



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 484-110-385-03 ТЗ. Комплексное воздухоочистительное устройство газотурбинной установки ГТЭ-110 ПГУ-325 для Ивановской ГРЭС. / Техническое задание на проектирование, изготовление и поставку. ОАО НПО "Сатурн". 2003.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с. с ил.
3. Справочник проектировщика. Защита от шума / Под ред. Е.Я. Юдина // М.: Стройиздат, 1974.
4. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М.-Л.: Энергия, 1966.
5. Эстеркин Р.И., Иссерлин А.С., Певзнер М.И. Методы теплотехнических измерений и испытаний при сжигании газа: Справочное руководство. Л.: Недра, 1972. 376 с.

УДК 621.316.99

С.Л. Шишигин

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ ОПОР  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ**

При проектировании заземляющих устройств (ЗУ) опор высоковольтных воздушных линий (ВЛ), включающих естественные и искусственные заземлители, требуется обеспечить нормировку стационарного сопротивления ЗУ, величина которого контролируется измерениями. Естественными заземлителями являются железобетонные фундаменты [1–4].

Сборный железобетон характеризуется высокой плотностью арматурной сетки и малой толщиной внешнего защитного слоя бетона (15–30 мм) и вследствие капиллярного подсоса влаги имеет удельное сопротивление близкое к удельному сопротивлению грунта. Даже в грунтах с высоким удельным сопротивлением бетонный слой увлажнен, поскольку в системе двух пористо-капиллярных тел грунт–бетон влага мигрирует в сторону бетона, размеры пор которого на несколько порядков меньше, чем у песка [3]. Относительная стабильность сопротивления железобетонных конструкций подтверждена экспериментально в условиях промерзания грунта и при импульсных воздействиях [3]. В результате математической моделью сборного железобетонного фундамента при расчете сопротивления растекания тока принято объемное проводящее тело с размерами, совпадающими с внешними габаритами конструкции [2–4].

**Методы расчета сопротивления фундаментов.**

Сопротивление железобетонного фундамента определяется в результате расчета трехмерного электрического поля растекания тока. Для решения подобных задач применительно к областям открытого типа наиболее эффективны метод интегральных уравнений (МИУ) и метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) [5]. В МИУ поверхность проводников разбивается на  $N$  прямоугольных элементов, которые характеризуются собственными и взаимными сопротивлениями. При расположении расчетной точки в середине элемента его собственное сопротивление равно

$$R_{ii} = \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} + \frac{1}{b} \ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right],$$

$i = 1, \dots, N,$

где  $a, b$  — длины сторон прямоугольника;  $\rho$  — удельное сопротивление земли. При расчете взаимного сопротивления

$$R_{ij} = \frac{\rho}{4\pi r}, \quad i=1 \dots N, \quad j=1 \dots N, \quad i \neq j,$$

где  $r$  — расстояние между центрами элементов, стекающий ток  $j$ -го элемента приближенно моделируется точечным источником, расположенным в центре элемента. Далее, решая систему

$\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \varphi$  при заданном потенциале элементов  $\varphi_i = 1$ , находим стекающие токи элементов  $\mathbf{I}$  и стационарное сопротивление фундамента

$$R_{\varphi} = \varphi / \sum_{k=1}^N I_k, \quad \varphi = 1.$$

В качестве примера найдем сопротивление куба единичных размеров в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . При дроблении поверхности куба на  $N = 600$  элементов сопротивление равно  $R = 12 \text{ Ом}$ , что в 1,32 раза меньше сопротивления вписанной сферы. Полученный результат согласуется с данными [6], где емкость куба (аналог электрической проводимости) в 1,3161 больше емкости сферы. При минимальном числе элементов  $N = 6$  сопротивление куба равно 13,2 Ом, т. е. погрешность составляет 10 %, что допустимо при решении инженерных задач.

