетонинвест» приступили к созданию опор нового поколения для воздушных линий напряжением 110 кВ (далее ВЛ 110 кВ).

Задача работы заключалась в разработке серии современных железобетонных промежуточных и анкерно-угловых опор в одноцепном и двухцепном вариантах.

В процессе выполнения НИОКР были пройдены следующие **этапы работы**:

1. Разработка комплектов конструкторской документации на железобетонные опоры ВЛ 110кВ из центрифугированных секционированных стоек.

2. Изготовление и испытание опытных образцов конструкций железобетонных опор ВЛ110кВ.

3. Разработка комплектов чертежей фундаментных секций, для железобетонных опор ВЛ110 кВ.

4. Выпуск альбома железобетонных опор ВЛ 110 кВ из центрифугированных секционированных стоек.

5. Разработка нормативно-технической документации.

6. Формирование интеллектуального портфеля и нематериальных активов путём патентования в России и за рубежом результатов разработок.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОПОР

Конструкции промежуточных и анкерных опор разработаны в двух вариантах: для подвески легких (АС 95/16, АС 120/19) и тяжелых (АС 150/24, АС 185/29, АС 240/32) марок проводов. Во всех вариантах в расчете принят грозозащитный трос — 9.2-МЗ-В-ОЖ-Н-Р.

Расчеты проведены для открытой местности (тип «А») на сочетание следующих климатических условий: районы по ветру — II (500Па), III (650Па), районы по гололеду — II (15 мм), III (20 мм). Конструкции разработаны для 1-3 степени загрязненности атмосферы для районов с умеренной интенсивностью пляски проводов. Региональные коэффициенты по ветру и гололеду приняты равными 1.0.

Разработано 23 типа опор, из них — 8 промежуточных и 15 — анкерно-угловых.

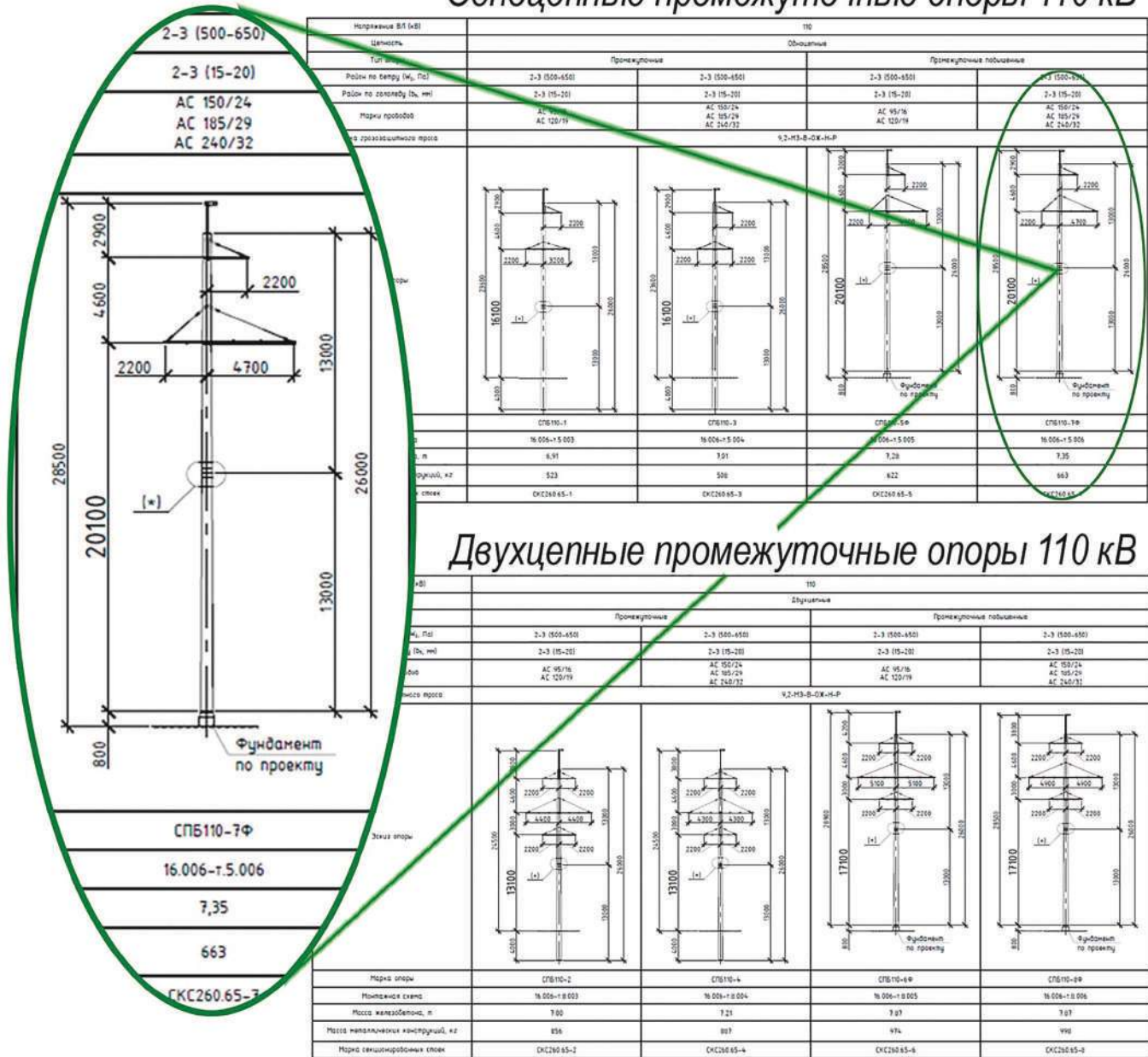
ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ОПОР

