

УДК 693.5:624.139

*ТИТОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
agd_tmm48@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113*

МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ

В работе показано, что причина низкой точности используемых методов электротехнического расчета трехфазных устройств для технологии электроразогрева бетонной смеси заключается в неадекватности принятых схем замещения фазных нагрузок в соответствующих устройствах. На объемном экспериментальном материале доказана гораздо более высокая точность предлагаемого метода расчета, основанного на иной схеме замещения.

Ключевые слова: бетонная смесь, технология электроразогрева, методика, электротехнический расчет.

*ТИТОВ, MIKHAIL MIKHAILOVICH, Cand. of tech. sc., assoc. prof.,
agd_tmm48@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Building,
113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russia*

TECHNIQUE OF ELECTROTECHNICAL CALCULATION OF DEVICES FOR TECHNOLOGY OF ELECTROWARMING UP OF THE CONCRETE MIXTURE

The paper considers the reason of low accuracy of used methods of electrotechnical calculation of three-phase devices for the technology of electrowarming up the concrete mixture. The reason is in not accepted equivalent circuits of phase loadings in corresponding devices. On a volumetric experimental material much higher accuracy of an offered method of the calculation based on other equivalent circuit was proved.

Keywords: concrete mix, technology of electric heating up, technique, electro-technical analysis.

С момента возникновения технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси и до настоящего времени отсутствует рекомендуемая нормами адекватная методика электротехнического расчета силы линейных токов и потребляемой мощности в служащих для этой цели поворотных строительных бункерах, оборудованных тремя пластинчатыми электродами. Также нет способов с приемлемой точностью рассчитать заранее время разогрева до требуемой температуры или температуру разогрева за заданное время.

Сравнение точности существующих и предлагаемой методик расчета велось по величине $\rho_{б,см}$, полученной по соответствующим формулам различных методик через фактические линейные токи и фазные напряжения, изме-

ренные в производственном ЭРУ объемом $V_6 = 0,65 \text{ м}^3$ с тремя пластинчатыми электродами, в котором производился разогрев бетонной смеси. За фактическое $\rho_{б.см}$ принималось значение, определенное методом «амперметра-вольтметра» в формочке из оргстекла размером $0,1 \times 0,1 \times 0,23 \text{ м}$ [6] и по закладным датчикам в ЭРУ [8]. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Фактическое и расчетные значения $\rho_{б.см}$ в ЭРУ объемом $V_6 = 0,65 \text{ м}^3$

№ п/п	Источник	Формула определения $\rho_{б.см}$	$\rho_{б.см}$ расчетное, Ом·м	$\rho_{б.см}$ фактическое, Ом·м	$\Delta\rho_{б.с}$, %	Примечание
1	[1]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{\phi} \cdot S}{I_{\phi} \cdot l}$	3,48	6,00	42	1964 г.
2	[2]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{\phi} \sqrt{3} \cdot S}{I_{л} \cdot l}$	3,48	$\rho_{б.н} = 8,52$; $\rho_{б.ср} = 6,00$; $\rho_{б.к} = 5,00$	42	1969 г.
3	[3]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{л} \cdot S}{I_{л} \sqrt{3} \cdot l}$	2,01		66,5	1972 г.
4	[4]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{л} \cdot S}{I_{л} \sqrt{3} \cdot l}$	2,01		66,5	1979 г.
5	[5]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{л} \cdot S}{I_{л} \sqrt{3} \cdot l}$	2,01		66,5	1981 г.
6	[6]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{л} \cdot S}{I_{л} \sqrt{3} \cdot l}$	2,01		66,5	1982 г.
7	[7]	$\rho_{б.см} = \frac{U_{л} \cdot S}{I_{\phi} \cdot l}$	6,013		0,2	1983 г.
8	[8]	$\rho_{2б.см} = \frac{U_{л} \sqrt{3} \cdot S}{I_{л2} \cdot l_{ср}}$ $\rho_{1,3 б.см} = \frac{U_{л}}{I_1 + I_3} \times$ $\times \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3} \frac{S}{l_0}}$ $K_t = \frac{\rho_{1,3}}{\rho_2} = 1,136$	6,013 6,83		0,2 0,2	1989 г.