Таким образом, МИУ — эффективный способ расчета сопротивления фундаментов. К его недостаткам отнесем трудоемкость описания геометрии по сравнению с МЭЗ.

Другой способ расчета сопротивления фундаментов — МЭЗ с использованием стержневых элементов в качестве источников электрического поля, что позволяет проводить расчеты железобетонных фундаментов по единым методикам и программам с расчетом искусственных заземлителей [7].

**Сопротивление стержневого заземлителя.** Будем считать, что ЗУ состоит из  $N$  элементов круглого сечения, источники поля (стекающие токи) сосредоточены на осях элементов, линейная плотность источников в пределах элемента постоянная. Будем использовать векторную форму записи выражений, инвариантную относительно системы отсчета, что позволяет проводить расчеты вертикальных, горизонтальных, наклонных стержней по единым формулам.

Взаимное сопротивление  $R_{ij}$  между  $j$ -м элементом  $qm$  (источником поля) и средней точкой  $i$ -го элемента  $p$  в однородной среде с удельным сопротивлением  $\rho$  (рис. 1) равно [7]

$$R_{ij} = R(p, q, l) = \frac{\rho}{4\pi|l|} \ln \frac{(q+l-p)l + |q+l-p| \cdot |l|}{(q-p)l + |q-p| \cdot |l|},$$

где  $q = (x_q, y_q, z_q)^T$ ,  $m = (x_m, y_m, z_m)^T$ ,  $l = l_j = m - q = (x_l, y_l, z_l)^T$ ,  $p = (x_p, y_p, z_p)^T$  — геометрические параметры элементов.

Собственное сопротивление стержней вычисляется по формуле

$$R_{ii} = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d}, \quad l > d,$$

где  $l$  — длина,  $d$  — диаметр стержня. Максимальная погрешность этой формулы, определенная с помощью МИУ, составляет 10 % при  $l = d$  и быстро уменьшается с увеличением длины стержня.

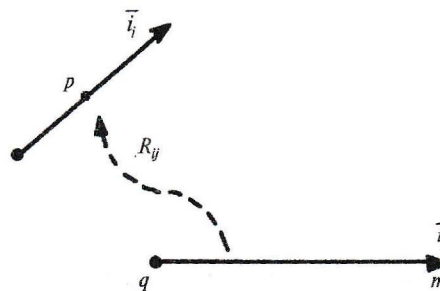


Рис. 1. К расчету взаимного сопротивления двух стержней

Влияние границы раздела земля—воздух учитывается зеркальным отображением элемента относительно поверхности земли:

$$R'_{ij} = R'(p, q, l) = R(p, q, l) + R(p, q', l'),$$

где  $q' = (x_q, y_q, -z_q)^T$ ,  $l' = (x_l, y_l, -z_l)^T$  — координаты отображения.

Взаимное сопротивление в двухслойной земле определяется бесконечным числом отражений источника от границ раздела слоев земли и границы с воздухом и выражается через функции сопротивления для однородной земли. Возможны четыре варианта расчетных формул в зависимости от слоя земли, в котором находится расчетная точка с координатой  $p$  и точка источника с координатой  $q$  [7].

При расположении расчетной точки и источника в верхнем слое ( $p_3 < h_3$ ,  $q_3 < h_3$ ) взаимное сопротивление равно

$$R_{ij} = R'(p, q, l) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} k^n [R'(p, q + 2nh, l) + R'(p, q' + 2nh, l')];$$

если расчетная точка расположена в нижнем слое, а источник в верхнем ( $p_3 > h_3$ ,  $q_3 < h_3$ ), то

$$R_{ij} = (1 - k) \times$$



$$\times \sum_{n=0}^{\infty} k^n [R(p, q - 2nh, l) + R(p, q' - 2nh, l')];$$

когда расчетная точка и источник находятся в нижнем слое ( $p_3 > h_3, q_3 > h_3$ ), будет

$$R_{ij} = R(p, q, l) - k \cdot R(p, q' + 2h, l') + \\ + (1 - k^2) \sum_{n=0}^{\infty} k^n \cdot R(p, q' - 2nh, l');$$