Промежуточные опоры изготавливаются на базе конических стоек в секционированном варианте в опалубке длиной 26 м. Верхний диаметр стоек 410, нижний — 650 мм. Секции имеют длину 13 м и соединяются между собой на строительной площадке при помощи фланцевых соединений на высокопрочных болтах.

Все промежуточные опоры — одностоечные свободностоящие. Обзорный лист промежуточных опор приведен на рис. 2.

Конструкции выполнены в двух вариантах: обычные — устанавливаемые путем погружения нижней части опоры в пробуренный котлован, и повышенные — устанавливаемые на фундамент. Установка на фундамент — это принципиально

Одноцепные промежуточные опоры 110 кВ



Двухцепные промежуточные опоры 110 кВ

Рис. 2. Обзорный лист промежуточных опор.

новое решение для железобетонных опор. Увеличение высоты подвеса нижних проводов позволяет увеличить габаритные пролеты и сократить количество опор на ВЛ. По этому параметру повышенные железобетонные опоры стали сопоставимы с металлическими (решетчатыми и многогранными) опорами. Стойки повышенных опор имеют в нижней своей части закладную деталь — фланец для соединения с фундаментом.

Увеличение расстояний между опорами и, соответственно, нагрузок от проводов и тросов

потребовало увеличения прочностных характеристик стоек опор. Эта задача была решена выбором системы армирования стоек с использованием современной канатной арматуры и бетонов повышенной прочности.

В отличие от ранее используемых стоек с показателями прочности В30, В40, в новых опорах применяется бетон В60. Плотность центрифугированного бетона всегда выше, чем у вибрированного. Если обычно, значение водонепроницаемости составляет для них соответственно W6 и W4, то в сов-

ременных условиях, при использовании специальных добавок в бетонную смесь, водонепроницаемость центрифугированных конструкций достигает W8-W16. При этом морозостойкость увеличивается не менее чем до марки F400. Все металлические элементы опор, включая закладные детали для соединения секций между собой и стойки с фундаментом, защищаются от коррозии при помощи горячего цинкования.

Такие показатели обеспечивают повышенную долговечность стоек. Срок службы железобетонных и многогранных опор теперь сопоставим: до 60-70 лет. За счет того, что исключается потребность в ремонтах на протяжении всего срока службы железобетонных опор, сокращаются и общие затраты на эксплуатацию ВЛ.

Анкерные опоры современного проекта разработаны на базе цилиндрических стоек диаметром 800 мм, изготавливаемых, как и для промежуточных опор, в секционированном варианте. Длина опалубки цилиндрических стоек равна 20 м. Обзорный лист анкерных опор приведен на рис 3.

