

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2:621.315.66:624.151

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654

Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи

Николай Александрович Сенькин^{1,2}, Валерий Сергеевич Васильев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);

г. Санкт-Петербург, Россия;

² Россети Научно-технический центр (Россети НТЦ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное промышленное освоение территорий Сибири и Дальнего Востока осуществляется, прежде всего, за счет интенсивного строительства магистральных воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 220–500 кВ. Решение вопроса действительной работы конструкций опор и фундаментов представляет актуальность для обеспечения требуемой надежности электроснабжения ответственных потребителей в тяжелых климатических и транспортно отдаленных условиях. Перемещения фундаментов в слабых грунтах приводят к существенному изменению напряженно-деформированного состояния надфундаментной конструкции, создавая аварийные повреждения и инциденты на ВЛ. Однако современное проектирование опор ВЛ выполняется отдельно для фундаментов и надфундаментной конструкции. Объект исследования — стальные типовые решетчатые опоры ВЛ новой унификации, предмет исследования — взаимодействие конструкций, фундаментов и основания в сооружениях типа решетчатых опор ВЛ.

Материалы и методы. Осуществлен литературный обзор по теме взаимодействия конструкций, фундаментов и грунтового основания стальных опор ВЛ, включающий анализ экспериментальных и теоретических результатов, свидетельствующих об отсутствии методики единого расчета системы «конструкция, фундаменты и грунтовое основание» для опор ВЛ, основанной на использовании современных программных комплексов (ПК). Приведены результаты натурных испытаний опор ВЛ с фундаментами на грунтовых основаниях, проведенных в 1979–1980 гг. при участии автора, свидетельствующие о значительных перемещениях фундаментов при нагрузках основных расчетных режимов.

Результаты. В результате расчета таких систем с фундаментами на деформирующемся грунтовом основании с использованием современных ПК получены новые результаты, существенно отличающиеся от полученных при натурных испытаниях на жестком силовом полу или на неподвижных фундаментах.

Выводы. Выполнение расчетов конструкций опор и фундаментов системы «конструкция – фундамент – основание» обеспечивает более точное проектирование конструкций для каждого пикета трассы, так называемое индивидуальное проектирование, что значительно сократит расход стали и бетона по сравнению с типовым проектированием, а также повысит надежность конструкций опор и фундаментов ВЛ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, решетчатые опоры воздушных линий электропередачи, фундаменты, перемещения фундаментов, совместная работа конструкций и грунтового основания, модель стержневого аналога, индивидуальное проектирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сенькин Н.А., Васильев В.С. Действительная работа сооружений: взаимодействие конструкций и грунтового основания решетчатых опор воздушных линий электропередачи // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 637–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654

Автор, ответственный за переписку: Николай Александрович Сенькин, senkin1952@yandex.ru.

Actual operation of structures: the interaction of structures and the soil base of lattice supports of overhead power lines

Nikolai A. Senkin^{1,2}, Valery S. Vasilev¹

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);

St. Petersburg, Russian Federation;

² Rosseti Scientific and Technical Center; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Modern industrial development of the territories of Siberia and the Far East is carried out primarily due to the intensive construction of main overhead power transmission lines (overhead lines) with a voltage of 220–500 kV. Solving the issue of the actual operation of the structures of supports and foundations is of high relevance to ensure the required reliability of power supply to responsible consumers in severe climatic and transport remote conditions. The movement of foundations in weak soils leads to a significant change in the stress-strain state of the above-foundation structure, creating emergency damage and incidents on overhead lines. However, the modern design of overhead line supports is carried out separately for foundations and above-foundation structures. The object of the study is steel standard lattice overhead line supports of a new unification, and the subject of the study is the interaction of structures, foundation and basement in structures such as lattice overhead line supports.

Materials and methods. A literary review on the interaction of structures, foundations and the ground base of steel overhead line supports was performed, including an analysis of experimental and theoretical results on this topic, indicating the absence of a unified calculation methodology for the “structures, foundations and ground base” system for overhead line supports based on the use of modern software systems. The results of field tests of overhead line supports with foundations on ground bases, conducted in 1979–1980 with the participation of the author, are presented, indicating significant movements of foundations under loads of the main design modes.

Results. As a result of the calculation of such systems with foundations on a deformable soil base using modern software systems, new results were obtained that differ significantly from those obtained during field tests on a rigid power floor or on fixed foundations.

Conclusions. Performing calculations of structures of supports and foundations in the “construction – foundation – base” system provides a more accurate design of structures for each picket of the route, the so-called individual design, which will significantly reduce the consumption of steel and concrete compared with standard design, as well as increase the reliability of structures of supports and foundations of overhead lines.

KEYWORDS: metal structures, lattice supports of overhead power lines, foundations, movement of foundations, joint work of structures and soil foundation, the model of the rod analogue, individual design

FOR CITATION: Senkin N.A., Vasilev V.S. Actual operation of structures: the interaction of structures and the soil base of lattice supports of overhead power lines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):637-654. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.637-654 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Senkin, senkin1952@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Статья основана на результатах исследования действительной работы опор воздушных линий электропередачи (ВЛ), в частности поиске решений в области совместной работы их конструкций и грунтового основания. Публикация посвящена памяти выдающихся исследователей в области действительной работы металлических конструкций (МК) зданий и сооружений: профессора Московского инженерно-строительного института (МИСИ) Евгения Ивановича Беленя (1913–1989), ведущего ученого научной школы расчетного моделирования и проектирования МК [1], и профессора Ленинградского инженерно-строительного института (ЛИСИ) Владимира Антоновича Трулля (1916–1996), талантливого ученого — испытателя и разработчика новых конструктивных форм металлических конструкций, в том числе опор и фундаментов ВЛ [2].

Е.И. Беленя — ученик самого авторитетного ученого и организатора российской строительной науки Николая Станиславовича Стрелецкого (1885–1967), основателя теории предельных состояний в металлических конструкциях [3]. В период Великой Отечественной Войны в декабре 1941 г. профессор Н.С. Стрелецкий открыл единую кафедру металлических конструкций в Новосибирском инженерно-строительном институте (НИСИ) в связи с эвакуацией кафедр металлоконструкций МИСИ и Днепропетровского ИСИ (ДИСИ), заведующим которой после отъезда Н.С. Стрелецкого стал Е.И. Беленя. В этот особый период в НИСИ

проводилась актуальная разработка научно-исследовательских тем в области действительной работы стальных конструкций, в частности «Сварка на морозе» и «Восстановление конструкций промышленных зданий». В послевоенный период и в настоящее время площадка строительных кафедр НИСИ (Сибстрин) притягательна для проведения актуальных научно-технических конференций и совещаний (рис. 1).

Термин «действительная работа МК» отражает уточнение расчетных схем, нагрузок и воздействий, включая анализ аварийных повреждений эксплуатирующихся МК с целью совершенствования действующих норм, приводя в итоге к уточненным расчетным схемам с обеспечением большей прочности, жесткости, надежности и, как правило, приводя к существенному сокращению материальных и трудовых затрат, а также сроков строительства.

В составе комплекса факторов, характеризующих действительную работу конструкций ВЛ, параметр совместной работы конструкций опоры и фундамента в грунтовом основании имеет значимый характер, как подчеркнул профессор В.А. Трулль во введении в докторской диссертации (1966) [4], «особенно при внешней статической неопределенности конструкции».

В действующих нормативных документах СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» сформулированы требования, что «сооружение и его основание следует рассматривать в единстве,



Рис. 1. Совещание заведующих кафедрами металлических конструкций (Новосибирск, 09.1977), слева направо: проф., д.т.н.: В.А. Трулль, Б.А. Сперанский, А.В. Сильвестров, Е.И. Беленя, В.В. Бирюлев, Я.М. Лихтарников (из архива В.А. Трулля) [2]

Fig. 1. Meeting of heads of departments of metal structures (Novosibirsk, 09.1977), from left to right: professors, Doctor of Technical Sciences: V.A. Trull, B.A. Speransky, A.V. Silvestrov, E.I. Belenya, V.V. Biryulev, Ya.M. Likharnikov (from the archive of V.A. Trull) [2]

т.е. учитывать их взаимодействие», но отсутствуют рекомендации по их выполнению, поэтому необходима разработка методики совместного расчета конструкций и основания сооружений башенного типа, включая решетчатые опоры ВЛ, что является целью настоящей публикации. Такая методика, разработанная на основе современного программного обеспечения, позволит определять усилия в элементах конструкции опоры исходя из реальных физико-механических характеристик грунтового основания на конкретном пикете трассы ВЛ.

По результатам экспериментально-теоретических НИР по исследованию действительной работы промышленных зданий, проведенных в 1940–1960 гг. МИСИ совместно с трестом «Проектстальконструкция» и ЦНИИСК под руководством выдающихся ученых профессоров Н.С. Стрелецкого [3], С.А. Бернштейна, Г.А. Шапиро [5, 6], а позже профессора Е.И. Беленя [7, 8], в частности, выявлено, что при загрузке рамы вертикальной крановой или горизонтальными нагрузками наибольшее значение имеет учет деформативности основания фундаментов. Так, в автореферате докторской диссертации Е.И. Беленя сообщает, что «при расчете рам без учета деформативности основания фундаментов перемещения рам оказываются меньше действительных на 20–50 %

при внецентренном нагружении колонн и в 3–4 раза — при действии горизонтальных нагрузок» [8].