при расположении расчетной точки в верхнем слое, а источника в нижнем слое ( $p_3 < h_3, q_3 > h_3$ )

$$R_{ij} = (1 + k) \sum_{n=0}^{\infty} k^n \cdot R'(p, q + 2nh, l),$$

где  $h = (0, 0, h_3)^T$ ,  $h_3$  — мощность верхнего слоя земли;  $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_1 + \rho_2)$  — коэффициент отражения. Стержни не пересекают границу раздела сред, что достигается на этапе дискретизации ЗУ. Сходимость бесконечных рядов при  $|k| < 1$  доказывается по признаку Лейбница.

Таким образом, элементы матрицы сопротивлений  $R$  найдены. Расчет статического сопротивления заземлителя производится по описанной ранее для МИУ методике. Расчет сопротивлений ЗУ с учетом индуктивности и емкости металлических стержней при синусоидальных и импульсных воздействиях рассмотрен в [7].

**Стержневые модели железобетонных фундаментов.** К типовым элементам железобетонных конструкций относятся свайные фундаменты квадратного сечения со стороной  $a$  и длиной  $l$ . Согласно [5] они моделируются стержнями длиной  $l$  с эквивалентным диаметром  $D = 1,13a$ . Расчеты, выполненные с использованием МИУ при условии равенства собственного сопротивления бесконечно длинных проводников квадратного и круглого сечений, дают значение  $D = 1,18a$ .

Проанализируем адекватность стержневой модели фундамента для задачи расчета сопротив-

ления вертикальной сваи квадратного сечения со стороной  $a$  при нулевой глубине погружения в грунт с удельным сопротивлением  $\rho = 100$  Ом·м. Рассматривая сваю как параллелепипед, примем  $a = 1$  м и будем рассчитывать сопротивление при изменении длины  $l$ . При сопоставлении с данными, полученными по МИУ, видим (табл. 1), что стержневая модель сваи во всем диапазоне параметра  $l/a > 1$  приводит к завышенному сопротивлению, но не более чем на 13 %, что приемлемо для инженерных расчетов. При исследовании причины этой погрешности установлено, что она связана с неучтенным растеканием тока из торцевой части эквивалентного стержня. С учетом торцевой поверхности (рис. 2, б) погрешность не превышает 3 %. Таким образом, стержневая модель свайного фундамента достаточно точно не только в инженерных, но и в исследовательских задачах.

Сопротивление вертикальной сваи с типичной стороной сечения  $a = 0,4$  м и длиной  $l = 3$  м в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = 100$  Ом·м равно  $R = 15,2$  Ом, если рассматривать ее как параллелепипед, и  $R = 16,4$  Ом при стержневой модели сваи (то есть завышено на 8 %).

Другой типовой элемент фундаментов опор ВЛ — грибовидный подножник серии Ф2–Ф5, состоящий из вертикальной стойки и горизонтальной плиты (рис. 2, а).

Стойка моделируется стержнем эквивалентного диаметра аналогично свае. Простейшая модель плиты состоит из 6 стержней, проложенных по ее периметру и двум диагоналям (рис. 2, б), диаметром  $D = 60$  мм, который получен эмпирически из условия совпадения сопротивления расчетной модели с экспериментальными данными [2].