Основной тип анкерных опор – одностоечные

свободстоящие конструкции, которые могут устанавливаться как в пробуренный котлован, так и, для увеличения высоты подвески проводов, на фундаменты.

Большое количество вариантов опор дает возможность выбора при проектировании для сокращения затрат на строительство линий.

В отличие от старых типовых проектов, в которых анкерные опоры были рассчитаны на максимально возможный угол поворота (обычно 60°), для каждой опоры настоящего проекта определены максимальные по несущей способности углы поворота ВЛ в зависимости от сочетания климатических условий, характеристик проводов и троса. Такой подход позволяет при расстановке опор по трассе не использовать тяжелые конструкции там, где можно обойтись их облегченным вариантом. Нагрузки на фундаменты приведены для каждой анкерной опоры с шагом 10° , что позволит оптимальным образом подобрать ее закрепление в зависимости от реального угла ее установки на трассе. Область применения анкерных опор приведена в таблице 1.

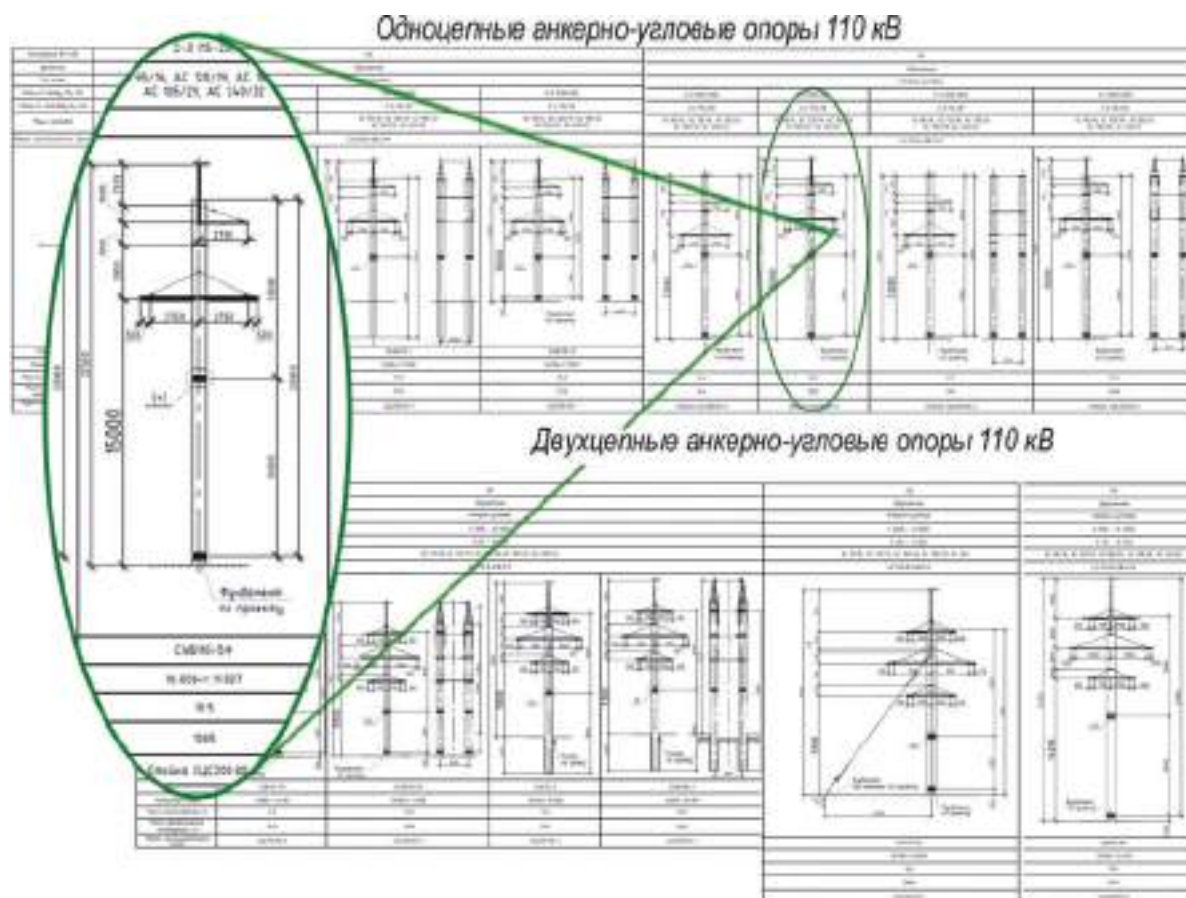


Рис. 2. Обзорный лист анкерно-угловых опор.