Тема действительной работы строительных конструкций получила высокое развитие в работах исследователей из ЛИСИ под руководством выдающегося ученого профессора Николая Николаевича Аистова (1884–1967) [9], основателя лаборатории механических испытаний и заведующего кафедрой металлических конструкций и испытания сооружений (МКиИС), а позже — под руководством его ученика профессора В.А. Трулля. В 1950-х гг. руководством страны перед энергетиками и строителями были поставлены грандиозные задачи по разработке новых систем передачи электроэнергии на дальние расстояния с целью создания Единой энергетической системы СССР. Большим творческим коллективом исследователей из разных организаций (ЛИСИ, ВНИПИ «Энергосетьпроект», Союзтехэнерго (ОРГРЭС), ВНИИЭлектроэнергетики (Россети Научно-технический центр), ЦНИИСК, НИИОСП, ЛПИ, Проектстальконструкция и др.) выполнены работы по созданию новых конструктивных форм опор и фундаментов воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ, включая разработку типовых конструкций, а также массовые испытания натур-

ных образцов непосредственно на строящихся ВЛ и их физических моделей в лабораториях [10].

На основе анализа выполненных работ В.А. Трулль в 1966 г. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи», в которой определил и решил основные задачи, относящиеся к тематике действительной работы конструкций опор ВЛ: испытания опор ВЛ на основе метода предельных состояний; работа опорных плит при отрицательных реакциях башмаков; местная устойчивость опор ВЛ; работа монтажных болтовых соединений; прочность некоторых сварных соединений заводской сварки. Следует отметить, что до настоящего времени сохранили актуальность вопросы совместной работы конструкций и основания, взаимодействия конструкций опор в единой линейной системе ВЛ, динамической работы проводов, грозозащитных тросов и конструкций опор ВЛ, упомянутые в диссертационной работе [4]. Также в 1980-х гг. под руководством профессора В.А. Трулля и при участии автора проведены натурные испытания решетчатых радиобашен Ленинградского радицентра № 11 в Поповке, которые показали, что вынужденное вертикальное перемещение нижних опорных узлов сварной конструкции, даже небольшой величины, приводит к значительному повышению напряжений в элементах нижней части стальной решетчатой башни. Например, депланация, как искривление опорной плоскости с вертикальным выходом одной опорной точки из плоскости трех других, всего на 11 мм приводит к дополнительным значительным напряжениям 40 МПа в нижнем поясе радиобашен типа «Заря» [11]. Авторские теоретические, модельные и натурные экспериментальные исследования в 1978–1980 гг. свидетельствовали о значительном влиянии осадок и горизонтальных перемещений фундаментов на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов конструкции сооружений башенного типа. В кандидатской диссертации автора разработана методика совместного расчета опоры ВЛ как единой системы «конструкция, фундаменты и грунтовое основание», которая включила упругий стержневой аналог, заменяющий фундамент и грунтовое основание, и созданы авторские программы простых упругих совместных расчетов на Фортран-IV, основанных на методе сил [12, 13].

С 2020 г. в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (СПбГАСУ) продолжены исследования действительной работы конструкций ВЛ 35–750 кВ, которые выполняются аспирантами и магистрантами кафедры металлических и деревянных конструкций [14]. Главным отличием является использование современных программных комплексов (ПК) для расчета стержневых систем (LIRA Soft10, SCAD++, Plaxis и т.п.) при известных нагрузках, инженерно-гео-

логических характеристиках грунтового основания и местности.

Изучение совместной работы конструкций, фундаментов и грунтового основания сооружений башенного типа имеет давнюю историю, но современные исследования отличаются глубиной в связи с использованием ПК для моделирования ВЛ как многоэлементной системы. Так, исследовательская группа 22.07 (Фундаменты) Международного Совета по большим электроэнергетическим системам (CIGRE) на уровне обзора привела данные о видах фундаментов опор ВЛ и методах их расчета. Рассматривая отдельные фундаменты как основной вид для опирания решетчатых опор ВЛ, предложено ограничить нежелательную разницу в осадках между соседними фундаментами, например, посредством устройства распорок между ними. Кроме того, на основании действующего европейского стандарта IEC 60826:2017 «Overhead transmission lines — Design criteria» группа 22.07 рекомендовала концепцию системного проектирования ВЛ в виде ряда механически взаимосвязанных компонентов (опор, фундаментов, проводов, изоляторов и т.п.) [15].

Британскими исследователями проведены полномасштабные полевые испытания до разрушения трех односвайных стальных фундаментов из труб диаметром 610 мм длиной 3, 4 и 6 м совместно со стойками ВЛ 25 кВ на изгибающий момент и горизонтальные нагрузки, приложенные к верхней части стоек. Исследования показали, что боковое смещение сваи на уровне поверхности грунта связано с ее поворотом в грунте как жесткого элемента для коротких свай длиной 3–4 м и как гибкого — при их длине 6 м. Причем измеренная точка поворота сваи длиной 3 м находится в грунте на глубине 2,5 м, 4 м — 3,5 м, 6 м — 4,5 м соответственно [16], что представляется важным для разработки моделей взаимодействия конструкций и грунтового основания одноствоечных опор ВЛ.

Научные исследования, проводимые Шербрукским университетом (Канада, Квебек), свидетельствуют о необходимости учета взаимодействия грунта и конструкции опор ВЛ для оценки их реакции на динамические импульсные нагрузки, в частности, при сейсмическом проектировании. В результате расчета с использованием специализированного ПК ADINA, апробированного на расчетах системы «конструкция – основание» опор ВЛ, выявлено существенное различие в действующих динамических импульсных нагрузках при изменении жесткости грунтового основания. Так, максимальный импеданс или ударный отклик на конструкцию свободной решетчатой опоры ВЛ с базой 4,0 м при жестком основании на 14,3 % выше, чем при песчаном основании, и на 33,3 % выше при связном глинистом основании. Кроме того, принята модель гистерезисного деформирования грунта, тогда экстремаль-

ное значение вертикального подъема фундамента при максимальном импульсе продолжительностью 0,5 с создается в итоге нелинейного расчета с результатом, превышающим в 2,03 раза упругий подъем [17]. Следовательно, традиционный подход при сейсмическом проектировании конструкций опор ВЛ, пренебрегающем деформативностью фундамента в грунтовом основании, приводит к значительным отклонениям от реальной работы конструкций и фундаментов, особенно в случае существенных деформаций.

В работе индийских ученых представлены результаты расчета методом конечных элементов (МКЭ) стальной двухцепной угловой опоры типа D-30 (предельный угол поворота ВЛ — 30°) ВЛ 110 кВ как единой пространственной стержневой системы, включающей стержневой аналог свайного фундамента и грунтового основания в виде упругих податливых пружин, прикрепленных к сваям. Для опоры с К-образной полураскосной решеткой, опертой всеми четырьмя башмаками на 4 сваи диаметром 0,4 м и длиной 10 м каждая, горизонтальное перемещение вершины опоры составило 105,2 мм, а при неподвижных башмаках на жестком основании — 96,6 мм или на 8,9 % ниже, что свидетельствует о необходимости исследования взаимодействия конструкций и основания в составе действительной работы конструкций опор ВЛ [18].

Значимые результаты приведены в научных работах китайских ученых, посвященных действительной работе конструкций опор ВЛ в особых районах с тяжелыми климатическими условиями, сейсмичностью и просадочными грунтовыми основаниями, характерными для угольных горных выработок [19–24]. Фундаменты опор многих линий электропередачи построены на пустотах или в местах возможных провалов в зонах подземной угледобычи. Возникающая неравномерная осадка и горизонтальные перемещения фундаментов перераспределяют нагрузки на них и создают дополнительные напряжения в конструкции, что может привести к аварийному падению опор ВЛ [19]. В следующей статье представлена online-система мониторинга положения (наклона) опор и перемещений фундаментов ВЛ в режиме реального времени с погрешностью измерений 1,03 %, оснащенная датчиками ускорений и угловой скорости. На основании показанных в публикации графиков «нагрузка – перемещение» фундаментов следует вывод о существенно нелинейном характере деформирования фундаментов в грунте основания, горизонтальные перемещения которых на 30–50 % превышают линейные деформации [20]. Научная школа профессора Qianjin Shu в течение долгого времени изучает вопросы действительной работы конструкций ВЛ. Так, в труде «Исследование характеристик защиты от смещения фундамента и оценка надежности опоры электропередачи 500 кВ в зоне просадки

горных выработок» [21] приведены результаты расчета трех типов анкерно-угловых опор ВЛ 500 кВ на ПК ANSYS Finite Element с учетом геометрической и физической нелинейности с важным выводом: допустимое значение вертикального либо горизонтального одиночного смещения фундамента не должно превышать 0,5 % от расстояния между фундаментами опоры. Например, для одноцепной опоры КТ-16 типа «рюмка» высотой 54,0 м и размерами в плане 9,40 × 13,66 м допустимые значения перемещений фундамента, исходя из расчета критических элементов по предельным состояниям на нагрузки рабочих режимов, составили 86–181 мм, что в относительном виде 0,63–1,71 % соответственно.