Из анализа результатов следует, что в основном все формулы отличаются местоположением члена $\sqrt{3}$, и все значения $\rho_{б.см}$, полученные по любым

формулам, кроме предложенных, не совпадают со значением, полученным по формочке и по закладным датчикам.

В основу предлагаемой методики положено решение методами теории электрических цепей [8] задачи о соотношении линейных токов и фазных сопротивлений в эквивалентной схеме замещения электрических нагрузок бункера с тремя плоскими электродами.

Экспериментально на существующих ЭРУ установлено, что изоляция дна бункера (плёнкой полиэтиленовой, битумной окраской) не изменила ни величины линейных токов, ни средней температуры смеси после разогрева, а лишь на 2–3 мин отодвинула начало приэлектродного кипения. Поэтому в расчётной схеме замещения принято, что весь ток протекает между плоскопараллельными электродами. По ГОСТ 13109–90 на качество электроэнергии, подаваемой потребителю, установлено, что в сети прямая последовательность фаз ABC (1, 2, 3), но в реальных условиях стройплощадки она может быть не соблюдена. Поэтому аналогичный расчёт был произведен и для обратной последовательности фаз (ACB). Также он был произведен еще двумя способами: графическим и графоаналитическим для прямой и обратной последовательности фаз.

На рис. 2 изображено геометрическое соотношение межэлектродных расстояний и пропорциональное им межфазное сопротивление R . Поскольку $l_{cp} / l_{кр} = \xi$, то и межэлектродное сопротивление пропорционально межэлектродному расстоянию. Решение задачи по схеме (рис. 1) производилось аналитическим, графоаналитическим и графическим способами для прямой (ABC) и обратной (ACB) последовательности фаз. Результат в любом случае получался один и тот же. Приведем электротехнический расчет линейных токов и фазных сопротивлений по предлагаемой схеме замещения электронагревающего трехэлектродного устройства для прямой (ABC) последовательности фаз.

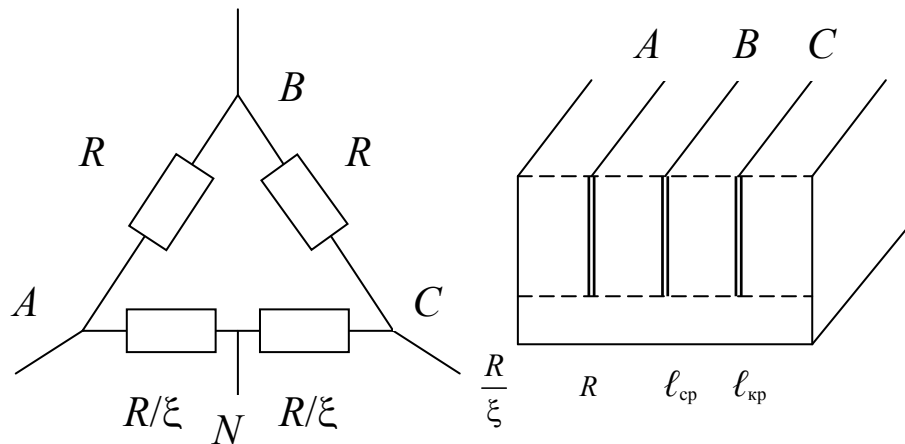


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения электрических нагрузок бункера с тремя плоскими электродами

Рис. 2. Соотношение межэлектродных расстояний и пропорциональное им межфазное сопротивление R

По закону Ома фазный ток, в соответствии с направлением, изображенным на рис. 3 векторной диаграммой напряжений по рис. 4 составит:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{BA}}{R} = \frac{U_n}{R} e^{j30} = \frac{U_n}{R} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right), \\ \dot{i}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{CB}}{R} = \frac{U_n}{R} e^{-j90} = -j \frac{U_n}{R}, \\ \dot{i}_{nC} &= \frac{\dot{U}_{nC} \cdot \xi}{R} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} e^{j120} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \\ \dot{i}_{nA} &= \frac{\dot{U}_{nA} \cdot \xi}{R} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} e^{j0} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