Таблица 1

Область применения одноцепных анкерно-угловых опор																						
Группа	Марка	АС 95/16		АС 100/18		АС 150/24		АС 95/28		АС 240/32												
		Максимальное напряжение при растяжении R_t и сжатии R_c в бетоне $\sigma_{\text{бет}}$, кг/см ²		13,6		13,65		13,81		13,85		12,11										
Группа	Марка	1,2-ФЗ-В-ОК-НР																				
		Максимальное напряжение, кг/см ²		21		25		40		43		46										
Работы по бетону / нормативные требования (объемы), По		II/300		III/400		II/500		III/600		II/700		III/800										
Работы по железобетону / нормативные требования (объемы), м		II/15		III/20		II/15		III/20		II/15		III/20										
Всплошь прокат, м		258	287	247	291	297	325	281	329	310	253	390	248	324	268	374	263	331	280	323	276	
Всплошь прокат, м		323	254	304	251	344	284	352	287	388	310	375	310	405	325	383	328	414	260	484	365	
Применение (для таблицы ВЛ, 2018)	СЧБ110-1, СЧБ110-1Ф	48	40	40	48	59	59	34	54	44	44	45	44	34	34	31	37	32	31	31	30	
	2СЧБ110-1, 2СЧБ110-1Ф	-	-	-	-	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
	СЧБ110-3Ф	48	40	40	48	45	44	43	42	35	35	33	33	38	28	28	28	24	24	23	23	
	2СЧБ110-3Ф	-	-	-	-	18	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	53	52	51	51	
	СЧБ110-5Ф	55	54	52	52	36	30	34	36	30	38	38	38	38	24	24	24	23	21	21	19	19
	2СЧБ110-5Ф	48	40	40	48	60	60	60	60	60	60	60	60	60	55	54	53	53	45	45	44	44

Фундаменты для промежуточных и анкерных опор разработаны на базе секций диаметром 800 мм в тех же формах, что и стойки анкерных опор. В типовом варианте в одной 20 м опалубке изготавливаются одновременно 4 или 3 фундамента длиной по 5 м или 6,7 м соответственно. Наличие различных вариантов длины фундаментов позволяет обеспечить надежную заделку фундаментов в большинстве грунтовых условий.

Конструкция внутренней закладной детали фундаментных секций имеет две разновидности: одна из них предназначена для закрепления промежуточных опор, нижний диаметр стоек которых 650 мм, другая – для анкерных конструкций с диаметром 800 мм. Схемы фундаментных секций приведены на рис. 4.

Коррозионная стойкость железобетонных секций подтверждена многолетней практикой эксплуатации центрифугированных стоек в грунтах разной степени агрессивности. Повышенная долговечность гарантируется использованием современных технологий по подбору состава бетона, режимов центрифугирования, тепловлажностной обработки и конструктивных решений по разработке узлов соединения секций между собой и стоек с фундаментами.

При показателях водонепроницаемости бетона центрифугированных стоек и фундаментных секций (W10-W16) любая грунтовая среда к бетону становится неагрессивной и фундаменты не требуют организации вторичной защиты от коррозии (нанесения защитных покрытий на бетонную поверхность стойки).



Рис. 4. Фундаментные секции для установки промежуточных и анкерно-угловых железобетонных опор.

Для всех разработанных в проекте фундаментных секций приведены **графики их несущей способности по материалу**.

Для расчета фундаментов в проектах конкретных ВЛ в материалах НИОКР приведены нагрузки на закрепления в четырех расчетных режимах по двум группам предельных состояний: по деформации и по устойчивости.

Для упрощения процесса подбора фундаментов для всей трассы ВЛ разработана **серия графиков, по которым может быть сделан выбор необходимого типа закреплений в зависимости от характеристик грунтов** в месте установки конкретной опоры и нагрузок на фундаменты.

