

4. Организация, планирование и управление в энергетике / Под. ред. В. Г. Кузьмина. — М.: Высш. шк., 1982. — 407 с.
5. Борисов Р. И. Формализация основных решающих правил многоцелевой оптимизации управления электроэнергетическими системами // Электричество. — 1986. — № 1. — С. 31–35.
6. Васько П. Ф., Брыль А. А., Пекур П. П. Определение технических показателей качества эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине // Энергетика и электрификация. — 1995. — № 2. — С. 48–51.
7. Giorgio Castelli, Fabrizio Mazzetto. Integrated Energy / Systems For Two Farms In Northern Italy // Brescia (Italia). — 3. — P. 15–38.
8. Современное состояние фотопреобразования энергии с использованием кремниевых солнечных элементов: Обзор / В. Л. Августинов, Т. Н. Белоусова, С. И. Власкина и др. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 1995. — Вып. 30. — С. 120–153.

Представлена секцией
машиностроения и энергетики

Поступила 26.04.2000

УДК 621.316.99

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Канд. техн. наук ГЛУШКО В. И.,
инженеры ЯМНЫЙ О. Е., КОВАЛЕВ Э. П.**

НИИПИ РУП «Белэнергосетьпроект»

Электрические характеристики заземляющих устройств (ЗУ) электроустановок (сопротивление растеканию, напряжение прикосновения и шага) в течение года не остаются постоянными, а изменяются в зависимости от сезонных изменений удельного сопротивления верхних слоев земли. В связи с этим проблема влияния грунтово-климатических условий на величину электрических характеристик ЗУ электроустановок уже длительное время является классической, однако до настоящего времени окончательно не решена.

Исключая фактор просыхания верхних слоев земли до глубины прокладки заземлителей (что характерно для условий Республики Беларусь), основной причиной изменения их удельного сопротивления является промерзание грунта на определенную глубину в течение определенного периода года. При этом основными параметрами сезонных изменений верхних слоев земли являются их сезонный коэффициент удельного сопротивления K_c и глубина сезонных изменений земли h_c .

В СССР проблема определения параметров K_c , h_c особенно интенсивно развивалась в 60–70-х гг. в связи с переходом проектирования ЗУ электроустановок с учетом многослойных электрических структур земли. Первые величины K_c , h_c были получены в ВИЭСХе на основе теории распространения потока энергии в земле [1] и представлены во

«Временных руководящих указаниях по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 3–750 кВ» (М.: Энергосетьпроект, 1979). Уточнение K_c , h_c было произведено в СибНИИЭ при подготовке «Руководящих указаний по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 3–750 кВ» (М.: Энергосетьпроект, 1985).

Величины K_c , h_c получены применительно к большим территориям, поэтому встает вопрос о правомерности их распространения на грунтово-климатические условия Республики Беларусь и применении при выборе конструкций ЗУ электроустановок.

Исследования по определению K_c , h_c проведены в концерне «Белэнерго» ГП «Энергосетьпроект» в 1995–1998 гг. на основе экспериментального изучения величины сопротивления растеканию модельных заземлителей, расположенных в различных грунтово-климатических условиях всех областей Республики Беларусь. Исследования проводились на 55 экспериментальных площадках, на которых сооружались от 8 до 10 модельных заземлителей, выполненных из типовых секций ЗУ электроустановок, состоящих из горизонтального и вертикального заземлителей (электрод) соответственно длиной 2,5 и 5,0 м. Численные значения K_c , h_c получены путем специальной математической обработки результатов измерения годового хода изменения сопротивления модельных заземлителей.

В работе изложен подход к определению K_c , h_c , а также приведены некоторые аспекты их практического применения при проектировании, сооружении и эксплуатационном контроле ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ в Белорусской энергосистеме.

Определение сезонного параметра h_c . Следует подчеркнуть, что K_c , h_c являются не чистыми параметрами сезонных вариаций удельного сопротивления грунта и глубины его промерзания, а сезонными параметрами электрической структуры земли при наличии в грунте заземлителей. В этом случае параметр h_c можно понимать как электрическую глубину промерзания h_c^3 , которая зависит от физической глубины промерзания грунта h_c^t и приближенно может быть оценена зависимостью [2]

$$h_c^3 = (1,5 \dots 1,8) h_c^t, \text{ м}, \quad (1)$$

где коэффициенты 1,5 и 1,8 устанавливают границы изменения h_c^3 для более низких и более высоких температур воздуха.

