



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2014, ТОМ 20, НОМЕР 2, 119–137

УДК 621.315.1

(14)-0312-1

## **МЕТОДИКА МЕХАНІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ВИСОКОГО КЛАСУ БЕЗВІДМОВНОСТІ У СКЛАДІ ЄДИНОЇ СИСТЕМИ**

**Я. В. Назім**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька обл., Україна, 86123.*

*E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Отримана 10 квітня 2014; прийнята 24 квітня 2014.*

**Анотація.** Наведено методику механічного розрахунку повітряних ліній електропередавання високого класу безвідмовності, що дозволяє визначати напруження і деформації в проводах, грозозахисних тросах, арматурі і конструкціях опор ПЛ у складі єдиної системи. Методика враховує цілий ряд взаємозалежних чинників: кліматичні умови, конструктивні параметри ПЛ (довжина прольоту, стріла провисання, електричні габарити), профіль та план (схема) траси, розрахункові режими роботи і сполучення навантажень і ін. Реалізована в середовищі програмного комплексу «MIS1», який розроблено в Донбаській національній академії будівництва і архітектури. Для перевірки збіжності результатів, визначених з використанням даної методики, з даними, отриманими на підставі рекомендацій Європейського комітету електротехнічної стандартизації (CENELEC – EN 50174), була виконана серія розрахунків навантажень на конструкції опор для умовної ділянки ПЛ однотипного конструктивного рішення і профілю місцевості, розташованої в різних кліматичних умовах України. Методика апробована на реальному міжсистемному об'єкті – дволанцюговому переході магістральної ПЛ 154 кВ КремГЕС – КремТЕЦ через р. Дніпро.

**Ключові слова:** методика розрахунку, повітряна лінія електропередавання (ПЛ), напружено-деформований стан, кліматичні навантаження, програмний комплекс.

## **МЕТОДИКА МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО КЛАССА БЕЗОТКАЗНОСТИ В СОСТАВЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ**

**Я. В. Назим**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

*E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Получена 10 апреля 2014; принята 24 апреля 2014.*

**Аннотация.** Приведено методику механического расчета воздушных линий электропередачи высокого класса безотказности, которая позволяет определять напряжения и деформации в проводах, грозозащитных тросах, арматуре и конструкциях опор ВЛ в составе единой системы. Методика учитывает целый ряд взаимозависимых факторов: климатические условия, конструктивные параметры ВЛ (длина пролета, стрела провеса, электрические габариты), профиль и план (схема) трассы, расчетные режимы работы и сочетания нагрузок и др. Реализована в среде программного комплекса «MIS1», разработанного в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Для проверки сходимости результатов, определенных с использованием данной методики, с данными, полученными на основании рекомендаций Европейского комитета электротехнической стандартизации (CENELEC –

EN 50174), была выполнена серия расчетов нагрузок на конструкции опор для условного участка ВЛ одностипного конструктивного решения и профиля местности, расположенного в различных климатических условиях Украины. Методика апробирована на реальном межсистемном объекте – двухцепном переходе магистральной ВЛ 154 кВ КремГЭС – КремТЭЦ через р. Днепр.

**Ключевые слова:** методика расчета, воздушная линия электропередачи (ВЛ), напряженно-деформированное состояние, климатические нагрузки, программный комплекс.

## CALCULATION PROCEDURE OF THE OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES OF HIGH RELIABILITY AS PART OF UNIFIED MECHANICAL SYSTEM

Yaroslav Nazim

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
2, Derzhavin Str., Makiiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.  
E-mail: yaroslav.nazim@gmail.com*

*Received 10 April 2014; accepted 24 April 2014.*

**Abstract.** Calculation procedure for overhead power transmission lines of high reliability has been developed, which allows to determine stresses and strains in the conductors, ground-wire cables, fittings and PTL towers as part of a unified mechanical system. Calculation procedure takes into account a number of interrelated factors – climatic conditions, design parameters of overhead lines (length of span, sag, electrical clearances), terrain profile and plan (scheme) PTL, calculation modes and load combinations, etc. It has been implemented in the program complex «MIS11», which was developed in the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A series of load calculations on support structure for section line of the same type of conditional constructive solutions and terrain profile located in different climatic conditions of Ukraine has been performed to verify the convergence of the results determined using this calculation procedure with the data obtained on the basis of the recommendations of the European Committee of Electrotechnical Standardization (CENELEC – EN 50174). Calculation procedure has been tested on a real object of intersystem value – double circuit large transmission line crossing 154 kV «Kremenchuk Hydroelectric Station – Kremenchuk Heat and Power Station» on the river Dnieper.

**Keywords:** calculation procedure, overhead power transmission line (PTL), stress-strain state, climatic loads, software package.

### Введение

В соответствии с классификацией воздушных линий электропередачи линии высокого (220 кВ) и сверхвысокого класса напряжений (330–750 кВ), предназначенные для передачи электроэнергии от генерирующих электростанций, а также для связи между энергосистемами, относятся к магистральным ВЛ. В свою очередь, действующая в Украине глава 2.5 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1] регламентирует четыре класса безотказности (КБ) линий электропередачи в зависимости от напряжения ВЛ (табл. 1), что координируется с международными рекомендациями [2–4] и соответствуют классам последствий (ответственности), нормированным

ДСТУ-НБ В.1.2-16:2013 «Определение классов последствий (ответственности) и категории сложности объектов строительства» [5] и ДБН 1.2-14-2009 «Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований» [6]: 1КБ и 2КБ – СС1, 3КБ – СС2, 4КБ – СС3. Уровень безотказности характеризует вероятность того, что на протяжении расчетного периода эксплуатации фактическая нагрузка не превысит проектную.

Определяющую роль при проектировании и эксплуатации конструкций опор ВЛ высокого класса безотказности (3КБ, 4КБ) электропередачи играет проблема обеспечения надежности

Таблица 1. Характеристики классов безотказности ВЛ

Класс безотказности	Напряжение ВЛ, кВ	Расчетный срок эксплуатации, лет	Средний период повторяемости нагрузок, лет	
			Предельных *	Эксплуатационных **
1КБ	До 1	30	30	5
2КБ	1–35	50	50	10
<b>3КБ</b>	<b>110–330</b>	<b>50</b>	<b>150</b>	<b>15</b>
<b>4КБ</b>	<b>500–750</b>	<b>50</b>	<b>500</b>	<b>25</b>

Примечания:

\* Расчеты несущей способности опор и фундаментов (первая группа предельных состояний).

\*\* Расчеты перемещений опор и фундаментов, трещиностойкости железобетонных конструкций (вторая группа предельных состояний), расчеты проводов, тросов, изоляторов, арматуры (допускаемые напряжения и разрушающие нагрузки).

всех конструктивных элементов магистральных линий в течение всего периода эксплуатации при воздействии климатических нагрузок. Основными нагрузками на опоры ВЛ являются горизонтальные нагрузки, возникающие в режиме максимального ветра или при сочетании ветра с гололедом, а также нагрузки аварийных режимов, возникающие при обрыве проводов и тросов. При этом любая ВЛ является сетевой системой, в которой совместно деформируются гибкие элементы (токоведущие провода, грозозащитные тросы) и конструкции опор. Кроме того, в соответствии с последними тенденциями в зарубежной и отечественной практике проектирования нагрузки на конструкций ВЛ следует определять по критерию обеспеченности безотказной работы механической части ВЛ под действием внешних факторов за расчетный период эксплуатации линии.

Учитывая массовость и высокую степень ответственности опор воздушных линий электропередачи создание методики механического расчета магистральных ВЛ в составе единой сетевой системы с учетом климатических и орографических особенностей местности, а также с ранжированием уровней надежности, как ВЛ в целом, так и каждого ее конструктивного элемента (опоры, провода, тросы, линейная арматура, изоляторы), является важной научно-технической проблемой, поскольку ее решение обусловлено необходимостью учета ряда специфических особенностей, к которым, прежде всего, относится сложный характер деформирования и многообразие возможных форм наступления различных предельных состояний в расчетных режимах.

### Методика механического расчета линии электропередачи как единой конструкционной системы

Для анализа напряженно-деформированного состояния опор необходимо рассматривать конструкции опор ВЛ не отдельно, как это осуществляется по традиционной методике [7, 8], а с учетом совместности деформаций всех конструктивных элементов электрической сети. В отечественной практике проектирования ВЛ механический расчет проводов и тросов производится по методу допускаемых напряжений вне зависимости от величин деформаций конструкций опоры или ее элементов; расчет изоляторов и арматуры выполняется по методу разрушающих нагрузок; расчет конструкций опор и фундаментов ВЛ производится по методу предельных состояний. Анализ показывает, что для сложных и ответственных конструкций ВЛ использование для проектирования и расчета существующей методики, в которой конструктивные элементы рассматриваются отдельно, не дает должного экономического эффекта и приводит к существенному перерасходу материальных и трудовых затрат. В свою очередь предложенная в работе [9] методика механического расчета ВЛ как единой системы не учитывает новых зарубежных подходов по координации прочности и ранжированию уровней надежности [2–4], а также новых отечественных методических разработок по климатическому обеспечению электро сетевого строительства, основанных на многолетних наблюдениях метеопараметров в Украине и отображающих распределение климатических данных метеостанций [13–15].