Для каждого из 56-ти грунтов, характеристики которых приведены в СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений», разработаны по 4 графика несущей способности: для фундаментных секций длиной 5 и 6,7 метров отдельно для анкерно-угловых и для промежуточных опор.

На каждом графике (рис. 5) нанесено 6 кривых, 3 из которых – для обводненного грунта и 3 – для необводненного. Каждая кривая соответствует своему типу закрепления фундамента: без ригеля, с ригелем АР-6, и с ригелем АР-8. После определения номера грунта, физико-механические свойства которого максимально близки к указанному в проекте ВЛ, в зависимости от типа опоры (промежуточной или анкерной) на графике находится точка пересечения значений поперечной силы и опрокидывающего момента на фундамент. Если эта точка находится под графиком – то несущая способность закрепления обеспечена.

Таким образом, выбор типовой схемы фундамента под каждую стойку будет простым, рассчитанным по единой методике и, в то же время, индивидуальным для каждой опоры.

Испытания всех опытных образцов опор на полигоне Общества с ограниченной ответственностью Инженерный центр ОРГРЭС в г. Хотьково прошли успешно. Фотографии процесса проведения испытаний анкерных и промежуточных опор приведены на рис. 6.

Результаты замеров с высокой точностью подтвердили прогнозируемые технические параметры конструкций, в том числе – величину отклонения верхушек опор при заданных нагрузках. Этот факт свидетельствует о правильно выбранном алгорит-

ме построения расчетных программ, оптимальном подборе элементов опоры и качественном исполнении конструктивных элементов конструкций.

Для обобщения материалов, разработанных в проекте, выпущен **Альбом опор**, который, будучи сформирован по аналогии с Каталогами типовых конструкций, включает в себя: пояснительные записки, обзорные листы, область применения, электрические габариты опор, таблицы с нагрузками на опоры от проводов и тросов, нагрузки для подбора фундаментов и обзорные листы вариантов закреплений.

Для комплексного решения вопросов внедрения современных опор в практическое строительство в рамках НИОКР разработана **серия нормативных документов**, необходимых на всех этапах жизненного цикла конструкций: при проекти-

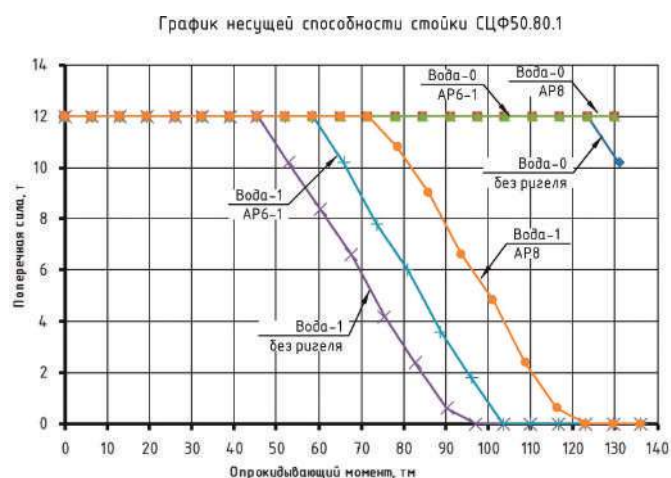


Рис. 5. График несущей способности по грунту для фундамента под промежуточную опору длиной 5 м.

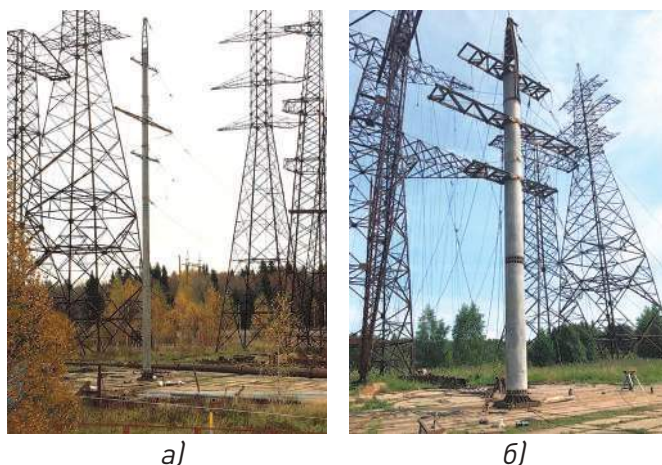


Рис. 6. Испытание промежуточной (а) и анкерно-угловой (б) опоры на полигоне в г. Хотьково.