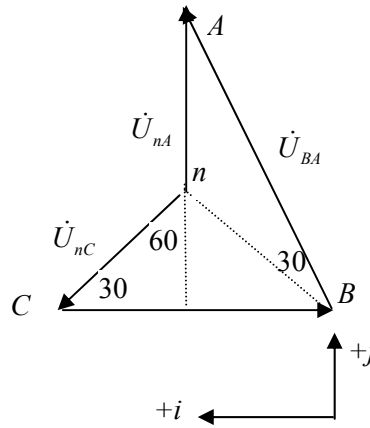
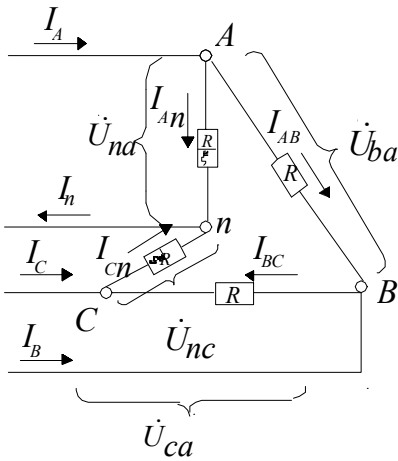


Рис. 3. Направление токов в схеме замещения Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений для нагрузок бункера прямой

По закону Кирхгофа линейный ток составит:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A - \dot{I}_{nA} - \dot{I}_{AB} &= 0, & \dot{I}_A &= \dot{I}_{nA} + \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_B - \dot{I}_{BC} + \dot{I}_{AB} &= 0, & \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_C + \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{Cn} &= 0, & \dot{I}_C &= \dot{I}_{Cn} - \dot{I}_{BC}, \\ -\dot{I}_n + \dot{I}_{An} + \dot{I}_{Cn} &= 0, & \dot{I}_n &= \dot{I}_{An} + \dot{I}_{Cn}. \end{aligned}$$

Определим показания амперметров $\textcircled{A} = |\dot{I}| = I$ по шкале в комплексной форме, используя формулу Эйлера:

$$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \cdot \sin \alpha$$

$$\begin{aligned}
I_A &= \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} + \frac{U_n}{R} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \frac{U_n}{R} \left(\frac{\xi}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \frac{U_n}{R} \sqrt{\left(\frac{\xi}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(j\frac{1}{2} \right)^2} = \\
&= \frac{U_n}{R} \sqrt{\frac{\xi^2}{3} + \xi + \frac{3}{4} + \frac{1}{4}} = \frac{U_n}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}, \\
I_B &= -j\frac{U_n}{R} - \frac{U_n}{R} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = \frac{U_n}{R} \left(-j - \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = \frac{U_n}{R} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{3}{2} \right) = \\
&= \frac{U_n}{R} \sqrt{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(-j\frac{3}{2} \right)^2} = \frac{U_n}{R} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{9}{4}} = \frac{U_n}{R} \sqrt{\frac{12}{4}} = \frac{U_n}{R} \sqrt{3}, \\
I_C &= \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + j\frac{U_n}{R} = \frac{U_n}{R} \left[\frac{\xi}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + j \right] = \\
&= \frac{U_n}{R} \left[-\frac{\xi}{2\sqrt{3}} + j \left(\frac{\xi}{2} + 1 \right) \right] = \frac{U_n}{R} \sqrt{\left(-\frac{\xi}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{\xi}{2} + 1 \right)^2} = \\
&= \frac{U_n}{R} \sqrt{\frac{\xi^2}{12} + \frac{\xi^2}{4} + \xi + 1} = \frac{U_n}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}, \\
I_n &= \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} + \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \left(1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\
&= \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 - 1 + \frac{1}{4} \right) + \frac{3}{4}} = \frac{U_n \cdot \xi}{R\sqrt{3}}.
\end{aligned}$$

Мощность, потребляемая устройством, составит

$$\begin{aligned}
P &= 2 \left(P_R + P_{R/\xi} \right) = 2 \left(U_n \cdot I_\phi + U_\phi \cdot I_\phi \right) = 2 \left(\frac{U_n \cdot I_n}{\sqrt{3}} + U_\phi^2 \frac{\xi}{3} \right) = \\
&= 2 \left(U_n \frac{I_n}{\sqrt{3}} + U_\phi \cdot I_n \frac{\xi}{3} \right) = 2 \left(U_\phi^B \cdot I_n^B + U_\phi^C \cdot I_n^C \frac{\xi}{3} \right),
\end{aligned}$$

где U_ϕ^B , I_n^B – фазное напряжение и ток в линии по центральному электроду;
 U_ϕ^C , I_n^C – то же по крайним электродам.