Адекватность модели демонстрируется (табл. 2) сопоставлением численных расчетов сопротивления фундаментов Ф2–Ф5 в однородном грунте ( $\rho = 100$  Ом·м) с результатами физиче-

Таблица 1

Сопротивления сваи прямоугольного сечения и ее стержневой модели

Вид сваи	Сопротивление $R$ , Ом (в скобках — погрешность в %)			
	при $l = 1$ м	при $l = 2,5$ м	при $l = 5$ м	при $l = 10$ м
Параллелепипед	18,5	11,8	7,88	4,98
Стержень	21(13)	13(10)	8,6(9)	5,4(8)
Стержень с торцом	19,1(3)	12(1)	8(1)	5,1(2)



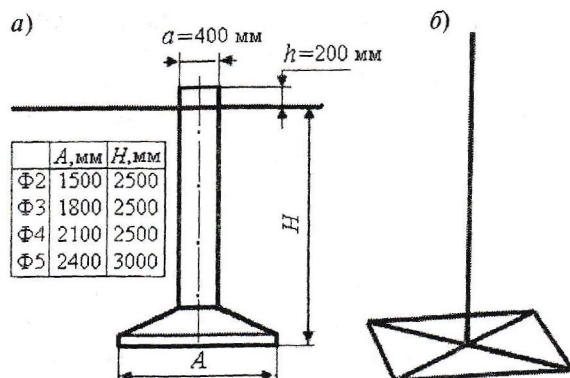


Рис. 2. Фундаменты серии Ф2–Ф5 (а) и расчетная модель (б) с диаметром вертикального стержня  $D = 1,8a = 470$  мм, горизонтальных —  $D = 60$  мм

ского моделирования [2], описываемыми эмпирической формулой  $R = k_f c / H$ , где  $k_f$  — коэффициент формы.

В качестве следующей тестовой задачи найдем сопротивление сборного железобетонного фундамента из четырех грибовидных подножников типа Ф3, служащего основанием опоры 3×3 м (рис. 3). В результате расчета получено  $R = 5,67$  Ом, в то время как по данным [2]  $R = 5,6$  Ом (без поправки на уплотнение земли). Расхождение составляет 1 %.

Таким образом, разработана математическая модель фундаментов опор высоковольтных воздушных линий, дающая совпадение результатов расчета и моделирования с высокой точностью. Использование в модели стержневых электродов позволяет рассчитывать железобетонные фундаменты и металлические стержневые заземлители по единым формулам.

**Результаты расчетов.** Определим сопротивления ЗУ опор ВЛ 330 кВ, расположенной на

Карельском перешейке, и сопоставим с данными [8], полученными по инженерной методике. ЗУ состоит из фундамента опоры и искусственного заземлителя, призванного снизить сопротивление ЗУ в условиях низкой проводимости грунта. Все рассматриваемые далее опоры имеют сборный фундамент 4×Ф5 с размером основания 5,75×3,683 м. Искусственные заземлители состоят из горизонтальных стержней диаметром  $D = 12$  мм и вертикальных стержней диаметром  $D = 16$  мм длиной 3 м.

Искусственный заземлитель опоры № 263 состоит из 4 лучей (рис. 4). Земля двухслойная с удельными сопротивлениями слоев  $\rho = 1400/350$  Ом·м, мощностью  $h = 2,4/\infty$  (м). Рассчитанное сопротивление фундамента опоры  $R_{\Phi} = 18,6$  Ом. По данным [8]  $R_{\Phi} = 42$  Ом, что связано с выбором завышенного эквивалентного сопротивления земли  $\rho_{\text{ЭКВ}} = 1050$  Ом·м, в то время как расчеты дают  $\rho_{\text{ЭКВ}} = 430$  Ом·м. Сопротивление ЗУ опоры  $R_{\text{ЗУ}} = 10,4$  Ом, что согласуется с расчетами [8]  $R_{\text{ЗУ}} = 11$  Ом. Эффективность искусственного заземлителя незначительна:  $R_{\Phi}/R_{\text{ЗУ}} = 1,8$ , поскольку он находится в верхнем слое земли с высоким удельным сопротивлением. Для снижения сопротивления ЗУ данной опоры целесообразно увеличить длину вертикальных стержней, так как при песчаном грунте сопротивление нижнего слоя в четыре раза меньше верхнего.