В работах киевских исследователей [25, 26] предложена система моделирования работы строительных конструкций и грунтовых оснований зданий и сооружений посредством стержневых аналогов, обеспечивающих расчеты при помощи программных комплексов на основе МКЭ. Выдающиеся отечественные ученые [27–29] уделяли большое внимание вопросам учета совместной работы строительных конструкций и фундаментов сооружений, а также грунтов основания, при расчетах фундаментов и грунтовых оснований. В действующих нормах (п. 5.6 СП 22.133330.2016 «Основания зданий и сооружений»), построенных на основе их исследований, расчетная схема основания принимается в виде линейно-деформируемого полупространства, а данный учет сводился к определению коэффициентов работы в интервале 1,0–1,4 при вычислении расчетного сопротивления грунта в основании сооружений в зависимости от типа конструктивной схемы (гибкой либо жесткой) и вида грунтов. Кроме того, п. 4.2 СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» требует, чтобы «расчетные схемы и основные предпосылки расчета отражали действительные условия работы стальных конструкций, а в расчетных схемах учитывались деформационные характеристики опорных закреплений конструкций, оснований и фундаментов», однако и по сей день отсутствуют расчетные методики по совместным расчетам строительных конструкций, в частности стальных решетчатых опор воздушных линий электропередачи, с учетом совместной работы с фундаментами и грунтовым основанием, что является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В июне 1980 г. автор, аспирант кафедры МКИИС ЛИСИ, участвовал в натурных испытаниях стальной решетчатой двухцепной анкерно-угловой опоры типа УМ-102 общей высотой 22,5 м и базой 6,5 м (расстояние между фундаментами), установленной в 1929 г. в годы первых пятилеток на ВЛ 110 кВ «Кожухово-Пахра» (Подмосковье, Орехово-Борисово) для подвески медных проводов МГ-95

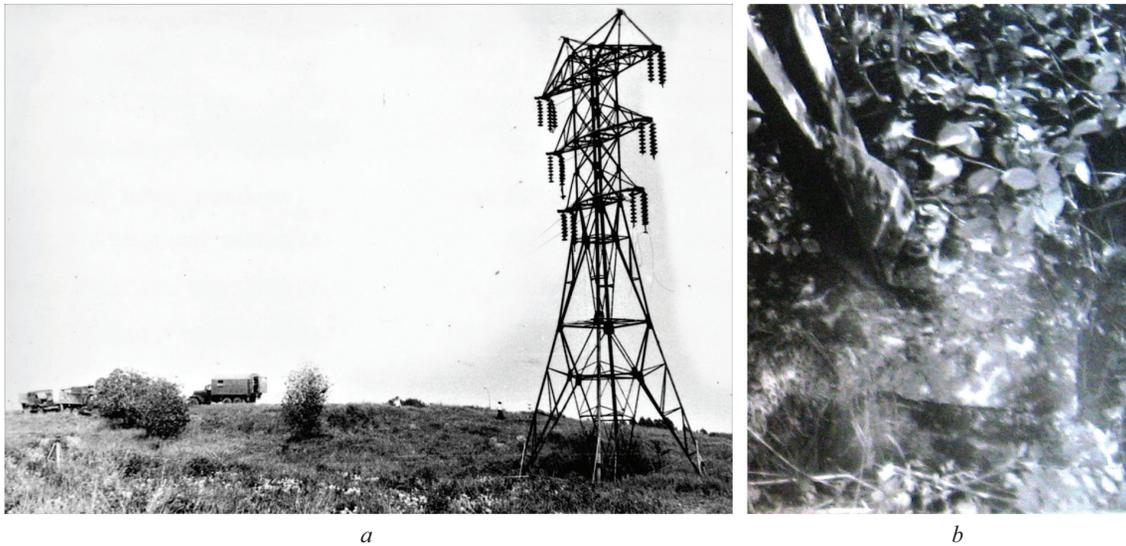


Рис. 2. Натурные испытания анкерно-угловой опоры УМ-102 до разрушения, нагруженной посредством силовых канатов и тяговой автомобильной техники (а); поврежденные пояс и раскос из-за выдернутого монолитного бетонного фундамента при нагрузке 100 % (b) (фото автора, 06.1980)

Fig. 2. Full-scale tests of the UM-102 anchor-angle support before destruction, loaded by means of power ropes and traction vehicles (a); damaged belt and brace due to a pulled monolithic concrete foundation at a load of 100 % (b) (photo by the author, 06.1980)

и грозотросов марки С50. Фундаменты опоры выполнены монолитными бетонными ступенчатыми с заглублением 2,5 м и плитой 2,0 × 2,0 м (рис. 2).

В процессе испытаний проводились измерения усилий в тяговых тросах при помощи врезных динамометров, напряжений в элементах посредством тензодатчиков, отклонения оси опоры от вертикали тео-

долитом и вертикальных перемещений фундаментов нивелиром по миллиметровым рейкам, прикрепленным к поясам. Кроме того, автор измерял горизонтальные перемещения четырех башмаков, прикрепленных к четырем фундаментам посредством анкерных болтов, на каждой ступени нагружения при помощи прогибомеров ПАО-6 ценой деления 0,01 мм (рис. 3).

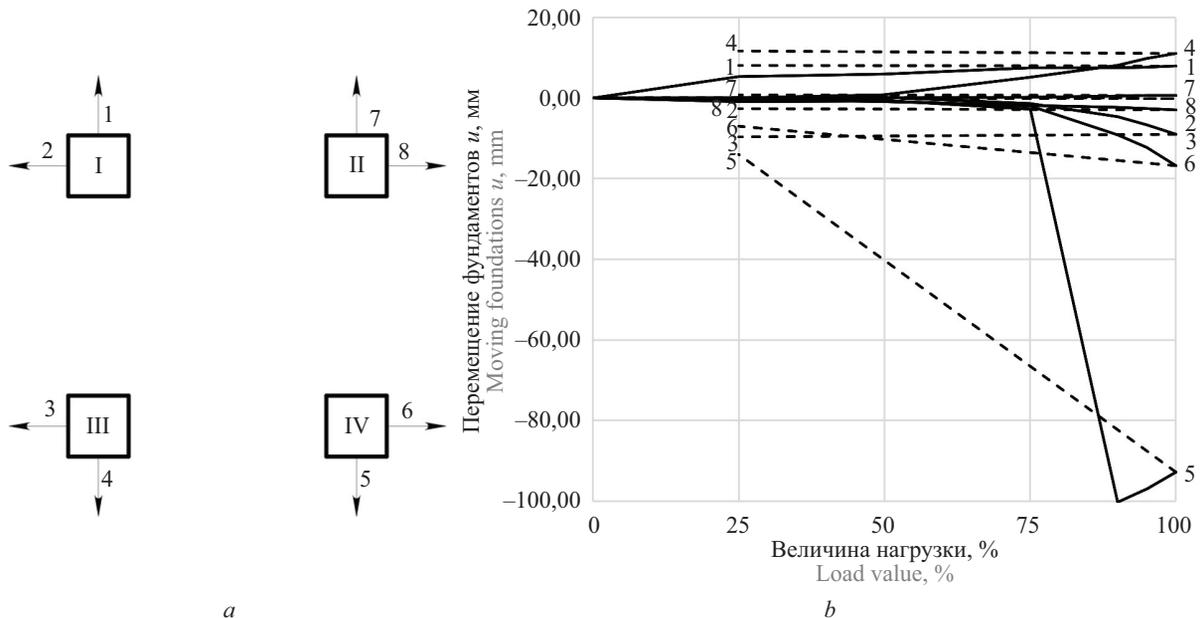


Рис. 3. Идентификация фундаментов и обозначение направлений их горизонтальных перемещений (а); графики горизонтальных перемещений фундаментов, мм, по восьми направлениям (цифрами) в зависимости от численного значения нагрузки P , %: нагружение — сплошная линия, разгрузка — пунктир (b)

Fig. 3. Identification of foundations and designation of the directions of their horizontal movements (a); graphs of horizontal movements of foundations, mm, in 8 directions (in numbers) depending on the numerical value of the load P , %: loading — solid line, unloading — dotted line (b)

Испытания анкерно-угловой опоры УМ-102 и промежуточной опоры ПМ-102 осуществлялись по заказу Мосэнерго силами ПО Союзтехэнерго (ОРГРЭС) испытателями Е.П. Горбатовым и А.И. Орловой под руководством заместителя начальника цеха электрических сетей Л.В. Яковлева с целью проверки несущей способности конструкций стальных опор и фундаментов ВЛ 110–220 кВ, находящихся в эксплуатации более 30 лет и имеющих коррозионные повреждения элементов нижних частей. Натурные испытания опоры УМ-102 проводились на нагрузки II нормального режима с нагружением ступенями 25, 50, 75, 90, 95 и 100 % (и последующей разгрузкой до 25 %) от расчетного значения испытательной нагрузки при помощи лебедок тяжелых автомобилей повышенной проходимости и полиспастов на якорях. При нагрузке 105 % разрушился якорь полиспаста и испытания данного цикла не были доведены до разрушения опоры УМ-102. Тем не менее объем полученных данных позволил выполнить анализ усилий в раскосах и поясах нижней части опоры, который свидетельствует о почти линейном характере деформирования элементов, а также перемещений верха фундаментов при нагрузках 25 % и далее, почти до 100 % их величины. Однако при нагрузке величиной от 75 % анкерный (или выдергиваемый) фундамент IV стал интенсивно перемещаться противоположно направлению 5, а при нагрузке в интервале 100–105 % выдергиваемые фундаменты III и IV (рис. 3) оторвались от грунтового основания, поднялись по вертикали на 64 и 67 мм соответственно и потеряли связь с грунтовым основанием. Указанная аварийная си-

туация произошла по причине дефицита грунта обратной засыпки анкерного фундамента IV. Кроме того, в рамках кандидатской диссертации автор [12] выявил асимметрию в передаче горизонтальной испытательной нагрузки $P = 206$ кН, действующей в плоскости симметрии конструкции, между четырьмя фундаментами: большая часть нагрузки P (60 %) передалась на сжатые фундаменты, вызвав их фактическую перегрузку и перенапряжение сжатых поясов и раскосов.

В 1979 г. автор, аспирант кафедры МКиИС ЛИСИ, благодаря помощи преподавателей кафедры и сотрудников механической лаборатории ЛИСИ имени профессора Н.Н. Аистова, организовал натурные испытания анкерно-угловой опоры типа «американка» для ВЛ 110 кВ волховского типа, разработанной в 1920-х гг. академиком Г.О. Графтио и профессором Ленинградского политеха Н.П. Виноградовым. Для испытаний использовалось близкое расположение двух таких опор: одна опора — правая служила для создания испытательной нагрузки при помощи талрепа, вторая левая была испытуемой, а между ними протягивался силовой трос с динамометром (рис. 4).