В рассматриваемой методике в данной работе в качестве расчетной модели принимается часть линии электропередачи – анкерванный участок (расстояние между смежными анкерными опорами). Данная методика механического расчета ВЛ применима в первую очередь к проектируемым (вновь строящимся) и реконструируемым линиям электропередачи высокого класса безотказности (магистральным электрическим линиям высокого напряжения), но ее использование может быть также обосновано и для более широкого круга ВЛ (электрическим распределительным линиям среднего напряжения), – эксплуатируемых в районах с повышенными климатическими нагрузками, где количество гололедно-ветровых аварий на ВЛ выше средней аварийности по региону, в условиях горной местности, а также ВЛ, сооружаемых на двух- и многоцепных опорах.

Для примера рассмотрим отдельный анкерванный участок – двухцепную воздушную линию электропередачи, состоящую из двух анкерных опор и расположенных между ними  $n$ -го количества промежуточных опор, к которым подвешены три токоведущих провода и один грозозащитный трос (рис. 1).

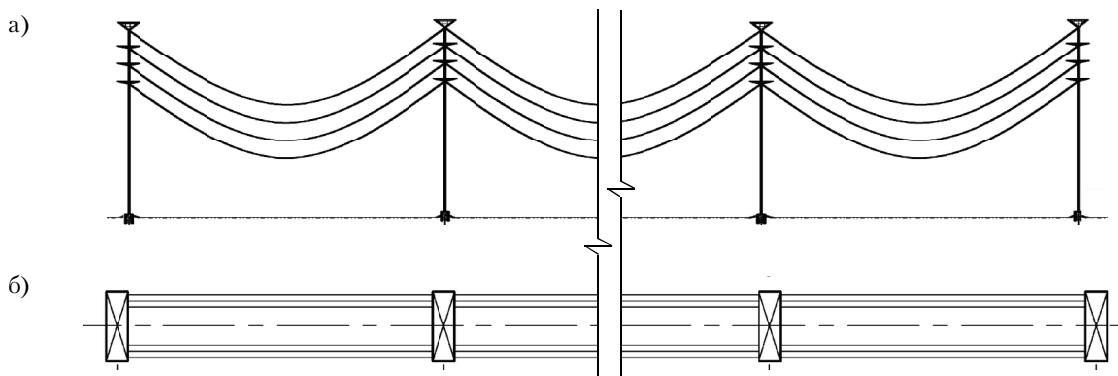
Для повышения надежности линий электропередачи необходимо совершенствовать подходы к учету нагрузок и воздействий на ВЛ. При проектировании ВЛ учитывают постоянные и переменные (длительные, кратковременные, аварийные) нагрузки и воздействия. К постоянным нагрузкам относятся нагрузки, создаваемые весом строительных конструкций, проводов, тросов и оборудования ВЛ; натяжением проводов и тросов при среднегодовой температуры воздуха

и отсутствии ветра и гололеда; весом и давлением грунта на фундаменты; давлением воды на фундаменты в руслах рек, а также предварительным напряжением конструкций. К переменным нагрузкам относятся нагрузки, создаваемые давлением ветра на опоры, провода и тросы; весом гололеда на проводах и тросах; дополнительным натяжением проводов и тросов от климатических нагрузок и воздействий сверх их значения при среднегодовой температуре; давлением воды на опоры и фундаменты в поймах рек; давлением льда; нагрузками, которые возникают при изготовлении и перевозке конструкций, а также при монтаже конструкций, проводов и тросов. К аварийным нагрузкам относятся нагрузки, возникающие от обрыва проводов и тросов, и сейсмические нагрузки.

Нагрузки следует определять по критерию обеспеченности безотказной работы механической части ВЛ под действием внешних факторов за расчетный период эксплуатации линии.

При учете влияния нагрузок на надежность элементов ВЛ необходимо рассмотрение силовых факторов в виде стационарных случайных процессов. Однако недостаточно полно на сегодняшний день изучена возможность сочетания различных типов нагрузок, поэтому совместные функции распределения скоростей ветра и массы гололеда для различных климатических районов отсутствуют. Учитывая это, для вычисления вероятности безотказной работы элемента в  $t$ -м году используются функции распределения годовых максимумов нагрузок.

В Украине к настоящему времени собран большой объем статистических данных о метео-



**Рисунок 1.** Расчетная модель линии электропередачи: а) продольный профиль участка ВЛ, б) схема (план).

рологических условиях во всех регионах страны [15]. Накопленная информация позволяет получить распределения годовых максимумов всех типов климатических нагрузок, воспринимаемых электросетевыми конструкциями. Известны параметры распределений следующих величин:

- 1) максимальная распределенная гололедная нагрузка, Н/м;
- 2) соответствующая ветровая нагрузка на провод, покрытый гололедом, Н/м;
- 3) максимальная скорость ветра в режиме гололеда, м/с;
- 4) распределенная гололедная нагрузка при максимальной скорости ветра, Н/м;
- 5) распределенная гололедная нагрузка при максимальных размерах гололеда, Н/м;
- 6) распределенная ветровая нагрузка в режиме гололеда при максимальной скорости ветра, Н/м;
- 7) распределенная ветровая нагрузка в наихудшем гололедно-ветровом режиме, Н/м;
- 8) максимальная скорость ветра, м/с.

Для определения значений климатических параметров с определенным периодом повторяемости ряды полученных годовых максимумов аппроксимируют асимптотическим распределением экстремальных значений [11].

При расчете на вероятность безотказной работы рекомендуется использование распределения Гумбеля для экстремальных значений (распределение I-го типа), или, как его еще называют, – двойное экспоненциальное.

Функция распределения существует на интервале  $(-\infty; +\infty)$  и имеет вид:

– для наибольших значений:

$$F_{1\max}(x) = \exp\{-\exp[-a(x-u)]\};$$

– для наименьших значений:

$$F_{1\min}(x) = 1 - \exp\{-\exp[a(x-u)]\},$$

где  $a, u$  – параметры распределения;

$x$  – текущее значение нагрузки.

Пример параметров распределений нагрузок для различных регионов Украины приведен в табл. 2.

Таблица 2. Пример параметров распределений климатических нагрузок для различных регионов Украины \*

Наименование населенного пункта, в котором находится метеостанция, область	Параметр **	Максимальная распределенная гололедная нагрузка, Н/м	Соответствующая ветровая нагрузка на провод, покрытый гололедом, Н/м	Максимальная скорость ветра в режиме гололеда, м/с	Распределенная гололедная нагрузка при максимальной скорости ветра, Н/м	Распределенная гололедная нагрузка при максимальных размерах гололеда, Н/м	Распределенная ветровая нагрузка в режиме гололеда при максимальной скорости ветра, Н/м	Распределенная ветровая нагрузка в наихудшем гололедно-ветровом режиме, Н/м	Максимальная скорость ветра, м/с
Бережаны, Тернопольская	$a$	0,53	2,31	0,43	0,83	3,06	0,67	0,31	0,50
	$u$	0,36	0,07	1,72	0,23	0,02	-0,11	3,07	15,17
Дарьевка, Луганская	$a$	0,08	0,16	0,26	0,07	0,15	0,16	0,21	0,16
	$u$	10,44	2,62	6,86	3,36	2,42	5,56	12,98	18,21
Дебальцево, Донецкая	$a$	0,14	0,43	0,37	0,12	0,55	0,47	0,48	0,33
	$u$	4,47	1,29	5,83	1,26	0,88	2,46	10,49	18,81
Ровно, Ровенская	$a$	0,30	0,54	0,27	0,30	0,61	0,60	0,34	0,43
	$u$	1,15	0,45	4,52	0,32	0,04	1,19	8,75	8,15
Нежин, Черниговская	$a$	0,61	1,48	0,42	1,46	1,75	1,37	0,40	0,45
	$u$	0,95	0,20	3,27	0,43	0,09	0,68	7,07	12,97
Ромны, Сумская	$a$	0,28	1,05	0,34	0,33	1,43	0,65	0,29	0,27
	$u$	2,27	0,44	3,58	1,39	0,03	0,75	5,47	13,09
Одесса, Одесская	$a$	0,10	0,26	0,24	0,10	0,26	0,25	0,25	0,24
	$u$	-0,96	0,16	6,03	-1,41	0,04	0,62	8,23	17,00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