Для Республики Беларусь с учетом (1) принимаем

$$h_c = h_c^3 \approx 1,5 h_c^t, \text{ м}. \quad (2)$$

Параметр h_c^t при заданной геологической структуре грунта в основном зависит от температуры воздуха в зимний сезон. Учитывая, что она имеет вероятностный характер, не представляется возможным для данного периода времени даже с заданной погрешностью оценить величину параметра h_c^t по среднемесячной температуре воздуха для определенных

климатических зон Республики Беларусь, которая в соответствии с [3] рассчитывается по выражению

$$h_c^t = 0,3\sqrt{M_t}, \text{ м.} \quad (3)$$

где M_t – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур.

С учетом (2) и (3) величину сезонного параметра h_c можно определять по выражению

$$h_c = h_c^3 \approx 0,45\sqrt{M_t}, \text{ м.} \quad (4)$$

На основании данных о многолетних среднемесячных отрицательных температурах воздуха в соответствии с [4, 5] на территории Республики Беларусь применительно к рассматриваемой проблеме можно выделить четыре климатические зоны по величине многолетней среднемесячной глубине промерзания грунта в течение года, характеристики которых приведены в табл. 1. В ней также для каждой климатической зоны представлены значения физической глубины промерзания грунта h_c^t и глубины сезонных изменений земли h_c .

Таблица 1

Климатические зоны	Отрицательная температура воздуха, °С					h_c^t , м	h_c , м
	Апрель–ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март		
Зона 1	≈ 0	5,0	7,5	7,1	1,5	1,38	2,07
Зона 2	≈ 0	4,2	6,8	6,2	1,0	1,28	1,90
Зона 3	≈ 0	3,6	6,0	5,5	0,7	1,20	1,80
Зона 4	≈ 0	2,9	5,2	4,7	0,5	1,10	1,65

Из анализа табл. 1 можно сделать следующие выводы, которые имеют принципиальное значение для учета сезонных изменений электрических характеристик ЗУ электроустановок на стадии их проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля:

1) на территории Республики Беларусь по величине многолетних отрицательных температур воздуха фиксируются два явно выраженные характерные периода года. Первый включает месяцы: март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь; второй – декабрь, январь, февраль;

2) в пределах допустимой для практических целей погрешности для указанных характерных периодов года можно принять усредненное значение сезонного параметра h_c^t .

Отсюда следует, что территорию Республики Беларусь в отношении решения практических задач проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля ЗУ электроустановок можно представить одной климатической зоной с физической глубиной промерзания грунта

$$h_c^t = 1,2 \text{ м} \quad (5)$$

и глубиной сезонных изменений земли

$$h_c = 1,8 \text{ м.} \quad (6)$$

Определение сезонного параметра K_c . Сезонный параметр K_c в соответствии с принятым подходом к его определению в физическом отношении является зависимостью вида

$$K_c = f(R_{\text{изм}}^M, h_c, l_c, n_c), \quad (7)$$

где $R_{\text{изм}}^M$ — измеренное сопротивление модельных заземлителей, Ом; h_c принимается по табл. 1 для отдельных климатических зон примерно равным 1,8 м; l_c, n_c — длина элементов типовых секций ЗУ и количество типовых секций в конструкции модельного заземлителя, м, шт.

Исследование K_c по параметрам зависимости (7) осуществлялось на двухслойной расчетной модели земли, которая наиболее полно описывает процесс промерзания грунта в эквивалентно-однородной земле. В качестве примера в табл. 2 представлены значения параметра K_c , полученные по результатам измерения электрических характеристик модельных заземлителей на 14 экспериментальных площадках в течение 1996–1998 гг.