Вертикальные перемещения фундаментов замерялись при помощи нивелира по миллиметровым рейкам, горизонтальные перемещения — посредством двух прогибомеров типа ПАО-6 разработки Н.Н. Аистова и В.Т. Овчинникова, устраиваемых от каждого опорного узла. Для определения относительных деформаций в каждом поперечном сечении элемента нижней части опоры устанавливались три рычажных тензометра ТА-2 базой 100 мм раз-

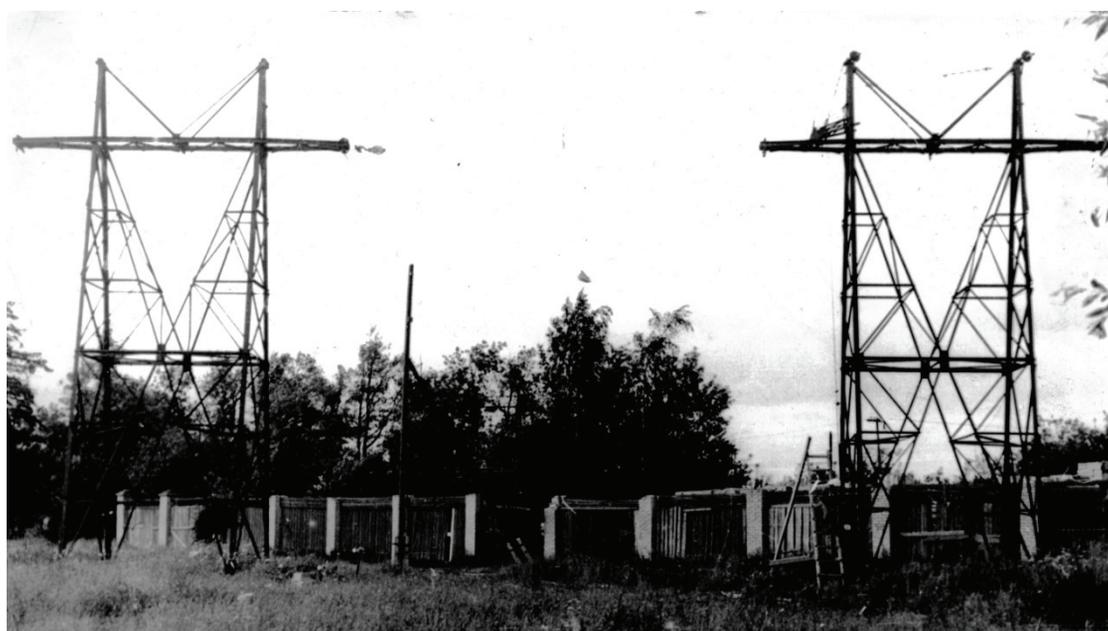


Рис. 4. Натурные испытания опоры волховского типа ВЛ 110 кВ на бетонных монолитных фундаментах, нагруженной при помощи силового каната и талрепа (Ленинград, 1979)

Fig. 4. Full-scale tests of the volkhov type 110 kV overhead line support on concrete monolithic foundations loaded by means of a power rope and a lanyard (Leningrad, 1979)

работки Н.Н. Аистова. Результаты выполненных натурных испытаний свидетельствуют о возможности линеаризации процессов деформирования грунтового основания и усилий в элементах конструкции башенного типа. Указанные результаты подчеркивают актуальную необходимость анализа влияния перемещений фундаментов на усилия в элементах опоры и исследования взаимодействия конструкций и фундаментов сооружений [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованы известные методы расчета методом конечных элементов в ПК LIRA и ПК PLAXIS, при помощи которых получены новые результаты расчета стальных конструкций, фундаментов и грунтовых оснований. Такие факторы, как перемещения фундаментов, неравномерность осадок фундаментов и учет податливости грунтового основания, обеспечили разработку более надежных и экономичных конструктивно-технологических решений стальных опор ВЛ.

Объектом исследования стали стальные типовые решетчатые опоры ВЛ новой унификации (индекс «н» в марке опоры), отличающиеся наличием горизонтальных распорок, соединяющих башмаки опоры, предметом исследования — влияние перемещений фундаментов на усилия в элементах конструкций и взаимодействие конструкций и фундаментов в сооружениях башенного типа. Также в результате натурных испытаний опор ВЛ на фундаментах получены новые результаты, существенно отличающиеся от полученных при натурных испытаниях на жестком силовом полу или на неподвижных фундаментах.

Современная вычислительная техника и программное обеспечение позволили проектировать промышленные и электросетевые объекты с учетом дополнительных уточняющих факторов. Поэтому актуальными стали научно-исследовательские работы по изучению действительной работы стальных конструкций промышленных зданий и электросетевых конструкций. Выполнен анализ результатов натурных испытаний конструкций воздушных линий электропередачи, посредством которых выявляются неизвестные факты, свидетельствующие о действительной работе конструкций опор ВЛ, прежде всего, перемещений фундаментов на деформирующихся грунтовых основаниях.

Апробация расчетной модели

В соответствии с нормативными требованиями по верификации (п. 5.1.13 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений») для создания корректной расчетной модели опоры ВЛ «конструкция – фундамент – основание» необходимо экспериментально установить значения принимаемых интерфейсов и в целом корректность расчета таких фундаментов в ПК PLAXIS. Для этого использова-

ны результаты натурального эксперимента кандидата технических наук И.П. Разоренова по испытанию горизонтально нагруженного фундамента № 3, выполненного в 1955 г. [30]. Характеристики грунта приняты аналогично данным натурального эксперимента [30], проведенного на правом берегу р. Яуза (суглинок: объемный вес — $1,75 \text{ г/см}^3$, угол внутреннего трения — 23° , сцепление — $0,001\text{--}0,005 \text{ Н/см}^2$, число пластичности — 14, влажность — 16 %). При натурных испытаниях системы «конструкция – фундамент – основание» было сделано 40 циклов «нагрузка – разгрузка», но на совмещенном графике (рис. 5) представлены только четыре, потому что с увеличением числа циклов «загрузка – разгрузка» полные и остаточные деформации грунта затухают, но упругая доля деформаций остается неизменной. Иными словами, с каждым последующим циклом нагрузки – разгрузки работа грунта подобна гистерезису с почти неизменными параметрами и характеризуется почти линейной зависимостью. Надфундаментная часть задана условно с обеспечением необходимой жесткости конструкции. Таким образом, в расчете в ПК PLAXIS, как и в эксперименте, на каждом цикле произведено ступенчатое нагружение в последовательности до достижения предельного значения $P = 17,5 \text{ кН}$ (ступени: 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 и 17,5 кН) с последующей разгрузкой (пунктирная линия).

Расчетная кривая PLAXIS аналогична результатам эксперимента и хорошо согласуется на начальных циклах нагружения. Имеются некоторые различия с каждым последующим циклом, отличающиеся общим перемещением фундаментов в грунтовом основании. Следовательно, такой подход к разработке расчетной модели дает достаточно достоверные значения перемещений на первом цикле нагружения и может быть использован для описания нелинейных перемещений фундаментов анкерно-угловых опор, имеющих почти постоянные нагрузки в связи с односторонним тяжением проводов и грозотросов в сторону внутреннего угла поворота оси ВЛ. При этом нелинейный процесс деформирования грунта может приближенно определяться переменным модулем деформации грунта $\bar{E}_{\text{гр}}$, изменяющимся на каждой ступени нагружения (штрихпунктирная линия $\bar{E}_{\text{гр}}$ на рис. 5).

Стоит отметить, что представленные в статье результаты натурных испытаний подтверждают определенную особенность действительной работы грунтового основания при последовательном циклическом приложении нагрузки, когда графики «нагрузка – разгрузка» будут подобны графикам гистерезиса со значительной долей упругих деформаций грунта, характерных для многократного нагружения – разгружения. Такой упругий характер работы грунтов рекомендуется принять для оснований промежуточных опор, характеризующихся воздействием горизонтальных ветровых нагрузок

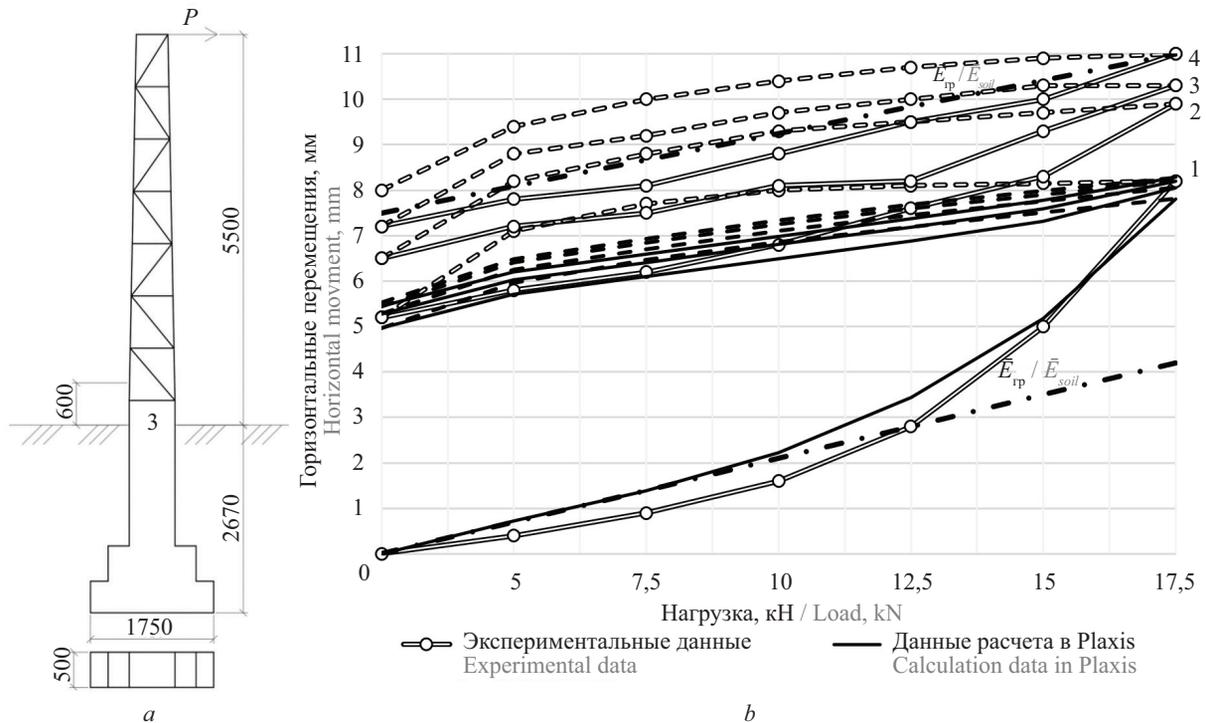


Рис. 5. Схема испытаний (размеры, мм) (а); сравнение результатов эксперимента и расчетов в ПК PLAXIS (цифры справа — номера циклов нагружения): графики зависимости горизонтальных перемещений, мм, от нагрузки P , кН (b)
Fig. 5. Test scheme (dimensions, mm) (a); comparison of experimental results and calculations in the Plaxis PC (the numbers on the right are the numbers of loading cycles): graphs of the dependence of horizontal displacements, mm, on the load P , kN (b)

с переменным направлением и значением. Здесь деформирование грунта по гистерезису целесообразно аппроксимировать линейной упругой зависимостью с постоянным модулем деформации грунта $E_{тр}$ на всех ступенях нагружения (штрихпунктирная линия $E_{тр}$ на рис. 5) при использовании модели стержневого аналога (МСА).