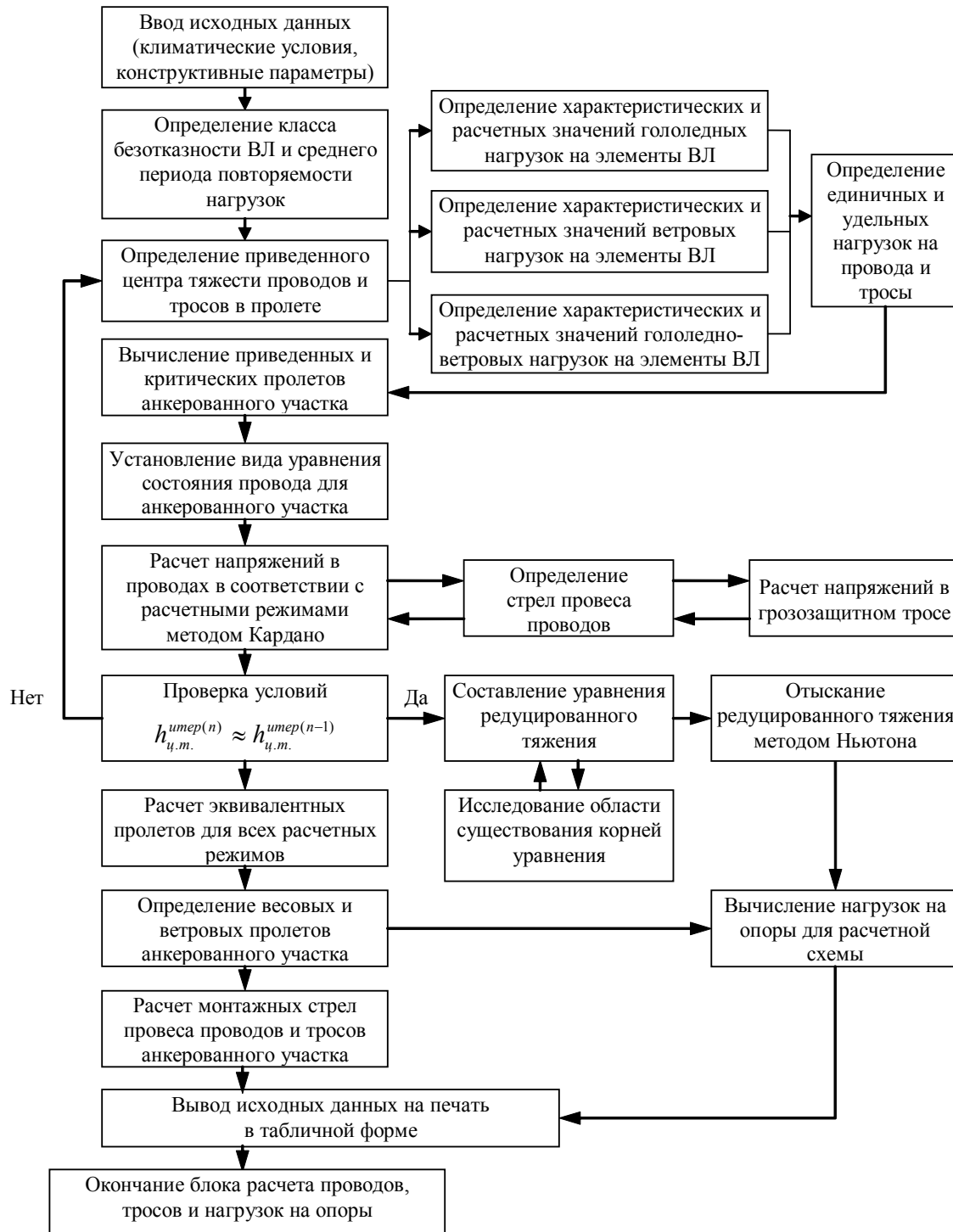
Примечания:

\* Для отдельных климатических районов Украины информация о параметрах распределений ветрового давления (скорости ветра) при гололеде или распределениях массы гололедных отложений при максимальном ветре может отсутствовать.

\*\* Параметры  $a$  и  $u$  даны для погонной нагрузки на стержень диаметром 5 мм.

Как известно, нагрузки от токоведущих проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи являются решающими при расчете опор ВЛ. Для определения нагрузок на конст-

рукции опор ВЛ применен алгоритм расчета, приведенный на рис. 2. Алгоритмы расчета гололедной, ветровой и гололедно-ветровой нагрузки на элементы ВЛ представлены отдельно на рис. 3–6.



**Рисунок 2.** Алгоритм вычисления напряженно-деформированного состояния проводов, тросов и нагрузок на опоры.

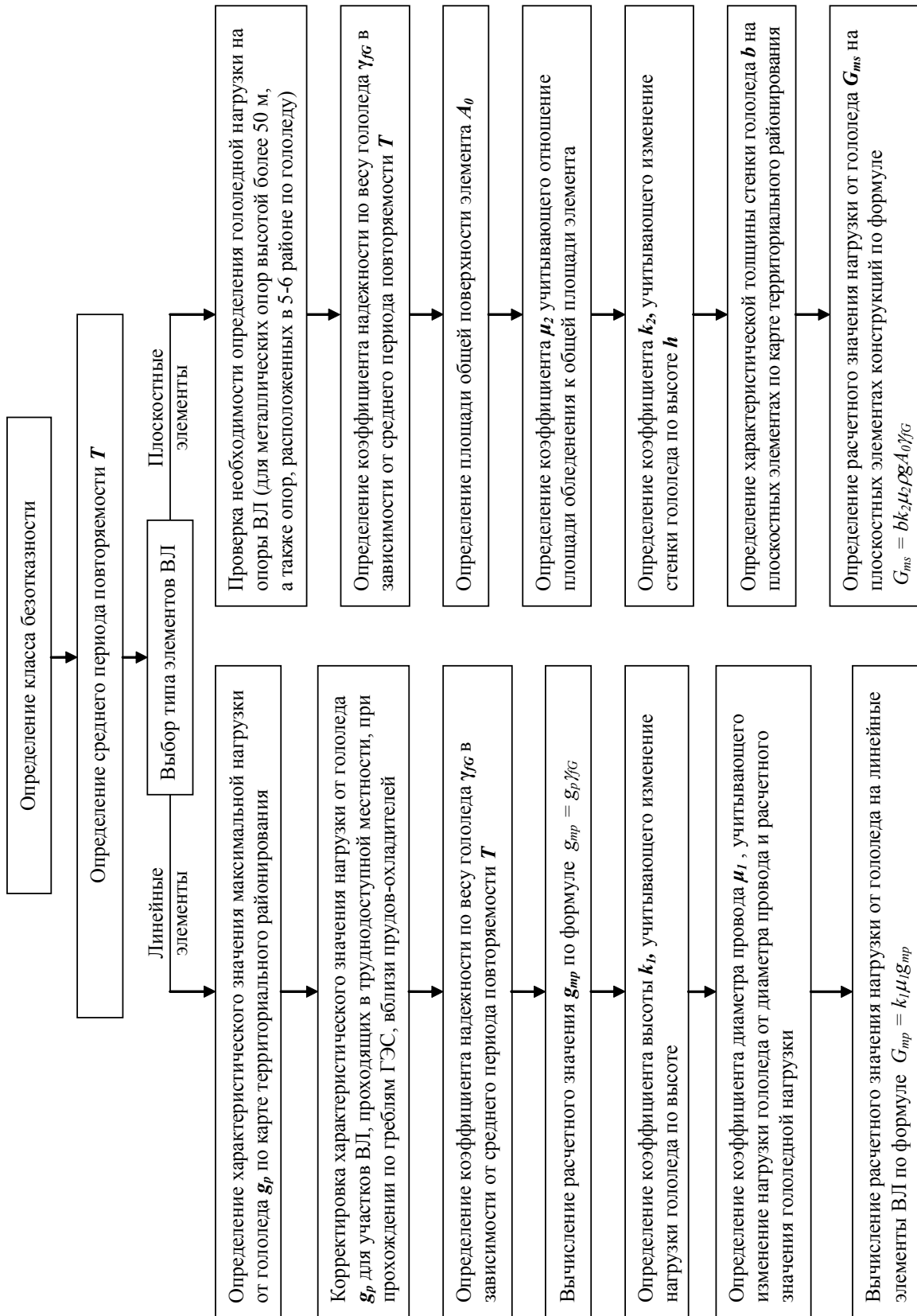


Рисунок 3. Алгоритм расчета гололедной нагрузки на элементы ВЛ.