ровании, строительстве и эксплуатации, в том числе:

- технические требования к опорам ВЛ 110 кВ и способам их закрепления;
- технологические карты на монтаж всех типов опор и фундаментов;
- инструкции по монтажу опор и фундаментов;
- инструкция по эксплуатации опор.

В процессе работы выявлена патентоспособность оригинального узла соединения стоек между собой. Получен **патент на полезную модель**, патен-

тообладателем которого является ПАО «Ленэнерго».

Технико-экономическое обоснование результатов НИОКР выполнено на базе сравнения стоимости строительства условного 5 км анкерного участка ВЛ 110 кВ в одноцепном и двухцепном вариантах при использовании известных типов железобетонных и металлических промежуточных опор.

Сравнительная стоимость участков ВЛ 110 кВ, построенных на выбранных типах опор в одноцепном и двухцепном вариантах, приведена в *таблицах 2 и 3*.

Таблица 2

Железобетонные опоры		Стальные опоры	
Новые секционированные		Старая унификация	Многогранная
ПУЭ-7		ПУЭ-6	ПУЭ-7
ПУЭ-7		ПУЭ-6	ПУЭ-6
СПБ110-3	СПБ110-7Ф	ПБ110-15	ПМ110-1Ф
			П110-5В

	Железобетонные опоры				Стальные опоры					
	Новые секционированные опоры		Старая унификация		Многогранная		Решетчатая			
	ПУЭ-7		ПУЭ-6		ПУЭ-7		ПУЭ-6			
Марка опоры	СПБ110-3	СПБ110-7Ф	ПБ110-15	ПМ110-1Ф	П110-5В					
Кол-во опор на 5 км	18,12		15,06		27,78		18,87		18,52	
Стоимость, тыс. руб.	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок
Материалы	228	4 142	358	5 395	158	4 376	451	8 504	422	7 811
в % к СПБ110-3		100%		130%		106%		205%		189%
Монтаж	27	484	35	529	27	762	30	558	77	1 430
в % к СПБ110-3		100%		109%		157%		115%		295%
Землеотвод	10	176	14	209	12	328	13	249	22	412
в % к СПБ110-3		100%		119%		186%		141%		234%
Всего (на 5 км)	265	4 802	407	6 133	197	5 466	493	9 311	521	9 653
Всего (на 1 км)		960		1 227		1 093		1 862		1 931
в % к СПБ110-3		100%		128%		114%		194%		201%
Экономия на 1 км, тыс. руб.		-		-		+130		+900		+960

Таблица 3

Железобетонные опоры		Стальные опоры			
Новые секционированные		Старая унификация		Многогранная	Решетчатая
ПУЭ-7		ПУЭ-6		ПУЭ-7	ПУЭ-6
СПБ110-4	СПБ110-8Ф	ПБ110-8	ПМ110-2Ф	П110-6В	

	Железобетонные опоры						Стальные опоры					
	Новые секционированные опоры				Старая унификация		Многогранная		Решетчатая			
	ПУЭ-7		ПУЭ-6		ПУЭ-7		ПУЭ-6					
Марка опоры	СПБ110-4		СПБ110-8Ф		ПБ110-8		ПМ110-2Ф		П110-6В			
Кол-во опор на 5 км	24,51		23,58		45,45		25		19,61			
Стоимость, тыс. руб.	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок	1 опора	участок		
Материалы	311	7 611	428	10 081	264	11 989	564	14 105	606	12 870		
в % к СПБ110-4	100%		132%		158%		183%		189%			
Монтаж	29	710	38	893	34	1 549	30	739	94	1 839		
в % к СПБ110-4	100%		126%		218%		104%		259%			
Землеотвод	17	409	19	443	15	663	17	417	26	518		
в % к СПБ110-4	100%		108%		162%		102%		127%			
Всего (на 5 км)	356		8 730		484		11 416		313		14 201	
Всего (на 1 км)	1 746		2 283		2 848		3 052		3 045			
в % к СПБ110-4	100%		131%		163%		175%		174%			
Экономия на 1 км, тыс. руб.	-		-		+1094		+1306		+1299			