Метод совместного расчета упругой системы «конструкция – фундамент – основание»

Одним из вариантов учета податливости грунтового основания является замещение всей подземной части (фундамент + грунтовое основание) стержневым аналогом МСА («паучок»), который представлен в расчетной схеме опоры (рис. 6). Расчетные параметры аналога определяются требованиями равенства угловых и линейных перемещений на обресе фундамента в грунтовом основании, соответствующих перемещениям пространственной стержневой модели [13].

Считая ось поворота фундамента неподвижной, уравнения для вертикальных, горизонтальных и угловых перемещений принимают вид, представленный в формулах [13]:

$$I = \frac{a^4 \cdot E_{тр}}{144 \cdot E \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{\omega_z^3}{3 \omega_\phi}}, \quad (1)$$

где I — момент инерции условной стальной балки; a — ширина квадратной части фундамента; $E_{тр}$ — модуль деформации грунта; E — модуль упругости

стали; μ — коэффициент Пуассона грунта; ω_z, ω_ϕ — безразмерные коэффициенты формы фундамента [26];

$$l = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_z}{3 \cdot \omega_\phi}} \cdot \sqrt{2}; \quad (2)$$

$$h = h_0, \quad (3)$$

где h — конструктивная высота фундамента; h_0 — расчетная высота до точки поворота в грунте O_1 (рис. 6).

Кроме того, для апробации результатов расчета сооружения с учетом податливости грунта предлагается моделирование полной системы «конструкция – фундамент – основание» в программной системе PLAXIS, поэтому реализуется модель PLAXIS (MPL).

Основными нагрузками для опор ВЛ являются собственный вес, тяжение и вес проводов, а также ветровая и гололедная нагрузки. При этом при изменении скорости и направления ветрового напора фундаменты преимущественно промежуточной опоры работают попеременно как на вдавливание, так и на выдергивание, происходит уплотнение грунта под его подошвой. Поэтому для реализации действительной работы конструкции и основания была выбрана модель упрочняющегося грунта Hardening soil (HS) для расчета в PLAXIS.

В основном ПК PLAXIS разработан для решения задач инженерной геотехники и инженерной

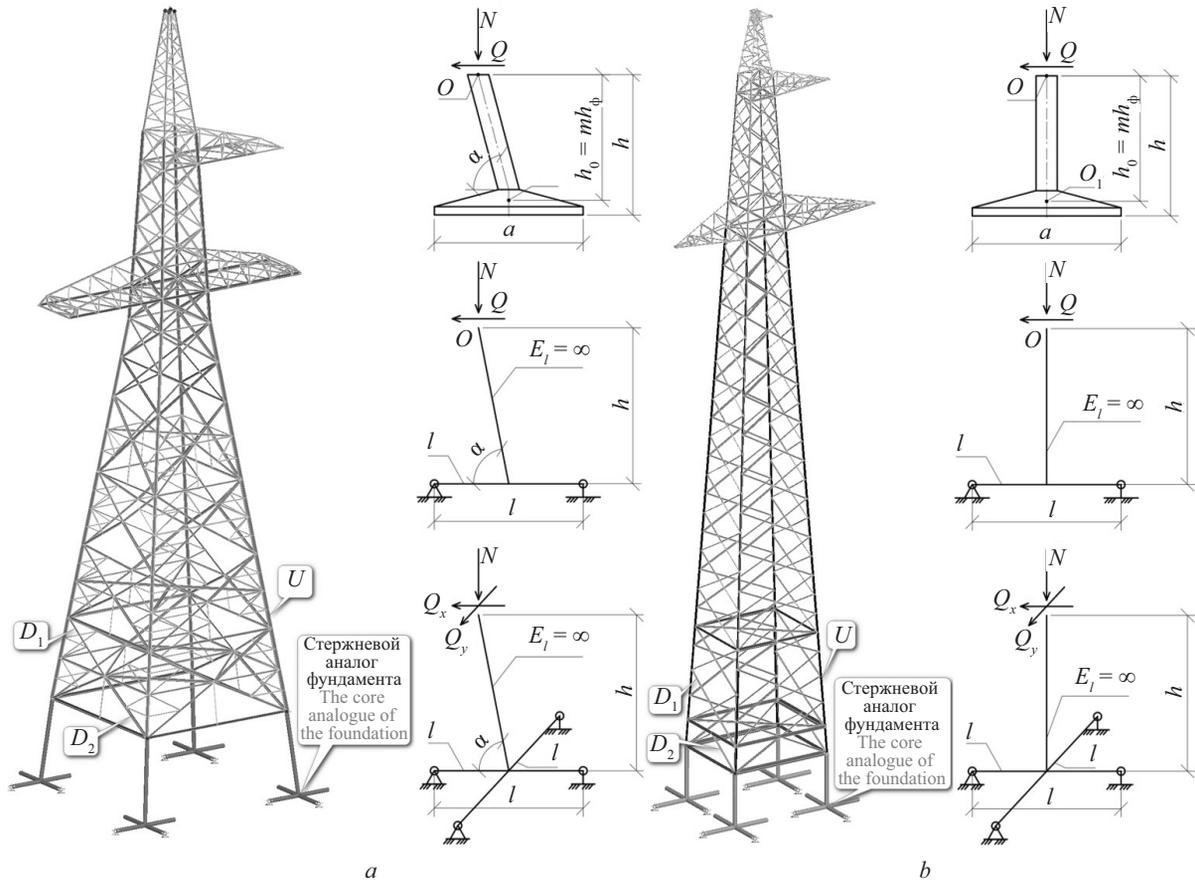


Рис. 6. Расчетные схемы анкерно-угловой опоры У330н-1+14 (а) и промежуточной опоры П330н-1+6,0 (б), включающие стержневой аналог фундамента в грунтовом основании

Fig. 6. Calculation schemes of the anchor-angular support U330n 1+14 (a) and the intermediate support P330n-1+6.0 (b), including a core analogue of the foundation in the ground base

геологии, при этом акценты на проектирование надфундаментного сооружения отсутствуют. Например, одно из допущений в данной расчетной модели — отсутствие шарнирных узлов, иными словами, все узлы приняты жесткими. Также стоит отметить более продолжительный по времени расчет MPL по сравнению с МСА.

Наибольшее влияние учет податливости грунтового основания оказывает на нижнюю часть сооружения, поэтому особое внимание уделяется распределению усилий в элементах нижних подставок опор (рис. 7, 8).

Учет податливости грунтового основания и анализа его влияния на усилия в элементах подставки П1.2-6.0 промежуточной опоры типа П330н-1+6.0

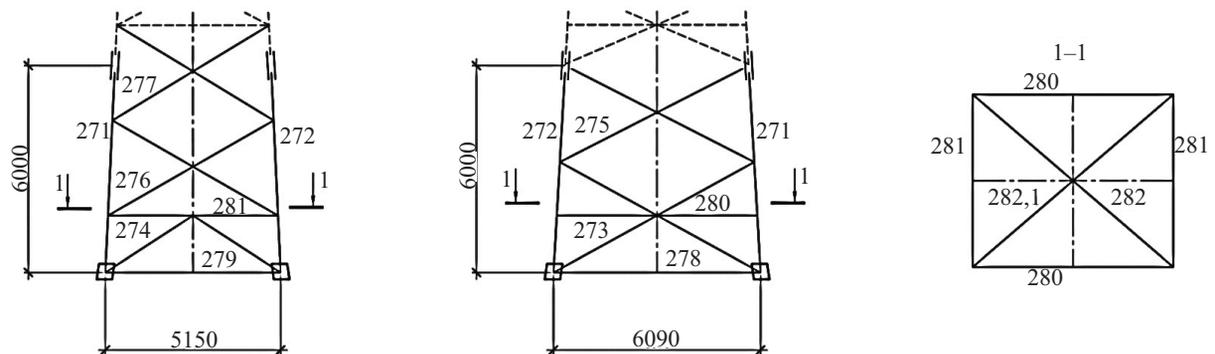


Рис. 7. Схема элементов подставки типа П1.2-6,0 в составе промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 (цифрами показаны номера элементов)

Fig. 7. Scheme of the elements of the stand type P1.2-6.0 as part of the intermediate support type P330n-1+6.0 (the numbers show the item numbers)