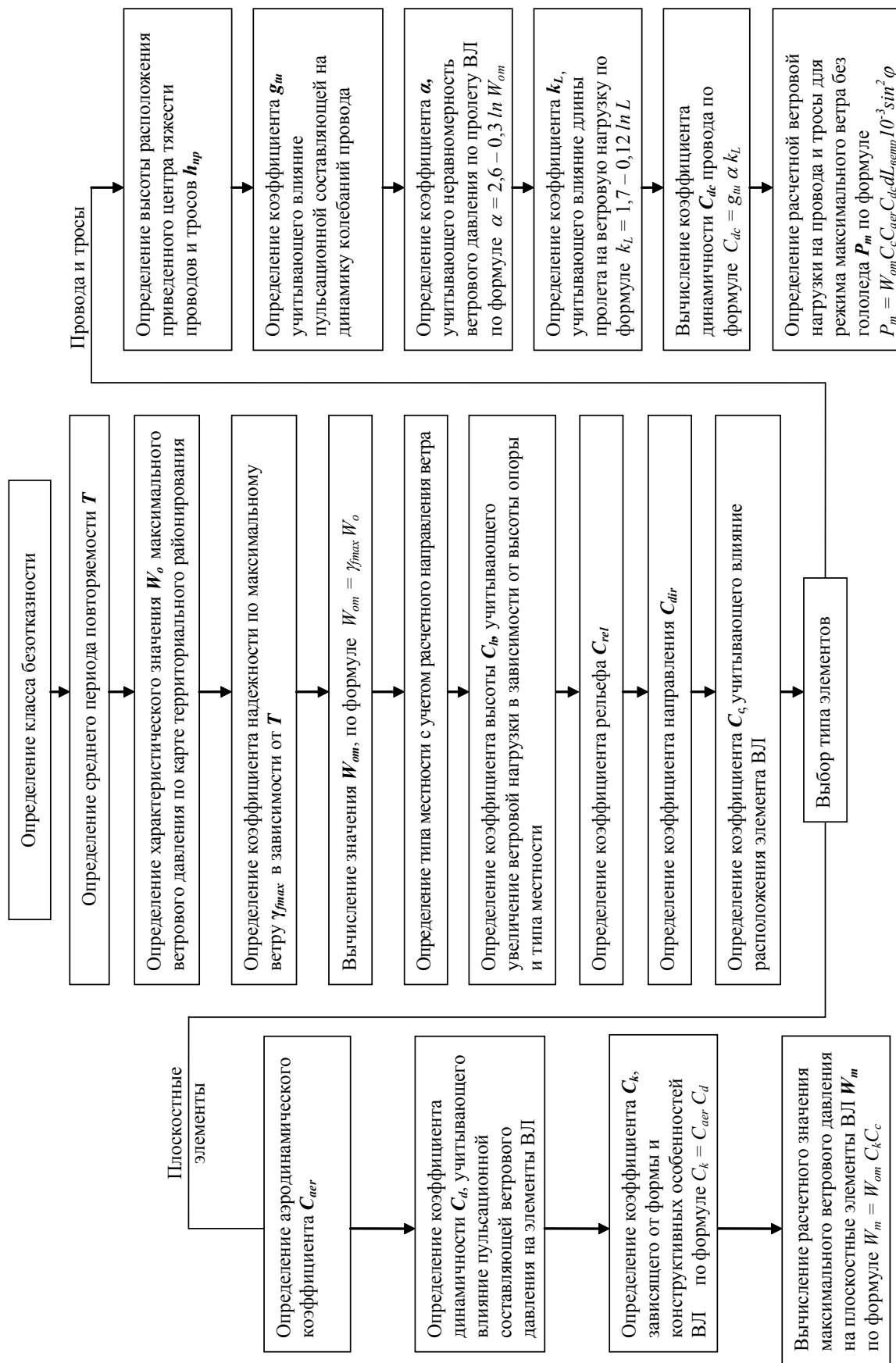


Рисунок 4. Алгоритм расчета ветровой нагрузки на элементы ВЛ.



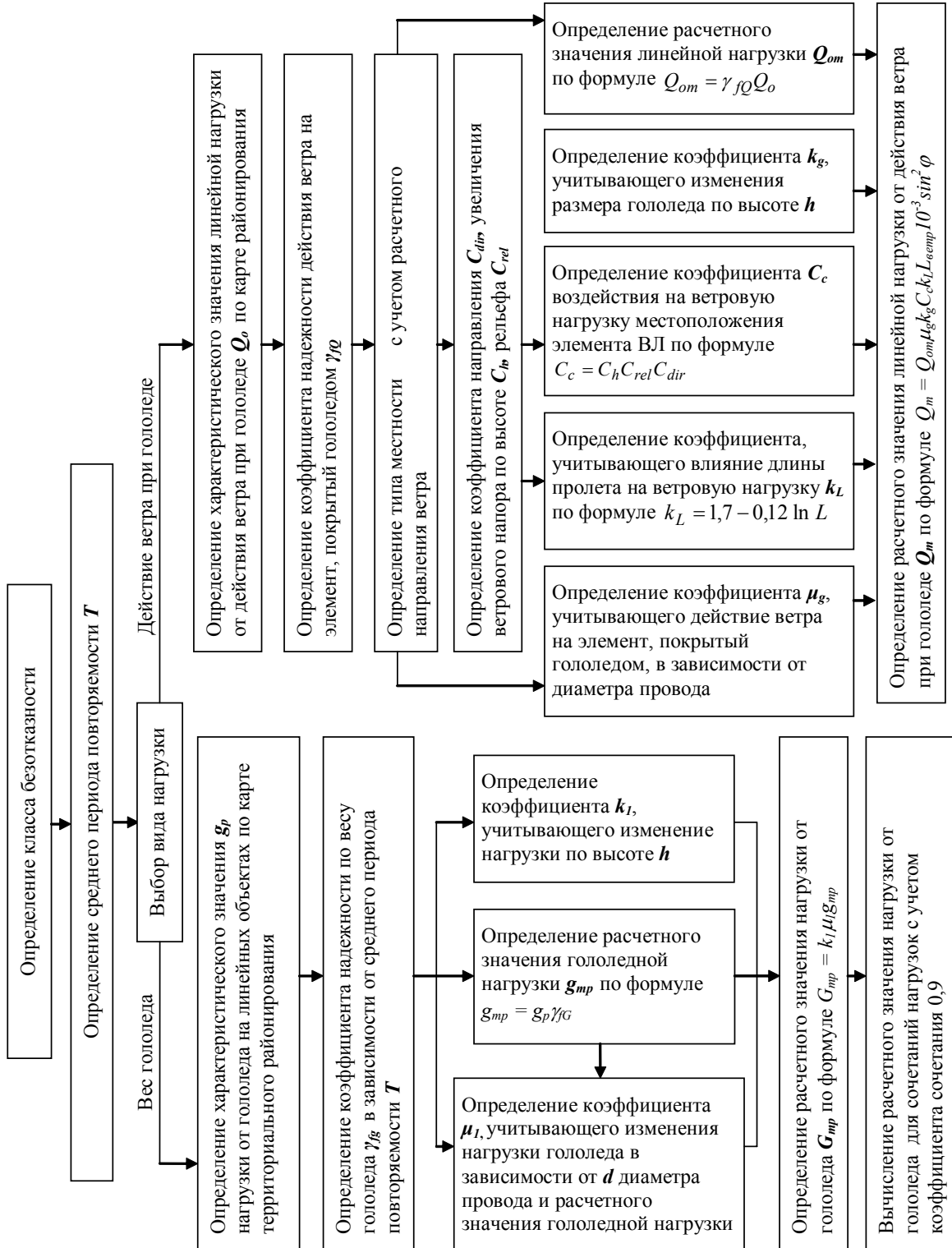


Рисунок 5. Алгоритм расчета гололедно-ветровой нагрузки для линейных элементов ВЛ.