Использование базовой серии современных железобетонных промежуточных и анкерно-угловых унифицированных опор ВЛ 110 кВ, разработанных в одноцепном и двухцепном вариантах, вдвое сокращает затраты на опоры и фундаменты при строительстве и реконструкции, экономя не менее 0,8 млн. руб. на каждый километр трассы линии, по сравнению с вариантом использования металлических опор. Научно-технический совет Публичного акционер-

ного общества «Россети» (ПАО «Россети») Протоколом заседания секции 1 №1/10 от 19 апреля 2018 года одобрил результаты НИОКР «Разработка железобетонных опор для ВЛ 110 кВ из центрифужированных секционированных стоек» и рекомендовал их широкое внедрение. Результаты разработки входят в Реестр инновационных решений, рекомендуемых к применению на объектах дочерних и зависимых обществ ПАО «Россети».

ПЕРЕЧЕНЬ ПОЛУЧЕННЫХ ПАТЕНТОВ АВТОРОВ ПО ТЕМЕ

1. Узел фланцевого соединения секций железобетонной стойки: Патент RU 174511 U1: МПК E04H 12/12, E04H 12/08; заявл. 12.07.2017; опубл. 18.10.2017, Бюл. №29; Авторы: Романов П.И., Касаткин С.П., Романов Ф.К.; Патентообладатель: Публичное акционерное общество энергетики и электрификации «Ленэнерго».

2. Железобетонная стойка опоры: Патент RU 2604360 C2: МПК E04H 12/12; заявл. 27.03.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34; Авторы: Королев А.А., Кустов В.Ю., Касаткин С.П., Романов П.И.; Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Волгостройресурс».

3. Железобетонная стойка опоры: Патент RU 170712 U1: МПК E04H 12/12; заявл. 17.10.2016; опубл. 04.05.2017, Бюл. №13; Авторы: Королев А.А., Кустов В.Ю., Касаткин С.П., Романов П.И.; Романов Ф.К. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Волгостройресурс».

4. Железобетонная стойка опоры: Патент RU 170794 U1: МПК E04H 12/12; заявл. 30.03.2016; опубл. 11.05.2017, Бюл. № 14; Авторы: Королев А.А., Кустов В.Ю., Касаткин С.П., Романов П.И.; Романов Ф.К.; Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Волгостройресурс».

ЛИТЕРАТУРА

1. Первый типовой проект железобетонных опор для ВЛ 110 кВ из секционированных центрифугированных стоек готов к использованию / Магдеев Н.Н., Качановская Л.И., Романов П.И., Касаткин С.П. // Сборник научно-технических статей сотрудников

Группы компаний «Россети». – Москва, 2017. – С. 42-56.

2. Стратегические предложения по разработке новых типовых проектов опор и фундаментов ВЛ и ПС / Архипов И.Л., Звягинцев А.В., Качановская Л.И., Романов П.И. // Сборник научно-технических статей сотрудников Группы компаний «Россети». – Москва, 2017. – С. 12-20.

3. Новое поколение опор ВЛ на базе секционированных железобетонных стоек / Качановская Л.И., Ермошина М., Романов П.И. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №2 (23). – март-апрель 2014. – С. 104-107.

4. Триумфальное возвращение железобетона в электросетевое строительство / Качановская Л.И., Романов П.И., Касаткин С.П. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №3 (30). – май-июнь 2015. – С. 88-91.

5. Железобетонная опора из секционированных центрифугированных стоек для ВЛ 500 кВ / Качановская Л.И., Романов П.И., Касаткин С.П. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №6 (33). – ноябрь-декабрь 2015.

6. Трубчатые фундаменты для многогранных опор ВЛ / Качановская Л.И., Романов П.И., Соглаев В. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №4 (37). – июль-август 2016.

7. Секционированные центрифугированные железобетонные стойки для ремонта и технического перевооружения ВЛ 35-500 кВ. Опыт применения на объектах ПАО «ФСК ЕЭС» / Качановская Л.И., Романов П.И. // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», №6 (39). – ноябрь-декабрь 2016.