Таблица 2

№	ПОЭиЭ	Наименование РЭС	h_c , м	№ конструкции экспериментального заземлителя					
				1	2	3	4	5	6
1	«Минскэнерго»	Молодечненский	1,9	3,7	3,0	4,0	3,5	3,4	3,0
2		Узденский	2,0	3,5	3,0	3,7	3,0	2,7	3,5
3		Воложинский	2,0	3,0	2,5	3,5	3,2	3,0	3,4
4	«Гродноэнерго»	Свислочский	1,8	4,1	4,0	3,8	3,7	3,2	3,0
5		Островецкий	2,0	3,5	3,9	4,0	4,0	3,9	3,8
6	«Брестэнерго»	Брестский гор.	1,7	3,0	3,0	3,2	3,1	3,2	3,4
7		Каменецкий	1,8	4,0	3,8	4,0	4,5	3,3	4,0
8		Ганцевичский	1,8	3,8	3,5	3,0	3,0	2,8	3,0
9		Пружанский	1,7	3,7	3,5	4,1	3,8	3,9	3,8
10	«Гомельэнерго»	Брестский сел.	1,7	3,1	3,2	2,7	2,9	3,0	2,5
11		Кобринский	1,7	2,5	2,6	3,0	2,8	2,5	2,0
12		Мозырский	1,9	3,5	3,2	4,0	3,6	3,5	3,0
13		Гомельский	1,9	4,4	4,0	4,1	4,0	4,3	4,0
14		Буда-Кошелевский	1,8	4,3	4,1	4,5	4,0	4,2	4,1

Из табл. 2 следует, что среднее значение параметра K_c , полученное по результатам 84 измерений (14 площадок по 6 конструкций ЗУ), равно $K_c = 3,5$. Среднее значение K_c по данным измерений на всех 55 экспериментальных площадках составило

$$K_c = 3,4. \quad (8)$$

Значения K_c по критерию влажности грунта определены по средней величине $K_c = 3,4$ на основе теории распространения теплового потока энергии в земле и приведены в табл. 3. Для сравнения в табл. 3 также даются значения коэффициента K_c по данным ВИЭСХа и СибНИИЭ для грунтово-климатических условий Республики Беларусь.

Значения сезонного коэффициента K_c и глубины сезонных изменений h_c

По данным организаций	Значения сезонного коэффициента K_c			Глубина сезонных изменений h_c , м
	Влажность почвы			
	Повышенная	Средняя	Пониженная	
БелЭСП	5,0	3,0	2,0	1,8
ВИЭСХ	5,0	2,7	1,9	2,0
СибНИИЭ	6,5	4,0	3,6	2,0

Из табл. 3 следует, что величина сезонного коэффициента K_c для условий Республики Беларусь по данным БелЭСП ближе к данным ВИЭСХа и существенно отличается от принятой в настоящее время в нормативно-технических материалах по проблеме ЗУ электроустановок по данным СибНИИЭ.

Приложение сезонных параметров K_c , h_c к задачам проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля ЗУ электроустановок. Проектирование ЗУ электроустановок осуществляется на основе данных об электрической структуре земли. В Белорусской энергосистеме при проектировании ЗУ электроустановок напряжением 35 кВ и выше электрическая структура земли определяется методом вертикального электрического зондирования (метод ВЭЗ) или по данным геологического разреза.

При проектировании ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ электрическая структура земли представляется в виде эквивалентно-однородной земли, информация о которой в виде усредненного значения удельного сопротивления представляется энергосистемой. Электрическая структура земли, получаемая методом ВЭЗ и по геологическому разрезу, более точна, чем представленная в виде эквивалентно-однородной модели. Поэтому процедура проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля ЗУ электроустановок напряжением 35 кВ и выше достаточно просто может быть формализована уже на стадии проектирования.

Что касается электроустановок напряжением 0,38–10 кВ, то выбранные конструкции ЗУ при проектировании вследствие используемых усредненных значений удельного сопротивления земли во многих случаях в реальных условиях по величине их электрических характеристик не соответствуют норме. В связи с этим практическое применение сезонных параметров K_c , h_c рассмотрим применительно к проектированию, сооружению и эксплуатационному контролю ЗУ указанного вида электроустановок.

1. Рассматриваются следующие виды ЗУ электроустановок: рабочие, защитные, грозозащитные.

Конструкции таких ЗУ выполняются по критерию нормированной величины сопротивления растеканию (сопротивление ЗУ).

2. Величина сопротивления ЗУ электроустановок в течение года изменяется в зависимости от грунтово-климатических условий. Наибольшая величина сопротивления ЗУ наблюдается в зимний сезон, наи-

меньшая — в летний. Это связано с тем, что зимой вследствие промерзания грунта его удельное сопротивление всегда больше, чем летом.