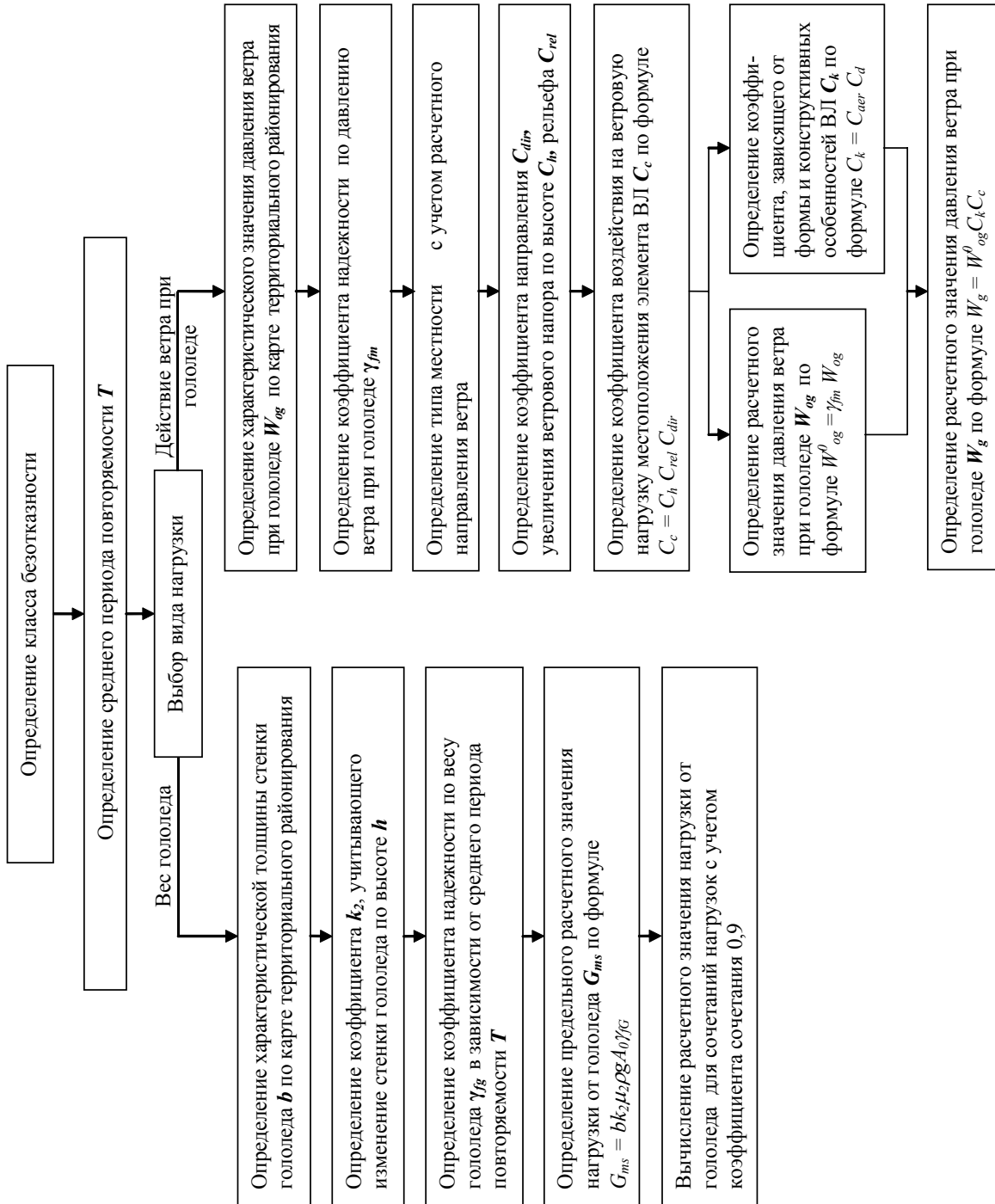


Рисунок 6. Алгоритм расчета гололедно-ветровой нагрузки для плоскостных элементов ВЛ.

Характеристические значения климатических нагрузок для расчета элементов ВЛ, как правило, принимают на основании карт территориального районирования Украины. Для ВЛ высокого класса безотказности рекомендуется уточнение значений климатических нагрузок и воздействий по региональным картам и материалам многолетних наблюдений гидрометеорологических станций и постов управления гидрометеослужбы и собственников электросетей по скорости ветра, интенсивности и плотности гололедно-изморозевых отложений, температуры воздуха, грозовой деятельности и галопирования проводов в зоне трассы ВЛ. При обработке результатов метеорологических наблюдений следует учитывать влияние микроклиматических факторов, обусловленных особенностями естественных условий (пересеченный рельеф местности, высота над уровнем моря, наличие больших водохранилищ, степень лесистости и т. п.), крупных инженерных сооружений (плотины и водосбросы, пруды-охладители, полосы сплошной застройки и т. п.).

При механическом расчете ВЛ рекомендуется применение расчетных режимов (сочетаний) для

проводов и тросов (табл. 3) регламентированных ПУЭ [1], а также с учетом рекомендаций [7, 9].

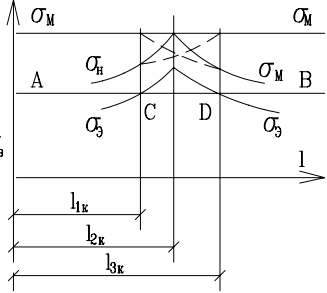
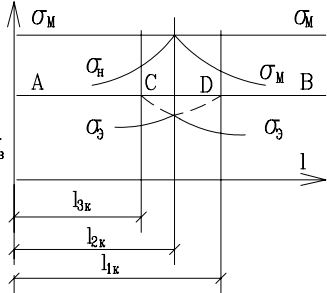
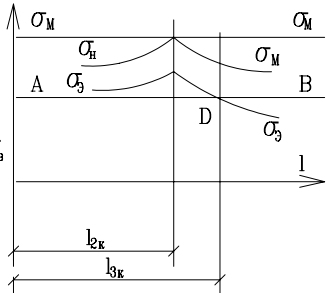
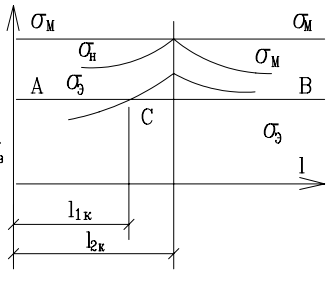
Для расчета напряжений и стрел провеса провода в различных режимах, как правило, используют уравнение состояния провода, устанавливающее математическую зависимость напряжений от нагрузки и температуры. Для определения вида уравнения при расчете проводов ВЛ применимы рекомендации [7] по анализу соотношения существующего пролета с критическим (табл. 4).

Приведенная методика механического расчета воздушных линий электропередачи позволяет определять напряжения и деформации в проводах, грозозащитных тросах, арматуре и конструкциях опор ВЛ в составе единой системы. Методика учитывает целый ряд взаимозависимых факторов таких как: климатические условия, конструктивные параметры ВЛ (длина пролета, стрела провеса, габарит), профиль и план (схема) трассы, расчетные режимы работы и сочетания нагрузок и др. Методика реализована в среде программного комплекса «MISI1» [9], разработанного в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

**Таблица 3.** Расчетные режимы проводов и тросов

Расчетный режим	Сочетание климатических условий	Принимаемая удельная нагрузка
I	Провода и трос покрыты гололедом, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скоростной напор ветра при гололеде	$\gamma_7$
II	Провода и трос покрыты гололедом, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ветра нет	$\gamma_3$
III	Максимальный скоростной напор ветра, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , гололеда нет	$\gamma_6$
IV	Среднегодовая температура, ветра и гололеда нет	$\gamma_1$
V	$t = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ветра и гололеда нет	$\gamma_1$
VI	Низшая температура, ветра и гололеда нет	$\gamma_1$
VII	Максимальная температура, ветра и гололеда нет	$\gamma_1$
VIII	$t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скоростной напор ветра при монтаже 62,5 Па, гололеда нет	$\gamma_8$
IX	$t = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скоростной напор ветра при грозовых перенапряжениях ( $q=0,1q_{\max}$ ; если $q < 62,5$ Па, то $q=62,5$ Па)	$\gamma_9$
X	$t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ветра и гололеда нет	$\gamma_1$

Таблица 4. К определению вида уравнения для расчета проводов ВЛ

Возможные варианты соотношения критических пролетов	Соотношение существующего пролета с критическим	Вид уравнения состояния
<p>1.</p> 	<p><math>l &lt; l_{1k}</math></p> <p><math>l_{1k} &lt; l &lt; l_{3k}</math></p> <p><math>l &gt; l_{3k}</math></p>	$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_M - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_M^2} - \alpha E(t - t_M)$ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_3 - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_3^2} - \alpha E(t - t_3)$ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_H - \frac{\gamma_H^2 El^2}{24\sigma_H^2} - \alpha E(t - t_H)$
<p>2.</p> 	<p><math>l &lt; l_{2k}</math></p> <p><math>l &gt; l_{2k}</math></p>	$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_M - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_M^2} - \alpha E(t - t_M)$ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_H - \frac{\gamma_H^2 El^2}{24\sigma_H^2} - \alpha E(t - t_H)$
<p>3.</p> 	<p><math>l &lt; l_{3k}</math></p> <p><math>l &gt; l_{3k}</math></p>	$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_3 - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_3^2} - \alpha E(t - t_3)$ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_H - \frac{\gamma_H^2 El^2}{24\sigma_H^2} - \alpha E(t - t_H)$
<p>4.</p> 	<p><math>l &lt; l_{1k}</math></p> <p><math>l &gt; l_{1k}</math></p>	$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_M - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_M^2} - \alpha E(t - t_M)$ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_3 - \frac{\gamma_1^2 El^2}{24\sigma_3^2} - \alpha E(t - t_3)$