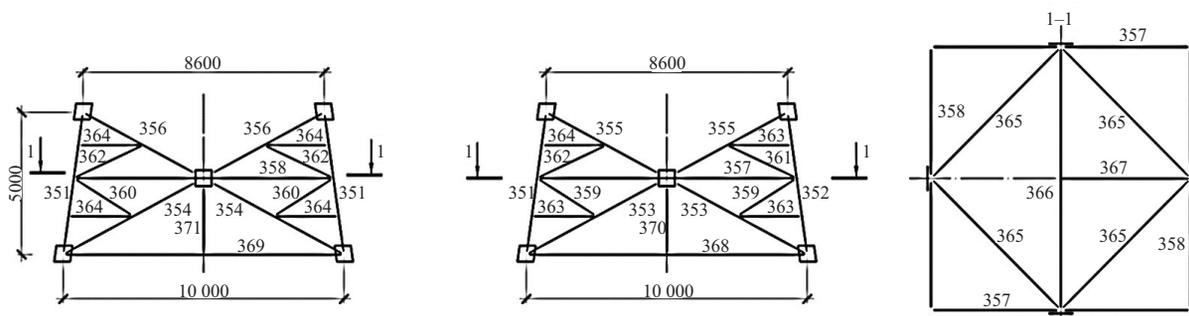


Рис. 8. Схема элементов подставки типа П1.2-5,0 в составе анкерно-угловой опоры типа У330н-1+14 (цифрами показаны номера элементов)

Fig. 8. Scheme of the elements of the stand type P1.2-5.0 as part of the anchor-angular support type U330n-1+14 (the numbers show the item numbers)

выполнен в зависимости от переменного параметра в системе — модуля деформации грунта E_{rp} , эквивалентно переводимого в модуль инерции балок стержневого аналога I по модели МСА по формулам (1)–(3) (табл. 1, 2, рис. 9). При последующих

исследованиях модуль деформаций E_{rp} целесообразно заменить на E_B , модуль деформации грунта при разгрузке и повторном нагружении в соответствии с п. 5.3.8 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений».

Табл. 1. Результаты расчета системы по модели МСА при изменении модуля деформации грунта E_{rp} (опора П330н-1+6,0)

Table 1. The results of calculating the system according to the MSA model when changing the soil deformation modulus E_{soil} (support P330n-1+6.0)

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели МСА, кН The forces in the elements of the the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MCA model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , MPa					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ MPa, %
	10	50	100	150	200	
271/272	-283,280	-275,960	-274,640	-274,180	-273,970	3,29
273	-12,166	-11,910	-11,978	-12,020	-12,049	2,10
274	-3,886	-3,804	-3,790	-3,783	-3,778	2,76
275	-12,704	-12,633	-12,640	-12,649	-12,659	0,56
276	-2,874	-2,807	-2,791	-2,784	-2,777	3,35
277	-1,569	-1,530	-1,522	-1,519	-1,516	3,33
278	13,699	-9,944	-16,506	-19,246	-20,757	251,52
279	-9,788	-9,521	-9,459	-9,435	-9,422	3,74

Табл. 2. Вариант расчета системы по модели MPL при изменении модуля деформации грунта E_{rp} (опора П330н-1+6,0)

Table 2. The results of calculating the system according to the MPL model when changing the soil deformation modulus E_{soil} (support P330n-1+6.0)

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , MPa					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ MPa, %
	10	50	100	150	200	
271/272	-275,28	-275,55	-275,53	-275,56	-275,59	0,11
273	-11,97	-12,00	-12,00	-12,00	-12,00	0,25

Номер элемента (рис. 7) Item Number (fig. 7)	Усилия в элементах подставки П1.2-6,0 промежуточной опоры типа П330н-1+6,0 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-6.0 intermediate support type P330n-1+6.0 the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
274	-11,40	-10,51	-10,38	-10,27	-10,20	-
275	-13,16	-13,18	-13,18	-13,18	-13,19	0,23
276	-2,47	-2,46	-2,45	-2,45	-2,45	0,81
277	-1,99	-1,98	-1,97	-1,96	-1,97	1,51
278	-13,27	-15,34	-15,68	-15,99	-16,10	21,33
279	-10,60	-10,80	-10,88	-11,01	-11,09	4,62

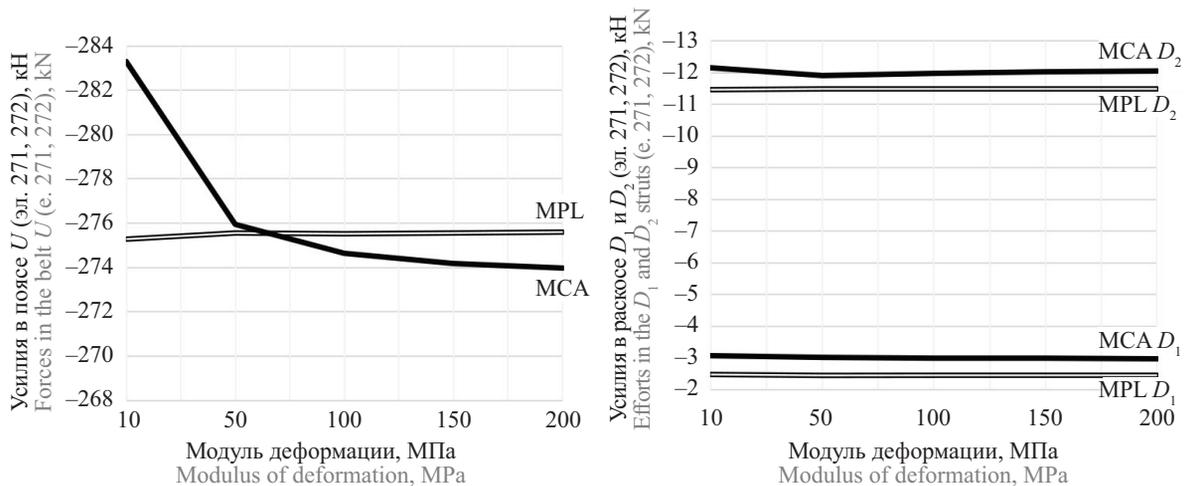


Рис. 9. Усилия, кН, в элементах промежуточной опоры П330н-1+6,0 в зависимости от модуля деформации грунта E_{rp}
Fig. 9. The forces, kN, in the elements of the intermediate support P330n-1+6.0 depending on the modulus of deformation of the soil E_{soil}

Расчет анкерно-угловой опоры произведен аналогично расчету промежуточной опоры и представлен в табл. 3, 4 и графически на рис. 10. Здесь при последующих исследованиях также следует

применить переменный модуль деформации грунта \bar{E}_{rp} на каждой ступени нагружения, который целесообразно принять равным секущему модулю деформации первичного нагружения при 50%-ной

Табл. 3. Результаты расчета системы по модели МСА при изменении модуля деформации грунта E_{rp}

Table 3. The results of the calculation of the system according to the MCA model with the soil deformation module E_{soil}

Номер элемента (рис. 8) Item Number (fig. 8)	Усилия в элементах подставки П1.2-5,0 типовой анкерно-угловой опоры У330н-1+14 по модели МСА, кН The forces in the elements of the stand P1.2-5.0 of the standard anchor-angular support U330n-1+14 according to the MCA model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
351/352	-685,88	-778,64	-799,61	-807,96	-812,39	18,44
353/354	-76,89	-66,63	-64,73	-64,21	-64,05	16,70
355/356	-45,40	-56,73	-59,63	-60,86	-61,60	35,67
368/369	-33,51	-34,53	-34,59	-35,74	-37,99	13,37

Табл. 4. Результаты расчета системы по модели MPL при изменении модуля деформации грунта E_{rp}

Table 4. The results of calculating the system using the MPL model when changing the soil deformation modulus E_{soil}

Номер элемента (рис. 8) Item Number (fig. 8)	Усилия в элементах подставки П1.2-5,0 типовой анкерно-угловой опоры У330н-1+14 по модели MPL, кН The forces in the elements of the stand P1.2-5.0 of the standard anchor-angular support U330n-1+14 according to the MPL model, kN					
	Модуль деформации грунта E_{rp} , МПа The soil deformation modulus E_{soil} , МПа					Разница усилий для $E_{rp} = 10-200$ МПа, % The difference in strain for $E_{soil} = 10-200$ МПа, %
	10	50	100	150	200	
351/352	-723,94	-726,41	-726,79	-726,98	-727,07	0,43
353/354	-54,75	-55,17	-55,07	-55,02	-54,97	0,75
355/356	-52,95	-52,55	-52,42	-52,37	-52,34	1,16
368/369	-48,97	-46,23	-45,69	-45,51	-45,40	7,29

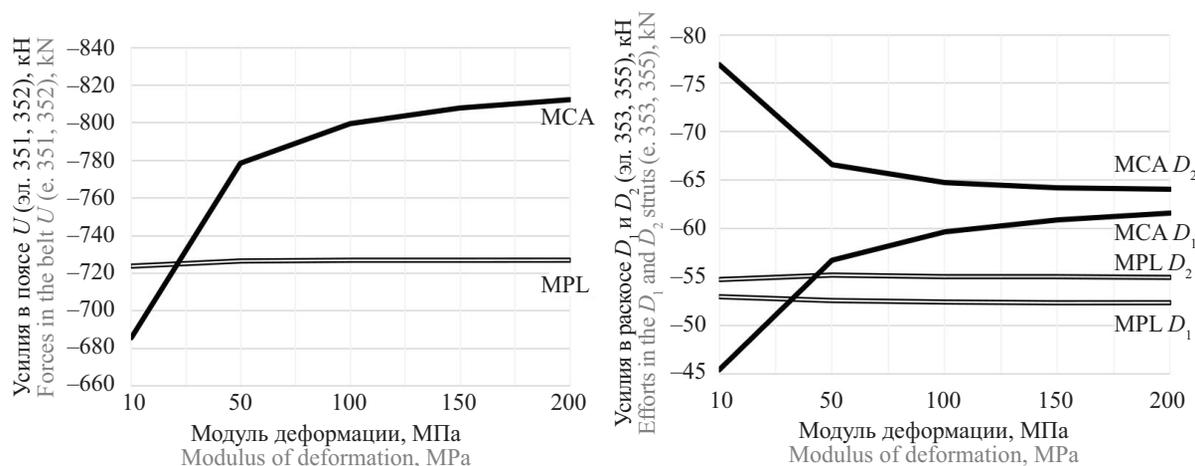


Рис. 10. Усилия, кН, в элементах подставки опоры У330н-1+14 в зависимости от модуля деформации грунта E_{rp}

Fig. 10. The forces, kN, in the elements of the support support U330n-1+14, depending on the modulus of deformation of the soil E_{soil}

прочности грунта E_{50} (ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»).