Основные расчетные формулы в итоге будут иметь следующий вид:

$$I_B = \frac{U_n}{R} \sqrt{3}; \quad (1)$$

$$\frac{I_A + I_C}{2} = \frac{U_n}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}; \quad (2)$$

$$P = 2 \left[U_\phi \cdot I_B + U_\phi \frac{I_A + I_C}{2} \frac{\xi}{3} \right]. \quad (3)$$

В результате во всех шести способах расчета получен один и тот же результат. Линейный ток по среднему электроду B при любом значении ξ составляет

$$I_B = \frac{U_{\text{л}}}{R} \sqrt{3}.$$

Линейные токи I_A и I_C на практике, как правило, не равны между собой и не равны I_B . Их неравенство I_B обусловлено закономерностями протекания тока в схеме и поддается расчету. Неравенство I_A и I_C между собой на практике (хотя по расчету они равны) обусловлено явлением электромагнитного переноса энергии с одной фазы на другую, т. н. явление «дикой» и «мертвой» фаз. Но среднеарифметическое их значение строго соответствует расчету.

$$\frac{I_A + I_C}{2} = \frac{U_{\text{л}}}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}.$$

Для уменьшения явления «дикой» и «мертвой» фаз рекомендуется применять обратную последовательность фаз, избегать больших расстояний от трансформатора до бункера и при неизбежности этого делить кабель на три равные части по длине и делать на соединениях сдвигку фаз на $1/3$.

Практика разогрева показывает, что при $\xi \neq 1,73$ температура в средних и крайних отсеках получается различной. Объясняется это следующим. Для равенства температур в отсеках необходимо, чтобы

$$\frac{Q_{\text{кр}}}{V_{\text{кр}}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}}. \text{ Пусть } Q_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{R} \tau; \quad Q_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{3R} \tau,$$

подставим второе в первое и выразим R через ρ

$$\frac{U_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{3\rho \frac{l_{\text{кр}}}{S} \ell_{\text{кр}} \cdot S} = \frac{U_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{\rho \frac{l_{\text{ср}}}{S} \ell_{\text{ср}} \cdot S},$$

сократим
$$\frac{1}{3l_{\text{кр}}^2} = \frac{1}{l_{\text{ср}}^2} \text{ или } l_{\text{кр}} = \frac{l_{\text{ср}}}{\sqrt{3}},$$

т. е. $\xi = 1,73$ обеспечивает равенство температур в отсеках.

Если необходимо, чтобы токи были равны, то нужно, чтобы

$$\sqrt{3} \frac{U_{\text{л}}}{R} = \frac{U_{\text{л}}}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}.$$

Сократим, возведём в квадрат и найдём величину ξ :

$$3 = 1 + \xi + \frac{\xi^2}{3} \text{ или } \xi^2 + 3\xi - 6 = 0 \quad \xi_{1,2} = -\frac{3}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{33}.$$

Решая это уравнение, находим положительный корень $\alpha^+ = 1,38$, т. е. только при $\xi = 1,38$ обеспечиваются равные токи $I_A = I_B = I_C$.

Представляет практический интерес вопрос о том, как будет соотноситься прирост температуры в среднем и крайнем отсеках в зависимости от ξ , так как только при $\xi = \sqrt{3}$ соблюдается равенство $\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{кр}}$.