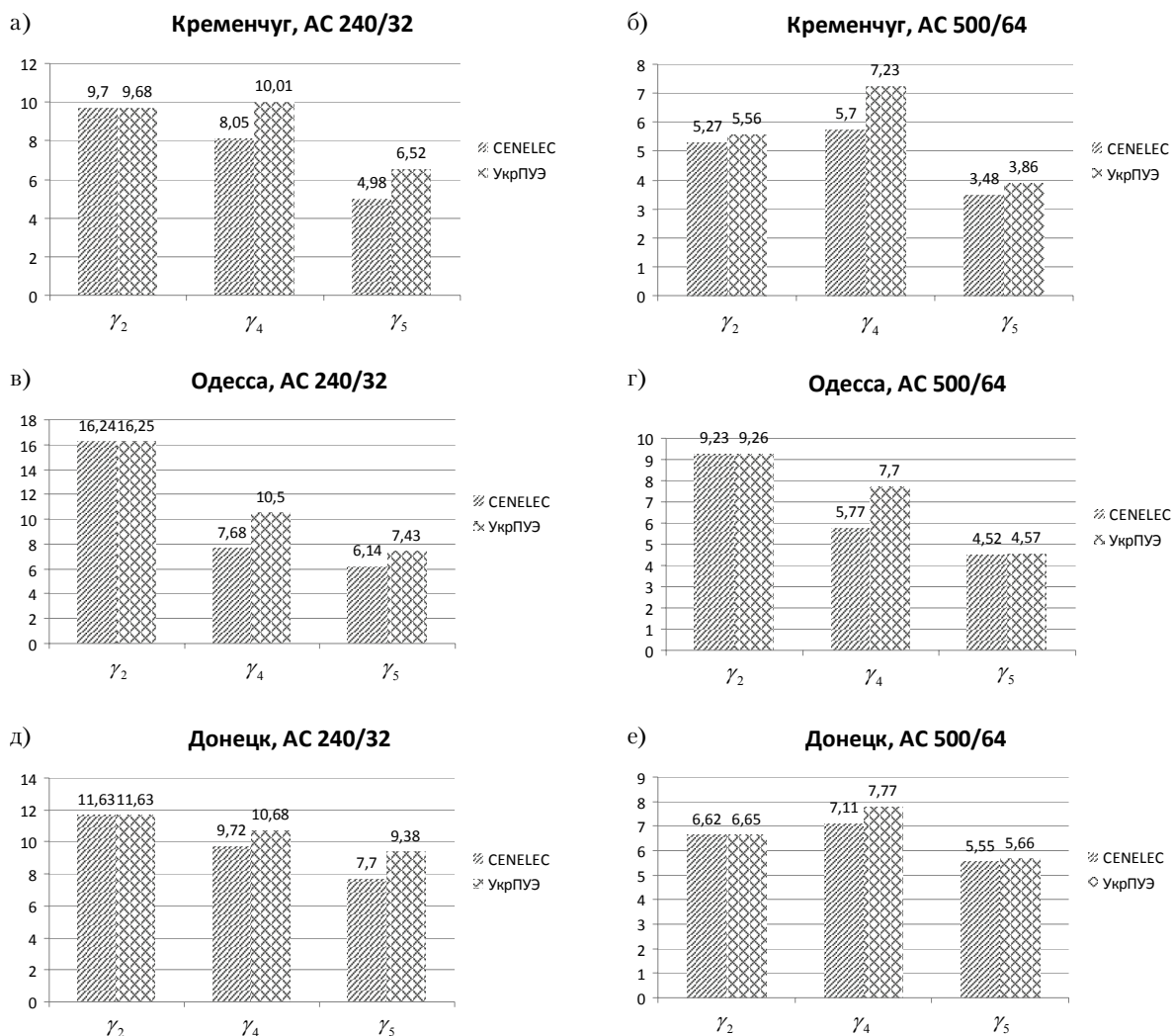
**Апробация методики**

Для апробации данной методики была выполнена серия расчетов удельных нагрузок для условного анкерowanego участка ВЛ (см. рис. 1) с равными пролетами длиной 300 м и высотой приведенного центра тяжести проводов и тросов в пролете – 20 м. При расчетах в различных климатических условиях Украины конструктивное решение ВЛ оставалось однотипным и профиль местности неизменным. В качестве проверки достоверности результатов было выполнено сопоставление с результатами расчетов, выполненных согласно рекомендациям Европейского комитета электротехнической стандартизации (CENELEC) [4]. Результаты расчетов для от-

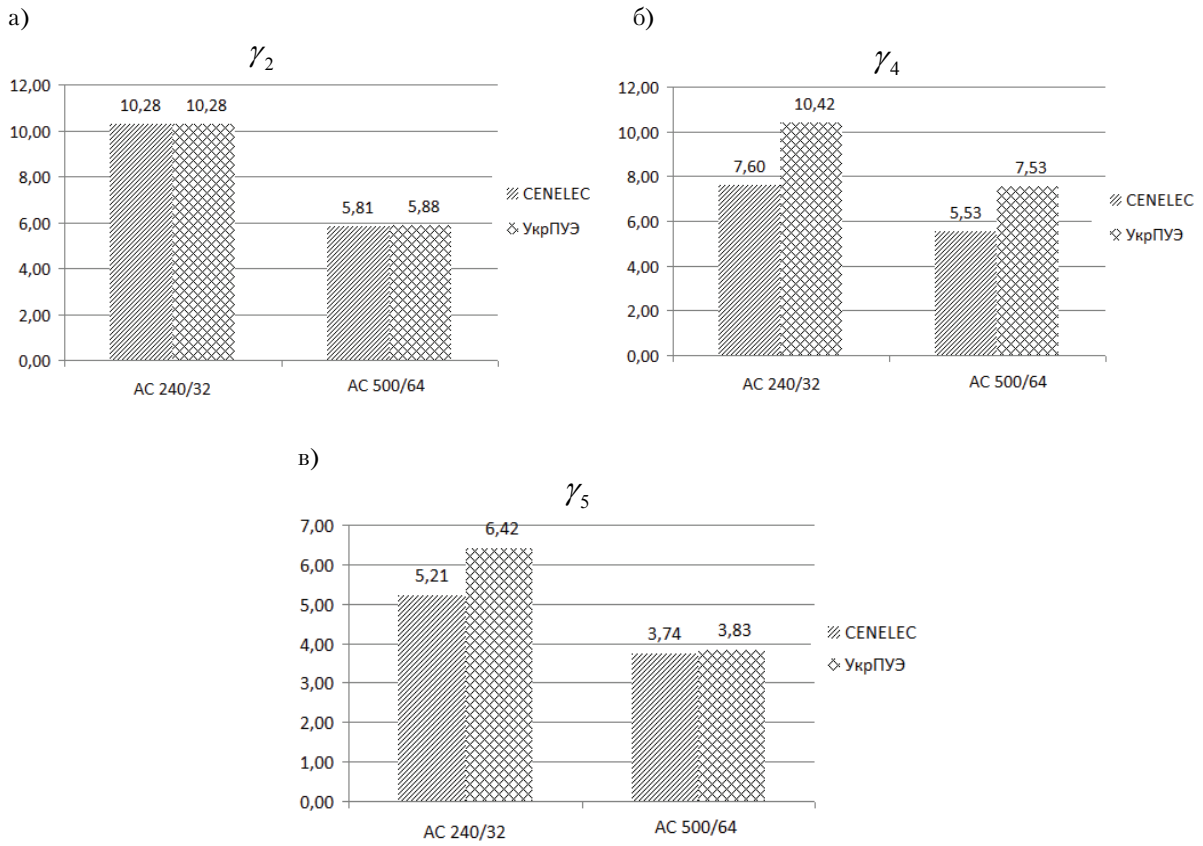
дельных климатических зон и типов проводов (АС 240/32 и АС 500/64) представлены на рис. 7. Осредненные показатели по Украине для удельных нагрузок, определенных по данной методике и рекомендациям CENELEC, представлены на рис. 8.

Также апробация данной методики была выполнена на реальном межсистемном объекте высокого класса безотказности – двухцепном переходе магистральной ВЛ 154 кВ КремГЭС – КремТЭЦ через р. Днепр (рис. 9).

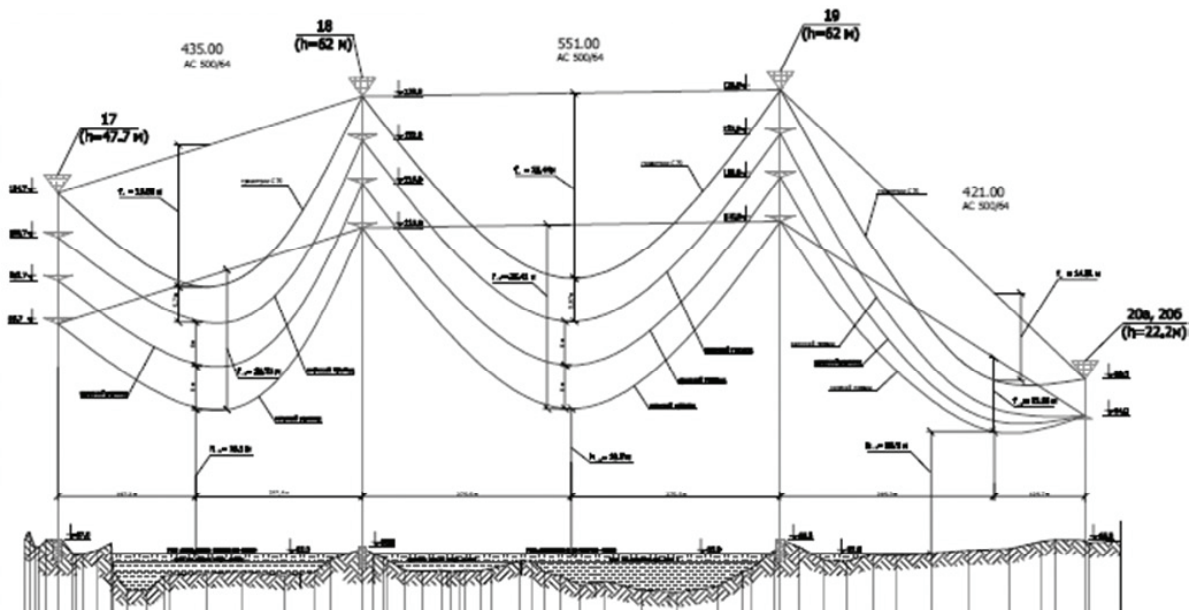
Ниже проиллюстрированы результаты применения изложенной методики в виде полученных стрел провеса проводов в расчетных режимах (табл. 5) и расчетных усилий в элементах переходной опоры (рис. 10, табл. 6).