В зависимости от этого при определении допустимой величины сопротивления ЗУ электроустановок устанавливаются расчетные зимний и летний сезоны. Расчетный сезон определяет период времени года, для которого принимается допустимая величина сопротивления ЗУ электроустановки.

В соответствии с табл. 1 применительно к грунтово-климатическим условиям Республики Беларусь к расчетному зимнему сезону относится период времени с декабря по февраль, а к летнему — с марта по ноябрь.

3. Расчет сопротивления ЗУ электроустановок при заданной эквивалентно-однородной модели земли с удельным сопротивлением $\rho_{\text{э}}$ производится по выражению

$$R_{\text{зy}} = \rho_{\text{э}} A_{\text{зy}}, \text{ Ом}, \quad (9)$$

где $A_{\text{зy}}$ — геометрический параметр конструкции ЗУ, 1/м.

На практике ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ выполняются из типовых секций ЗУ. Конструкции ЗУ отличаются как по форме, так и по количеству типовых секций. Это обстоятельство осложняет непосредственное представление параметра $A_{\text{зy}}$ в аналитическом виде.

Задачу можно упростить на основе классификации конструкций ЗУ по признаку конгруэнтности. Под конгруэнтными конструкциями ЗУ понимаются конструкции, которые по форме отличаются, но характеризуются близкими значениями электрических характеристик ЗУ (в нашем случае сопротивлением ЗУ).

Исследование конгруэнтности конструкций ЗУ выполнено расчетным путем по методам расчета сложных заземлителей в двух- [6] и многослойной земле [7]. В результате были получены расчетные соотношения для сопротивления ЗУ при длине элементов типовых секций:

2,5 м —

$$R_{\text{зy}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{5 + 1,2n_{\text{с}}}, \text{ Ом}; \quad (10)$$

5,0 м —

$$R_{\text{зy}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{8 + 2,4n_{\text{с}}}, \text{ Ом}, \quad (11)$$

где $n_{\text{с}}$ — число типовых секций, шт.

4. После сооружения ЗУ измеренная величина его сопротивления приводится к расчетному сезону с помощью сезонного коэффициента ЗУ, который зависит от грунтово-климатических условий, конструкции ЗУ и времени проведения измерения сопротивления ЗУ (в расчетные летний или зимний сезон).

Сезонный коэффициент ЗУ показывает, во сколько раз необходимо увеличить или уменьшить измеренную величину сопротивления ЗУ при

приведении ее к расчетному сезону, если измерение сопротивления ЗУ производится не в расчетный сезон.

Измеренная величина сопротивления ЗУ электроустановок $R_{изм}$ при заданном сезонном коэффициенте ЗУ $K_{з\text{у}}$ приводится к расчетному сезону по выражению

$$R_{з\text{у}} = R_{изм} K_{з\text{у}}, \text{ Ом.} \quad (12)$$

При измерении сопротивления ЗУ в расчетный сезон $K_{з\text{у}} = 1$, а при измерении сопротивления ЗУ не в расчетный сезон величина $K_{з\text{у}}$ для различных конструкций ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ приведена в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Сезонные коэффициенты $K_{з\text{у}}$ для рабочих и защитных ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ при измерении их сопротивления в расчетный летний сезон (март–ноябрь)

Длина элементов типовых секций ЗУ, м	Количество типовых секций ЗУ в конструкции ЗУ, шт.							
	1	2	3	4	5	6–10	11–32	33–64
2,5	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,3
5,0	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,2	1,2	–

Таблица 5

Сезонные коэффициенты $K_{з\text{у}}$ для грозозащитных ЗУ электроустановок напряжением 0,38–10 кВ при измерении их сопротивления в расчетный зимний сезон (декабрь–февраль)

Длина элементов типовых секций ЗУ, м	Количество типовых секций ЗУ в конструкции ЗУ, шт.							
	1	2	3	4	5	6–10	11–32	33–64
2,5	0,6	0,65	0,67	0,69	0,7	0,74	0,77	0,77
5,0	0,7	0,75	0,77	0,8	0,83	0,83	0,83	–

5. После измерения сопротивления ЗУ производится оценка соответствия измеренной величины сопротивления и приведенной к расчетному сезону его допустимой (нормируемой) величины.

В соответствии с ПУЭ нормируемая величина сопротивления ЗУ электроустановок зависит от вида электроустановки и величины эквивалентного удельного сопротивления земли.