Расчетная модель ЗУ опоры №250 аналогична опоре №263 (рис. 4), но грунт обладает вдвое большим сопротивлением нижнего слоя и большей мощностью верхнего слоя:  $\rho = 1340/670$  Ом·м;  $h = 3,2$  м. Отсюда можно предположить увеличение сопротивлений по сравнению с предыдущей опорой. Действительно, сопротивление фундамента опоры  $R_{\Phi} = 38,4$  Ом. По данным [8]  $R_{\Phi} = 56$  Ом. Сопротивление ЗУ опоры  $R_{\text{ЗУ}} = 18,7$  Ом, что совпадает с расчетами [8]  $R_{\text{ЗУ}} = 19$  Ом. Эф-

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных и расчетных сопротивлений фундаментов Ф2-Ф5

Тип фундамента	Коэффициент формы $K_f$ по [2, рис. 3]	Сопротивление фундамента, Ом		Погрешность, %
		эксперимент	расчеты	
Ф2	0,31	12,4	12,4	0
Ф3	0,28	11,2	11,35	1,5
Ф4	0,26	10,4	10,45	0,5
Ф5	0,27	9,0	9,1	1



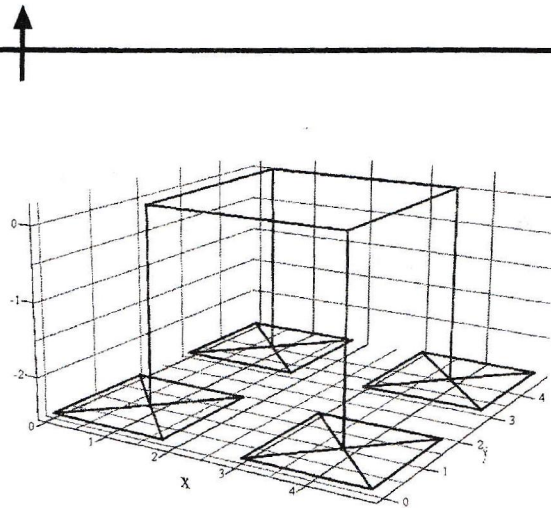


Рис. 3. Расчетная модель фундамента опоры с четырьмя подножниками серии Ф2–Ф5

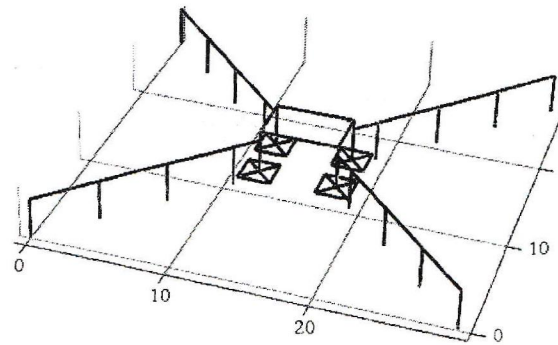


Рис. 4. Расчетная модель ЗУ опор № 250 и № 263. Длина лучей 2+5+5+5 = 17 м

фективность искусственного заземлителя несколько выше, чем для предыдущей опоры:  $R_{\phi}/R_{3y} = 2,2$ .

Сопротивление фундамента опоры №221, находящегося в двухслойной земле с удельными сопротивлениями слоев  $\rho = 1200/670 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и мощностью  $h = 2,3/\infty \text{ (м)}$ , составляет  $R_{\phi} = 32,3 \text{ Ом}$ . По данным [8]  $R_{\phi} = 42 \text{ Ом}$ . Конструкция искусственного заземлителя данной опоры, состоящего из 4 лучей с двумя охватывающими контурами, наиболее сложная (рис. 5). Для оценки эффективности элементов искусственного заземлителя будем в расчетной модели последовательно добавлять их к фундаменту (табл. 3). Наибольший вклад в снижение стационарного сопротивления вносит внешний контур, имеющий наибольшие размеры среди элементов. Влияние коротких вертикальных стержней незначительно. Результирующее сопротивление ЗУ опоры  $R_{3y} = 13 \text{ Ом}$ , что согласуется с расчетами [8]  $R_{3y} = 15 \text{ Ом}$ . Эффективность искусственного заземлителя выше, чем в предыдущих случаях ( $R_{\phi}/R_{3y} = 2,5$ ), но его конструкция наиболее сложная.