**Рисунок 7.** Удельные нагрузки ( $\times 10^3$ ) в гололедном режиме ( $\gamma_2$ ), в режиме максимального ветра ( $\gamma_4$ ) и ветра при гололеде ( $\gamma_5$ ): а), в), д) – для провода АС 240/32 в разных климатических условиях; б), г), е) – то же для провода АС 500/64.



**Рисунок 8.** Сравнение удельных нагрузок ( $\times 10^3$ ) для провода AC 240/32 и AC 500/64: а) в гололедном режиме ( $\gamma_2$ ); б) в режиме максимального ветра ( $\gamma_4$ ); в) в режиме ветра при гололеде ( $\gamma_5$ ).



**Рисунок 9.** Продольный профиль по оси перехода ВЛ 154 кВ через р. Днепр.

Таблица 5. Стрелы провеса проводов АС-500/64 в расчетных режимах

Пролет	Длина пролета, м	Стрелы в расчетных режимах, м									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
17 – 18	435,0	13,04	12,91	13,59	13,66	13,99	11,51	15,03	12,57	14,00	12,56
18 – 19	551,0	32,46	32,34	31,75	31,20	31,45	29,57	32,26	30,36	31,46	30,36
19 – 20	421,0	13,08	12,93	13,57	13,63	14,02	11,57	15,01	12,52	14,05	12,59

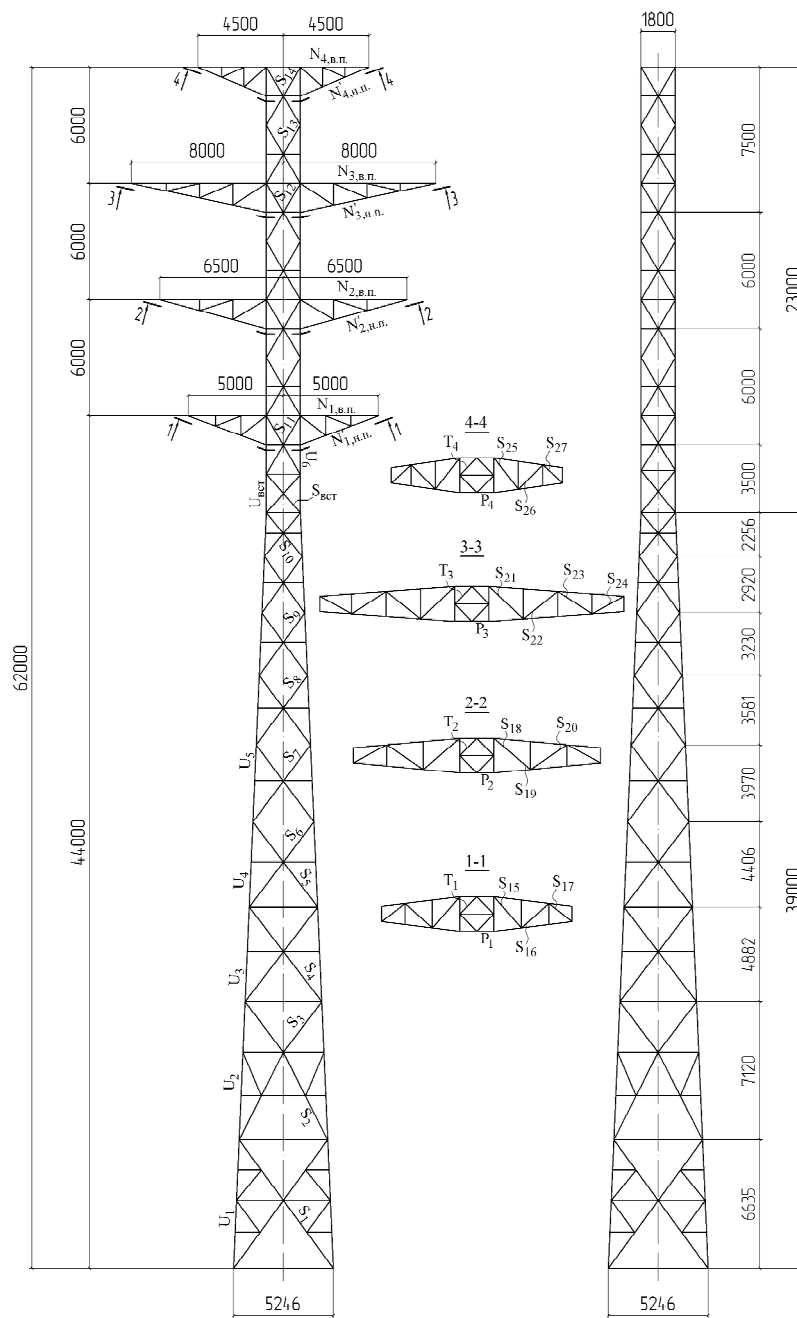


Рисунок 10. Геометрическая схема переходной опоры № 18.

Таблица 6. Результаты расчета переходной опоры ВЛ

Марка, наименование	Код элемента	Сечение по проекту	Расчетное усилие (по перерасчету при реконструкции), т
АС-60-17, секция ствола	U <sub>1</sub>	┘┘130×12	-125,88 +110,73
	S <sub>1</sub>	┘┘100×10	-6,74
АС-60-13, секция ствола	U <sub>2</sub>	┘┘130×12	-122,16
	S <sub>2</sub>	┘┘100×10	-9,29
	S <sub>3</sub>	┘┘100×10	-5,54
АС-60-11, секция ствола	U <sub>3</sub>	┘┘130×12	-116,96
	S <sub>4</sub>	┘┘120×10	-6,54
АС-60-8, секция ствола	U <sub>4</sub>	┘┘120×12	-110,60
	S <sub>5</sub>	┘┘100×10	-7,41
	S <sub>6</sub>	┘┘100×10	-8,29
АС-60-7, секция ствола	U <sub>5</sub>	┘┘120×12	-99,64
	S <sub>7</sub>	┘┘100×10	-9,45
	S <sub>8</sub>	┘┘100×10	-10,71
	S <sub>9</sub>	┘┘100×10	-12,19
	S <sub>10</sub>	┘┘100×10	-12,63
АС-60-18, секция ствола	U <sub>вст</sub>	┘┘130×10	-70,98
	S <sub>вст</sub>	┘┘90×8	-17,55
АС-60-6, секция ствола	U <sub>6</sub>	┘┘100×8	-49,07
	S <sub>11</sub>	┘┘120×10	-26,18
АС-60-5, секция ствола	U <sub>7</sub>	┘┘75×8	-17,39
	S <sub>12</sub>	┘┘100×10	-19,58
	S <sub>13</sub>	┘┘90×8	-17,71
	S <sub>14</sub>	┘┘65×8	-8,00
Тросостойка	N <sub>4, в.п.</sub>	┘┘60×6	-3,43
	N <sub>4, н.п.</sub>	┘┘60×6	-7,92
	S <sub>25</sub>	┘┘60×6	-1,40
	S <sub>26</sub>	┘┘60×6	-2,00
	S <sub>27</sub>	┘┘60×6	-2,91
	P <sub>4</sub>	┘┘75×8	-7,09
	T <sub>4</sub>	┘┘75×8	-1,43
Верхняя траверса	N <sub>3, в.п.</sub>	┘┘90×10	-11,22
	N <sub>3, н.п.</sub>	┘┘75×8	-17,97
	S <sub>21</sub>	┘┘63×6	-2,51
	S <sub>22</sub>	┘┘63×6	-3,40
	S <sub>23</sub>	┘┘63×6	-4,64
	S <sub>24</sub>	┘┘63×6	-5,99
	P <sub>3</sub>	┘┘75×8	-17,09
T <sub>3</sub>	┘┘75×8	-3,78	
Средняя траверса	N <sub>2, в.п.</sub>	┘┘75×8	9,72
	N <sub>2, н.п.</sub>	┘┘65×8	-13,73
	S <sub>18</sub>	┘┘65×8	-2,92
	S <sub>19</sub>	┘┘65×8	-4,31
	S <sub>20</sub>	┘┘65×8	-6,15
	P <sub>2</sub>	┘┘75×8	-12,13
	T <sub>2</sub>	┘┘75×8	-2,77
Нижняя траверса	N <sub>1, в.п.</sub>	┘┘75×6	-6,95
	N <sub>1, н.п.</sub>	┘┘75×6	-10,27
	S <sub>15</sub>	┘┘60×6	-2,47
	S <sub>16</sub>	┘┘60×6	-3,52
	S <sub>17</sub>	┘┘60×6	-5,07
	P <sub>1</sub>	┘┘75×8	-9,18
T <sub>1</sub>	┘┘75×8	-1,83	



В результате перерасчета участка ВЛ в составе единой системы выявлены резервы несущей способности опор большого перехода, что вместе с комплексом мер по усилению конструкций опор и фундаментов, а также реконструкции линейной части ВЛ позволило увеличить передаваемую электрическую мощность на ВЛ за счет применения провода с сечением алюминия 500 мм<sup>2</sup> (взамен бронзовых проводов марки Б-120).