Как показано в диссертационной работе автора [12], в действительности грунты основания имеют конечную и отличную от нуля податливость. В соответствии с п. 5.3.20 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» расчет оснований опор ВЛ независимо от геотехнической категории допускается выполнять по таблицам Приложения А. В табл. А.1 и А.3 для песчаных и глинистых грунтов при максимальном коэффициенте пористости $e = 0,75$ определяется минимально допустимое численное значение модуля деформации грунта $E_{rp} = 10$ МПа, которое следует принять за предельное нормативное значение модуля деформации грунта. Возведение фундаментов опор ВЛ на слабых грунтовых основаниях приводит к значительным осадкам и перемещениям, поэтому строительство на таких основаниях с модулем деформаций ниже

$E_{rp} = 10$ МПа, как правило, связано с их дорогостоящим укреплением. Итак, назначается левая граница интервала допустимых значений $E_{rp} = 10-\infty$ МПа, а правая граница соответствует недеформируемому жесткому основанию, свойственному жесткому силовому полу или несмещаемым фундаментам. Далее для правой границы применено численное значение $E_{rp} = 200$ МПа, которое в расчетах дает численные значения усилий, почти соответствующие недеформируемым грунтовым основаниям. Стоит заметить, что современная практика испытаний натуральных образцов опор ВЛ, например на площадке цеха по испытанию элементов ВЛ (ЦИВЛ) АО «Фирма ОРГРЭС» в г. Хотьково Московской обл., основывается на результатах испытаний опор с неподвижными башмаками на силовом жестком железобетонном полу. Так выполняется сертификация новых конструкций опор и фундаментов, но это не отвечает действительной работе конструкций на деформирующемся грунтовым основании.

Из анализа результатов расчета промежуточной опоры по моделям МСА и MPL (табл. 1, 2) следует, что перемещения фундаментов оказывают наибольшее влияние на изменение усилий в нижних распорках подставки опоры ПЗ30н-1+6,0. Для модели МСА в элементе № 278 усилие меняет знак и возрастает в 2,5 раза на интервале $E_{гр} = 10\text{--}200$ МПа (табл. 1). Для остальных элементов изменением усилий можно пренебречь, так как они составляют менее 5 %, по причине небольших углов отклонения поясов ствола опоры от вертикали и наличия межфундаментных горизонтальных распорок.

В качестве первого приближения для расчета системы «конструкция – фундамент – основание» анкерно-угловой опоры УЗ30н-1+14 применен единый модуль деформации $E_{гр}$ как для промежуточной опоры ПЗ30н-1+6,0. Сравнение результатов натурального эксперимента И.Ф. Разоренова [30] и расчетов с использованием ПК PLAXIS свидетельствует о достаточной точности расчета перемещений фундаментов в грунтовом основании по ПК PLAXIS для практики проектирования ВЛ (рис. 5). Однако расчет системы «конструкция – фундамент – основание» по модели MPL приводит к неопределенным значениям усилий и перемещений в элементах надфундаментной конструкции, так как отсутствует реакция или изменение усилий и перемещений в ее элементах при изменении модуля деформации грунта при расчете как промежуточной (рис. 9), так и анкерно-угловой опор (рис. 10).

Как следует из табл. 3, 4 и рис. 9, 10, система «фундаменты – основание» успешно заменяется на стержневой аналог или «паучки» по модели МСА, а далее выполняется расчет надфундаментной конструкции с «паучками» с применением ПК LIRA Soft10, SCAD++ и других, использующих МКЭ (рис. 6). Расчет успешно выполняется в случае упругого грунтового основания с модулем деформации грунта $E_{гр}$, как правило, свойственного промежуточным опорам. Таким образом, предложен новый метод совместного расчета упругой системы «конструкция – фундамент – основание» с определением перемещений фундаментов узлов надфундаментной конструкции и усилий в ее элементах, отличающийся использованием современных программных комплексов, основанных на методике конечных элементов.

Однако при продолжении исследований для расчета анкерно-угловых опор в связи с нелинейной работой основания потребуются разработка специальных моделей, имитирующих физическую нели-

нейность работы железобетонных конструкций фундаментов и грунтового основания с учетом фактора времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты представленных натуральных экспериментальных исследований при нагрузках основных расчетных режимов свидетельствуют о наличии существенных перемещений фундаментов, достигающих 60 мм и более, и значительном влиянии деформаций грунтового основания на НДС элементов конструкций опор и фундаментов ВЛ.

Разработаны расчетные схемы системы «конструкция – фундаменты – основание» промежуточной и анкерно-угловой решетчатой опоры ВЛ 330 кВ для ПК PLAXIS и LIRA с моделями стержневого аналога (MPL и МСА соответственно) и установлен интервал допустимых значений модуля деформаций грунта $E_{гр} = 10\text{--}\infty$ МПа, позволяющий определять предельные значения усилий в элементах надфундаментной конструкции опоры ВЛ с учетом перемещений фундаментов.

Система «конструкция – фундаменты – основание» со стержневой моделью МСА преобразована в единую стержневую систему, усилия в элементах которой определены при помощи известных программных комплексов на основе МКЭ, что приводит к достоверным решениям для промежуточных опор ВЛ.

Использование модели MPL в ПК PLAXIS дает достоверные значения перемещений, удовлетворительно соответствующие опытным значениям из натурального эксперимента при испытании бетонного фундамента, но при расчете системы «конструкция – фундамент – основание» такая модель не дает корректных значений усилий в элементах надфундаментной конструкции при переменном модуле деформаций грунта.

При продолжении изучения взаимодействия конструкций и грунтового основания решетчатых анкерно-угловых опор ВЛ в последующих публикациях предполагается исследование НДС конструкций на крупномасштабной модели в условиях длительного сопротивления грунтовых оснований, характеризующихся нелинейными деформациями под нагрузкой.

Выполнение расчетов конструкций опор и фундаментов системы «конструкция – фундамент – основание» обеспечит более точное проектирование конструкций для каждого пикета трассы ВЛ, так называемое индивидуальное проектирование ВЛ, что значительно сократит расход стали и бетона на строительство ВЛ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудишин Ю.И., Михалев Н.Я., Туснин А.Р., Беленя Е.И. Из серии «Наши юбиляры». М. : МГСУ, 2013. 40 с.
2. Санжаровский Р.С., Сенькин Н.А. Профессор В.А. Трулль — талантливый ученый и педагог (к 100-летию со дня рождения) // Архитектура, строительство, транспорт. 2016. С. 70–73.
3. Стрелецкий Н.С. Избранные труды. М. : Стройиздат, 1975. 422 с.
4. Трулль В.А. Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1966. 43 с.
5. Исследование действительной работы стальных конструкций промышленных цехов : сб. ст. / под ред. проф. С.А. Бернштейна. М. ; Л. : Госстройиздат, 1938. 196 с.
6. Шапиро Г.А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. М. : Госстройиздат, 1952. 285 с.
7. Беленя Е.И. Экспериментальное исследование предельных состояний комбинированных стальных рам при статической нагрузке // Доклады межвузовской конференции по испытаниям и сооружениям. 1958. С. 120–129.
8. Беленя Е.И. Действительная работа и расчет поперечных рам стальных каркасов одноэтажных производственных зданий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1959. 26 с.
9. Хомуцкий Н.Ф., Аистов Н.Н., Квасников Е.Н., Лобовиков А.С. Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт за 125 лет. 1832–1957. Л. : Госстройиздат, 1958. 211 с.
10. Черных А.Г., Рыбнов Е.И., Сенькин Н.А., Шмидт А.Б., Гордиенко В.Е., Астахов И.В. и др. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации. СПб., 2022. 356 с. EDN IDBLHY.
11. Трулль В.А., Сенькин Н.А. Исследование влияния перемещений фундаментов на усилия в стержнях сооружений башенного типа // Металлические конструкции и испытания сооружений : межвузовский тематический сб. тр. 1980. С. 25–32.
12. Сенькин Н.А. Исследование совместной работы конструкций и основания сооружений башенного типа : дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1980. 143 с.
13. Сенькин Н.А. Учет совместной работы конструкций и основания при проектировании стальных опор линий электропередачи // Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены : тр. Междунар. конф. по геотехнике ТК-207 ISSMGE. 2014. Т. 2. С. 93–100.
14. Сенькин Н.А., Белякова Т.Е., Мальчиков Д.А., Васильев В.С. Действительная работа стальных конструкций воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше // Металлические конструкции. 2022. Т. 28. №. 1. С. 5–18. EDN FEJAMT.
15. Herman A., Cuer N.R., DiGiola A.M.Jr., Vanner M.J. The Design of Transmission Line Support Foundations — an Overview 206 // CIGRE. Working Group. 2002. 68 p.
16. Richards D.J., Powrie W., Blake A.P. Full-scale tests on laterally loaded railway overhead line equipment mast foundations // Géotechnique. 2023. Vol. 73. Issue 3. Pp. 189–201. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.312
17. Varghese A., Thomas J. Influence of Soil-Structure Interaction on the Structural Performance of D-30 Transmission Line Tower // Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2019. Pp. 61–71. DOI: 10.1007/978-981-13-1202-1_5
18. Jendoubi A., Legeron F. Soil-Structure Interaction Effects on Dynamic Behaviour of Transmission Line Towers // Computers, Materials & Continua. 2022. Vol. 70. Issue 1. Pp. 1461–1477. DOI: 10.32604/cm.2022.018832
19. Zhang G., Liu M., Cheng S., Wang M., Zhao C., Zhao H. et al. Research on Transmission Line Tower Tilting and Foundation State Monitoring Technology Based on Multi-Sensor Cooperative Detection and Correction // Energy Engineering. 2024. Vol. 121. Issue 1. Pp. 169–185. DOI: 10.32604/ee.2023.027907
20. Zhang S., Fan Z., Sun L., Qiu J. Influence of Goaf on Stability of Transmission Line Tower Foundation // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 358. P. 010003. DOI: 10.1051/e3sconf/202235801003
21. Shu Q. Research on anti-foundation-displacement performance and reliability assessment of 500 kV transmission tower in mining subsidence area // The Open Civil Engineering Journal. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 87–92. DOI: 10.2174/1876523801104010087
22. Shu Q., Yuan G., Huang Z., Ye S. The behaviour of the power transmission tower subjected to horizontal support's movements // Engineering Structures. 2016. Vol. 123. Pp. 166–180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.027
23. Shu Q., Yuan G., Jia L., Wang Y.A., Zhou J. A new simple design method for the plate foundation of a transmission tower in subsidence area // The Open Civil Engineering Journal. 2016. Vol. 10. Issue 1. Pp. 251–265. DOI: 10.2174/1874149501610010251
24. Zhuang X., Wen W., Zhou R., Tao G., Li W. The Effect of Pore Solution on the Hysteretic Curve of Expansive Soil under Cyclic Loading // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2023. Vol. 19. Issue 7. Pp. 1963–1981. DOI: 10.32604/fdmp.2023.026348
25. Barabash M., Tomashebskiy A. Bar analogues for modelling of building structures // International Journal for Computational Civil and Structural Engi-