Опора № 347 (рис. 6) расположена в трехслойном грунте с удельными сопротивлениями слоев  $\rho = 4400/1600/25600 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , мощностью  $h = 2,5/1,7/\infty \text{ (м)}$ . В грунте с изолирующим основанием растекание тока горизонтальное, и два верхних слоя (для упрощения расчетов) можно заменить одним эквивалентным из условия неизменности горизонтальной проводимости

$$\rho_{12} = \frac{h_1 + h_2}{h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2},$$

откуда получим двухслойную модель грунта  $\rho = 2576/25600 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $h = 4,2/\infty \text{ м}$ .

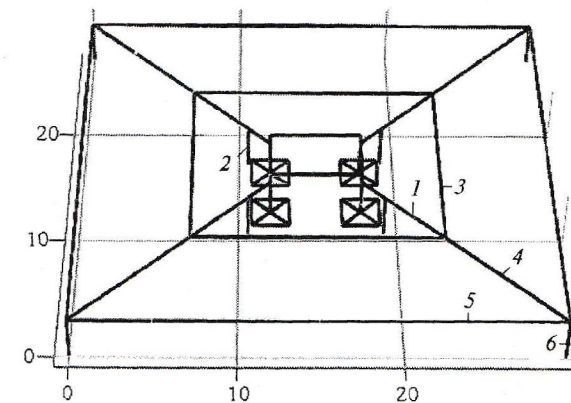


Рис. 5. Заземляющее устройство опоры №221, состоящее из фундамента и 6 элементов искусственного заземлителя. Длина лучей 2+5+10 = 17 м

Таблица 3

Сопротивление ЗУ опоры №221

Элементы	Состав ЗУ	$R_{з\text{у}}$ , Ом	$R_{\phi}/R_{з\text{у}}$
Фундамент	0	32,3	1
Лучи 4×7 м	0-1	28,4	1,14
Стержни 4×3 м	0-2	27,5	1,17
Контур 14×16 м	0-3	22,9	1,41
Лучи 4×10 м	0-4	18,6	1,74
Контур 30×28 м	0-5	13,5	2,4
Стержни 4×3 м	0-6	13	2,5

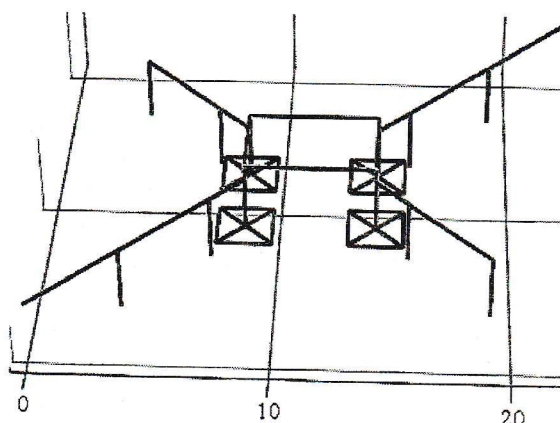


Рис.6. Расчетная модель ЗУ опоры №347.  
Длина коротких лучей  $2+5 = 7$  м,  
длинных лучей  $2+5+5 = 12$  м

них опор, расстановка измерительных электродов и ряд других факторов. Возможность применения импульсного метода измерений в условиях низкой проводимости грунта требует дополнительного обоснования.