Эквивалентное удельное сопротивление земли ρ_z зависит от измеренной и приведенной к расчетному сезону величины сопротивления ЗУ и с учетом (10)–(12) определяется по выражению:

при длине элементов типовых секций ЗУ 2,5 м –

$$\rho_{\text{Э}} = R_{\text{изм}} K_{\text{ЗУ}} (5 + 1,2n_{\text{с}}), \text{ Ом}\cdot\text{м}; \quad (13)$$

при длине элементов типовых секций ЗУ 5,0 м –

$$\rho_{\text{Э}} = R_{\text{изм}} K_{\text{ЗУ}} (8 + 2,4n_{\text{с}}), \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (14)$$

6. В случае, когда измеренная и приведенная к расчетному сезону величина сопротивления ЗУ не соответствует его нормируемой ПУЭ величине, производится изменение конструкции ЗУ для доведения до нормы сопротивления ЗУ.

Изменение конструкции ЗУ сводится к добавлению к сооруженной конструкции ЗУ дополнительных типовых секций ЗУ, число которых $\Delta n_{\text{с}}$ в зависимости от допустимой величины сопротивления ЗУ $R_{\text{доп}}$ и измеренного и приведенного к расчетному сезону значения сопротивления ЗУ $R_{\text{доп}}$ определяется по выражению:

для сооруженной конструкции ЗУ, состоящей из типовых секций ЗУ количеством $n_{\text{с}}$ с элементами длиной 2,5 м, –

$$\Delta n_{\text{с}} = (4 + n_{\text{с}}) \left(\frac{R_{\text{ЗУ}}}{R_{\text{доп}}} - 1 \right), \text{ шт.}; \quad (15)$$

для сооруженной конструкции ЗУ, состоящей из типовых секций ЗУ количеством $n_{\text{с}}$ с элементами длиной 5,0 м, –

$$\Delta n_{\text{с}} = (3 + n_{\text{с}}) \left(\frac{R_{\text{ЗУ}}}{R_{\text{доп}}} - 1 \right), \text{ шт.} \quad (16)$$

Полученные по (15), (16) значения $\Delta n_{\text{с}}$ округляются до целого числа.

На основе изложенного материала в системе концерна «Белэнерго» подготовлены и введены в действие «Методические указания по применению сезонных коэффициентов заземляющих устройств электроустановок напряжением 0,38–10 кВ в Белорусской энергосистеме» (Минск, 1999).

ВЫВОДЫ

1. Обоснована возможность представления электрической структуры земли Республики Беларусь в отношении проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля заземляющих устройств электроустановок одной климатической зоной с величиной глубины сезонных изменений земли $h_{\text{с}} = 1,8$ м и сезонного коэффициента удельного сопротивления верхних слоев земли, равного: для повышенной влажности почвы $K_{\text{с}} = 5,0$, для средней влажности почвы $K_{\text{с}} = 3,0$, для пониженной влажности почвы $K_{\text{с}} = 2,0$.

2. Приведены практические рекомендации по использованию сезонных параметров $h_{\text{с}}$ и $K_{\text{с}}$ при проектировании, сооружении и эксплуата-

ционном контроле заземляющих устройств электроустановок напряжением 0,38–10 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я к о б с А. И., А л и м а м е д о в М. Б. Сезонные коэффициенты заземлителей // Электричество. – 1966. – № 12.
2. Я к о б с А. И. Расчет годового хода удельного сопротивления почвогрунта и сопротивления заземлителя // Электричество. – 1962. – № 6.
3. О с н о в а н и я зданий и сооружений: СНиП 2.02.01-83. – М., 1985.
4. А т л а с БССР. – Мн.; М., 1958.
5. С п р а в о ч н и к по климату СССР. – Вып. 7. Белорусская ССР. – Ч. II. – М., 1965.
6. Я к о б с А. И., К о с т р у б а С. И., Ж и в а г о В. Г. Расчет сложных заземляющих устройств с помощью ЭЦВМ // Электричество. – 1967. – № 8.
7. Г л у ш к о В. И., Ш у л ь г а А. Н. Численно-аналитический метод расчета сложных заземлителей в многослойной земле // Электричество. – 1988. – № 2.

Представлена
научно-техническим
советом

Поступила 27.07.2000