### Заключення

1. Приведенная методика рассматривает ВЛ как единую систему, позволяет определять напряженно-деформированное состояние всех конструктивных элементов ВЛ с учетом их совместной работы, в координации прочности и ранжирования уровней надежности элементов, а также с учетом новых отечественных и зарубежных методических разработок по климатическому обеспечению электросетевого строительства.

### Литература

1. Правила улаштування електроустановок. Глава 2.5 «Повітряні лінії електропередачі напругою вище 1 кВ до 750 кВ» [Текст]. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2006. – III, 125 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
2. Probabilistic design of overhead transmission lines [Текст]: Companion document to «Improved design criteria of overhead transmission lines based on reliability concepts». – Brochure 109, SC 22, WG 06. – Paris: CIGRE, 2000. – 124 p.
3. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines [Текст]. – Third Edition. – Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003. – 241 p. – (International Standard).
4. EN 50341-1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV [Текст]. Part 1: General requirements – Common specifications. – Brussels: CENELEC, 2009. – 234 p. – (International Standard).
5. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013. Національний стандарт України. Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва [Текст] / Мінрегіонбуд України. – Уведено вперше; чинний від 2013-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. – 37 с.
6. ДБН В.1.2-14-2009. Державні будівельні норми України. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи

2. Разработанная методика расчета обладает достаточной универсальностью и применима в первую очередь для высокого класса безотказности линий электропередачи (3 КБ, 4 КБ – магистральных электрических линий высокого напряжения), но ее использование может быть также обосновано для проектируемых и реконструируемых ВЛ более широкого круга (электрическим распределительным линиям среднего напряжения), эксплуатируемых в районах с повышенными климатическими нагрузками, где количество гололедно-ветровых аварий на ВЛ выше средней аварийности по региону, в условиях горной местности, а также ВЛ, сооружаемых на двух- и многоцепных опорах.
3. Данная методика внедрена в разделы «Требования к механической прочности ВЛ» и «Климатические условия» второй редакции УкрПУЭ-2013 (Правила устройства электроустановок. Глава 2.5 «Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ до 750 кВ». – К.: М-во палива та енергетики України, 2014. – на утверждени).

### References

1. Rules for electrical installation. Head 2.5 «The overhead power transmission lines voltages above 1 kV to 750 kV». Kyiv: GRIFRE, 2006. 125 p. (in Ukrainian)
2. Probabilistic design of overhead transmission lines: Companion document to «Improved design criteria of overhead transmission lines based on reliability concepts». Brochure 109, SC 22, WG 06. Paris: CIGRE, 2000. 124 p.
3. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines. Third Edition. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2003. 241 p. (International Standard).
4. EN 50341-1: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1: General requirements – Common specifications. Brussels: CENELEC, 2009. 234 p. (International Standard).
5. DSTU-N B V.1.2-16:2013. Definition of consequences (responsibility) class and complication category of building sites. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2013. 37 p. (in Ukrainian).
6. DBN V.1.2-14-2009. National Structural Rules and Regulations. The system of reliability and safety provision of constructional projects. General principles of reliability control and constructional safety of buildings, structures and supports. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 37 p. (in Ukrainian)

- забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4868-84; чинні з 2009–12–01. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
7. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи [Текст] : [Моногр.] / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1979. – 312 с.
  8. Крюков, К. П. Конструкция и расчёт металлических и железобетонных опор линий электропередачи [Текст] / К. П. Крюков, А. И. Курносов, Б. П. Новгородцев. – Л. : Энергия, 1975. – 456 с.
  9. Шевченко, Е. В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи [Текст] : [Моногр.] / Е. В. Шевченко. – [2-е изд.]. – Макеевка : ДонГАСА, 1999. – 169 с.
  10. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций [Текст] : [Моногр.] / Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, Е. И. Удод [и др.]; Под ред. Е. В. Горохова. – К. : Техніка, 1997. – 284 с.
  11. Аэродинамика электросетевых конструкций [Текст] : [Моногр.] / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим ; Под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с.
  12. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи [Текст] : [Моногр.] / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; Под ред. Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 345 с.
  13. СОУ-Н ЕЕ 20.667:2007. Кліматичні навантаження на повітряні лінії електропередавання з урахуванням топографічних особливостей. Методика [Текст]. – К. : НТСЕУ, ОЕП «ГРІФРЕ», 2007. – 39 с. – (Нормативний документ Мінпаліверенго України).
  14. СОУ-НН 21.262:2008. Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж [Текст]. – К. : НТСЕУ, ОЕП «ГРІФРЕ», 2008. – 35 с. – (Нормативний документ Мінпаліверенго України).
  15. СОУ Н ЕЕ 20.579:2009. Кліматичні дані для визначення навантажень на повітряні лінії електропередавання. Методика опрацювання [Текст]. – К. : НТСЕУ, ОЕП «ГРІФРЕ», 2008. – 94 с. – (Нормативний документ Мінпаліверенго України).
  16. Назим, Я. В. О необходимости повышения надежности отдельных участков межсистемных линий электропередачи [Текст] / Я. В. Назим, А. А. Квинцинский // Металеві конструкції. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 55–63.
  7. Kriukov, K. P.; Novgorodtsev, B. P. Constructions and mechanical analysis of power transmission line. 2nd edition. Leningrad: Energy, 1979. 312 p. (in Russian)
  8. Kriukov, K. P.; Kurnosov, A. I.; Novgorodtsev, B. P. Construction and analysis of steel and concrete supports of power transmission line. The 2nd edition. Leningrad: Energy, 1975. 456 p. (in Russian)
  9. Shevchenko, E. V. Refinement of steel constructions of power transmission line support. 2nd edition. Makiyivka: DonNASEA, 1999. 169 p. (in Russian)
  10. Gorokhov, Ye. V.; Shapovalov, S. N.; Udod, E. I. et al. Edited by Gorokhov, Ye. V. Growth of reliability and life of the power supply network construction. Monograph. Kyiv: Technics, 1997. 284 p. (in Russian).
  11. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V. Edited by Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I. Aerodynamics of the power supply structures. Monograph. Donetsk: [s. n.], 2000. 336 p. (in Russian)
  12. Gorokhov, Ye. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Edited by Gorokhov, Ye. V. Wind and ice-forming influence on overhead transmission lines. Monograph. Donetsk: [s. n.], 2005. 345 p. (in Russian)
  13. SOU-N EE 20.667:2007. Climate-relevant impact on overhead transmission lines considering topographical features. Methodology. Kyiv: NTSEU, OEP «GRIFRE», 2007. 39 p. (in Ukrainian)
  14. SOU-NN 21.262:2008. Climate supporting of building and operation of power network. Kyiv: NTSEU, OEP «GRIFRE», 2008. 36 p. (in Ukrainian)
  15. SOU N EE 20.579:2009. Climatic data for determining loads on overhead transmission lines. Processing procedure. Kyiv: NTSEU, OEP «GRIFRE», 2008. 94 p. (in Ukrainian)
  16. Nazim, Yaroslav; Kvytsynskyi, Anatolii. About the need to improve reliability of certain sections of inter-system power transmission lines. In: *Metal Constructions*, 2014, T. 20, № 1, p. 55–63. (in Russian)

**Назім Ярослав Вікторович** – к. т. н., доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій, Міжнародної асоціації з великих систем енергетики – CIGRE. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та довговічність електромережних конструкцій.

**Назим Ярослав Викторович** – к. т. н., доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Международной ассоциации по большим системам энергетики – CIGRE. Научные интересы: эксплуатационная надежность и долговечность электросетевых конструкций.

**Nazim Yaroslav** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metal Structures department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, a member of Ukrainian Association of Metal Structures, a member of the CIGRE. Scientific interests: operational characteristics, the longevity and the reliability of power supply structures.