Моделирование железобетонных фундаментов, используемых в качестве естественных за-

землителей, стержневыми электродами существенно упрощает расчеты ЗУ опор ВЛ и подстанций. Применение инженерной методики расчета ЗУ опор ВЛ на основе однослойной модели земли приводит к возрастанию погрешности при усложнении структуры земли, а потому нецелесообразно при наличии разработанных методик и программ численного расчета ЗУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности // 7-е изд. М.: Изд-во НПЦ ЭНАС, 2002.
2. Корсунцев А.В., Покровская К.И. Методика расчета сопротивлений заземления железобетонных фундаментов // Электрические станции. 1968. № 11.
3. Цирель Я.А. Заземляющие устройства воздушных линий электропередачи. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.
4. Корякин Р.Н., Солнцев В.И. Сопротивление растеканию стальных и железобетонных конструкций, используемых в качестве естественных заземлителей // Промышленная энергетика. 1981. № 7. С. 49-53.
5. Белоедова И.П. и др. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др. / Под ред. Е.С. Колечицкого. М.: Изд. дом МЭИ, 2008.



6. Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, 1981.

7. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16–23.

8. Новикова А.Н. и др. Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тро-

сом при модернизации заземляющих устройств // Электрические станции. 2007. № 9.

9. Борисов Р.К., Виноградов Д.Н., Морозов Ю.А. Обследование и реконструкция заземляющих устройств // Вторая Российская конф. по заземляющим устройствам: Сб. докл. Новосибирск: Изд-во Сибирск. энерг. академии, 2005.

УДК 621.22

В.А. Селиверстов

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ “ANSYS”

Важным элементом водопроводящего тракта гидроэнергетических установок (ГЭУ) является его головной участок — водоприемное устройство. Конструкции водоприемных устройств весьма разнообразны. Для каждого конструктивного типа можно определить параметры, характеризующие их основные геометрические особенности [1]. При этом целесообразно выделить наиболее значимые геометрические параметры — параметры первого уровня, которые присущи всем конструктивным решениям водоприемных устройств.

Поскольку в водоприемных устройствах обеспечивается перевод безнапорного водного потока (из водохранилища) в напорное течение (в напорный водовод) и площадь поперечного сечения водного потока в направлении его движения уменьшается, то логично, на наш взгляд, в качестве геометрических параметров первого уровня принять площади поперечного сечения водоприемника во входном  $\omega_{вх}$  и выходном  $\omega_{вых}$  сечениях конфузورного участка, а также общую длину самого конфузорного участка  $L_B$ .

Можно использовать модификации этих основных параметров, например:

отношение площадей поперечного сечения

(входного и выходного)  $\bar{\omega} = \frac{\omega_{вх}}{\omega_{вых}}$  и длину кон-

фузорного участка  $L_B$ ;

относительное уменьшение высоты входного

сечения водоприемного устройства  $\bar{H}_{вх} = \frac{H_{вх}}{H_{вых}}$

и относительную его длину  $\bar{L}_B = \frac{L_B}{H_{вых}}$ ;

угол наклона потолка конфузорного участка  $\beta$ , длину этого участка  $L$  и высоту выходного сечения  $H_{вых}$ .

Геометрические параметры первого уровня для водоприемников — основные их параметры, поскольку именно они определяют общие габариты водоприемного сооружения, а следовательно, его стоимость. С другой стороны, эти параметры определяют гидравлические условия течения потока воды в водоприемнике и величину потерь энергии потока в нем. Поэтому выбор оптимальных основных параметров водоприемного устройства — важная задача, правильное решение которой позволит более эффективно использовать энергию водного потока на гидроэнергетической установке.

В Самарском государственном архитектурно-строительном университете выполнены исследования водоприемного устройства ГЭУ с целью определения влияния его основных геометрических параметров на характеристики потока воды. Исследования проведены численным методом с применением программного средства ANSYS в модуле FLOTRAN CFD. Возможности применения FLOTRAN CFD для анализа дву-