neering. 2020. Vol. 16. Issue 3. Pp. 100–106. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-100-106

26. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. Киев : Будивельник, 1967. 184 с.

27. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л. : Стройиздат, 1988. 415 с.

28. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб. : Геореконструкция, 2014. 328 с.

29. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981. 317 с.

30. Разоренов И.Ф. Экспериментальные исследования устойчивости одиночных фундаментов при действии горизонтальной нагрузки // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства. Вып. 13: Основания и фундаменты. 1955. С. 55–145.

Поступила в редакцию 31 июля 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 20 марта 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Александрович Сенькин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; главный эксперт; **Россети Научно-технический центр (Россети НТЦ)**; 115201, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3; SPIN-код: 1344-9412, РИНЦ ID: 1035786, Scopus: 57309511900, ResearcherID: 9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru;

Валерий Сергеевич Васильев — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7280-4781, РИНЦ ID: 1205053, ORCID: 0000-0002-9247-9818; valera-vasilev-99@mail.ru.

Вклад авторов:

Сенькин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, сбор и обработка материала, написание и научное редактирование, итоговые выводы.

Васильев В.С. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, разработка графической части, разработка программ расчета и реализация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kudishin Yu.I., Mikhalev N.Ya., Tusnin A.R., Belenya E.I. *From the series "Our anniversaries"*. Moscow, MGSU, 2013; 40. (rus.).

2. Sanzharovskiy R.S., Senkin N.A. Professor V.A. Trull' is a talented scientist and teacher (on the occasion of the 100th anniversary of his birth). *Architecture, Construction, Transport*. 2016; 70-73. (rus.).

3. Streletskiy N.S. *Selected works*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 422. (rus.).

4. Trull' V.A. *Investigation of the actual operation of overhead transmission line support structures : abstract. dis. ... doc. technical sciences*. Leningrad, 1966; 43. (rus.).

5. *Investigation of the actual operation of steel structures of industrial workshops : collection of articles / ed. by prof. S.A. Bernstein*. Moscow ; Leningrad, Gosstroyizdat, 1938; 196. (rus.).

6. Shapiro G.A. *Actual operation of steel structures in industrial workshops*. Moscow, Gosstroyizdat, 1952; 285. (rus.).

7. Belenya E.I. Experimental investigation of the limiting conditions of combined steel frames under static load. *Reports of the interuniversity conference on testing and facilities*. 1958; 120-129. (rus.).

8. Belenya E.I. *Actual work and calculation of transverse frames of steel frames of single-storey industrial buildings : abstract. diss. ... doc. technical sciences*. Moscow, 1959; 26. (rus.).

9. Khomutetskiy N.F., Aistov N.N., Kvasnikov E.N., Lobovikov A.S. *Leningrad Order of the Red Banner of Labor Institute of Civil Engineering for 125 years. 1832–1957*. Leningrad, Gosstroyizdat, 1958; 211. (rus.).

10. Chernykh A.G., Rybnov E.I., Senkin N.A., Schmidt A.B., Gordienko V.E., Astakhov I.V. et al. *The study of the work of metal and wooden structures and the assessment of their service life, taking into account the operating conditions*. St. Petersburg, 2022; 356. EDN IDBLHY. (rus.).

11. Trull' V.A., Senkin N.A. Investigation of the effect of foundation movements on the forces in the rods of tower-type structures. *Metal structures and testing of structures : inter-university thematic collection of works*. 1980; 25-32. (rus.).

12. Senkin N.A. *Investigation of the joint work of structures and foundations of tower-type structures : dis. ... cand. of technical sciences*. 1980; 143. (rus.).

13. Senkin N.A. Consideration of the joint work of structures and foundations in the design of steel poles of power transmission lines. The interaction of foundations and structures. *Underground structures and retaining walls : Proceedings of the International Conference on Geotechnics TK-207 ISSMGE*. 2014; 2:93-100. (rus.).
14. Senkin N., Belyakova T., Malchikov D., Vasilyev V. The actual operation of steel structures of overhead power lines with a voltage of 35 kV and above. *Metal Constructions*. 2022; 28(1):5-18. EDN FEJAMT. (rus.).
15. Herman A., Cuer N.R., DiGiola A.M.Jr., Vanner M.J. The Design of Transmission Line Support Foundations – An Overview 206. *CIGRE. Working Group*. 2002; 68.
16. Richards D.J., Powrie W., Blake A.P. Full-scale tests on laterally loaded railway overhead line equipment mast foundations. *Géotechnique*. 2023; 73(3):189-201. DOI: 10.1680/jgeot.20.p.312
17. Varghese A., Thomas J. Influence of Soil-Structure Interaction on the Structural Performance of D-30 Transmission Line Tower. *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*. 2019; 61-71. DOI: 10.1007/978-981-13-1202-1_5
18. Jendoubi A., Legeron F. Soil-Structure Interaction Effects on Dynamic Behaviour of Transmission Line Towers. *Computers, Materials & Continua*. 2022; 70(1):1461-1477. DOI: 10.32604/cmc.2022.018832
19. Zhang G., Liu M., Cheng S., Wang M., Zhao C., Zhao H. et al. Research on Transmission Line Tower Tilting and Foundation State Monitoring Technology Based on Multi-Sensor Cooperative Detection and Correction. *Energy Engineering*. 2024; 121(1):169-185. DOI: 10.32604/ee.2023.027907
20. Zhang S., Fan Z., Sun L., Qiu J. Influence of Goaf on Stability of Transmission Line Tower Foundation. *E3S Web of Conferences*. 2022; 358:010003. DOI: 10.1051/e3sconf/202235801003
21. Shu Q. Research on anti-foundation-displacement performance and reliability assessment of 500 kV transmission tower in mining subsidence area. *The Open Civil Engineering Journal*. 2011; 5(1):87-92. DOI: 10.2174/1876523801104010087
22. Shu Q., Yuan G., Huang Z., Ye S. The behaviour of the power transmission tower subjected to horizontal support's movements. *Engineering Structures*. 2016; 123:166-180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.027
23. Shu Q., Yuan G., Jia L., Wang Y.A., Zhou J. A new simple design method for the plate foundation of a transmission tower in subsidence area. *The Open Civil Engineering Journal*. 2016; 10(1):251-265. DOI: 10.2174/1874149501610010251
24. Zhuang X., Wen W., Zhou R., Tao G., Li W. The Effect of Pore Solution on the Hysteretic Curve of Expansive Soil under Cyclic Loading. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2023; 19(7):1963-1981. DOI: 10.32604/fdmp.2023.026348
25. Barabash M., Tomashebskyi A. Bar analogues for modelling of building structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020; 16(3):100-106. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-100-106
26. Klepikov S.N. *Calculation of structures on an elastic base*. Kyiv, Budivelnik, 1967; 184. (rus.).
27. Dalmatov B.I. *Soil mechanics, foundations and foundations*. Leningrad, Stroyizdat, 1988; 415. (rus.).
28. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. *The basics of joint calculations of buildings and foundations*. St. Petersburg, Georeconstruction, 2014; 328. (rus.).
29. Tsyrovich N.A., Ter-Martirosyan Z.G. *Experimental studies of the stability of single foundations under the action of horizontal load*. Moscow, Higher School, 1981; 317. (rus.).
30. Razorenov I.F. Experimental studies of the stability of single foundations under the action of horizontal load. *Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction. Issue 13: Foundations and foundations*. 1955; 55-145. (rus.).

Received July 31, 2024.

Adopted in revised form on March 20, 2025.

Approved for publication on March 20, 2025.

B I O N O T E S : **Nikolai A. Senkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; chief expert; **Rosseti Scientific and Technical Center**; build. 3, 22 Kashirskoe shosse, Moscow, 115201, Russian Federation; SPIN-code: 1344-9412, ID RSCI: 1035786, Scopus: 57309511900, ResearcherID: 9658-2023, ORCID: 0000-0002-7086-1960; senkin1952@yandex.ru;

Valery S. Vasilev — postgraduate student of the Department of Metal and Wooden Structures; **St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7280-4781, ID RSCI: 1205053, ORCID: 0000-0002-9247-9818; valera-vasilev-99@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nikolai A. Senkin — scientific guidance, research concept, collection and processing of material, writing and scientific editing, final conclusions.

Valery S. Vasilev — collection and processing of material, writing of the source text, development of the graphic part, development of calculation programs and implementation.

The authors declare that there is no conflict of interest.