Повторим расчёт в обратном порядке:

$$\frac{1}{3\ell_{\text{кр}}^2} \neq \frac{1}{\ell_{\text{кр}}^2 \xi^2}; \quad \frac{U_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{3\rho \cdot \ell_{\text{кр}}^2} \neq \frac{U_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{\rho \cdot \ell_{\text{кр}}^2 \xi^2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{3} \tau_{\text{к}} \neq \frac{1}{\xi^2} \tau_{\text{ср}};$$

т. е.

$$\frac{\Delta t_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{кр}}} = \frac{1/\xi^2}{1/3} = \frac{3}{\xi^2} K_t; \quad \text{итак,} \quad \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{кр}}} = K_t = \frac{3}{\xi^2}.$$

Из графиков, приведенных на рис. 5, следует, что есть такое соотношение ($\xi = 1,38$), при котором коэффициенты $\psi_{1,3}$ и ψ_2 равны 1,73, и все линейные токи при этом будут также равны, но не равны температуры по средним и крайним отсекам. А при $\xi = 1,73$ ψ_2 равно 1,73 (оно при любом $\xi = 1,73$) но $\psi_{1,3} = 1,93$. При этом экспериментальные точки ложатся на график с точностью графического построения.

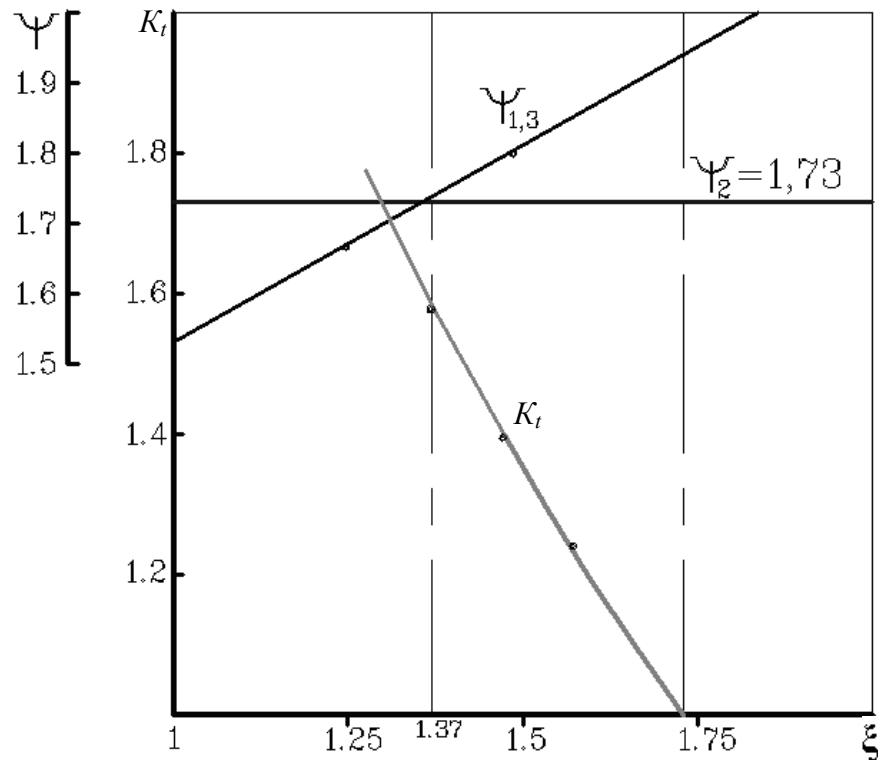


Рис. 5. Зависимость соотношения токов ψ_2 , $\psi_{1,3}$ и температуры K_t средних и крайних отсеков от соотношения межэлектродных расстояний ξ

Результаты экспериментальной проверки адекватности предложенной методики приведены в табл. 2. Критерием адекватности служит совпадение фактических параметров с расчетными, прежде всего по линейному току разогрева на среднем электроде и среднеарифметическому из двух токов на крайних электродах.

Таблица 2

**Результаты экспериментальной проверки предлагаемой методики
расчета I, P в ЭРУ**

№ п/п	Шифр экспери- мента	ρ_p , Ом·м в фор- ме	V_{p_3} , м ³	Линейные токи					
				$I_{2\text{расч}}$	$I_{2\text{факт.}}$	Δ , %	$\frac{I_1+I_2}{2}$, расч.	$\frac{I_1+I_3}{2}$, факт.	Δ , %
1	87-03	5,5	0,105	32,7	32,80	0,21	33,6	33,5	0,36
2	87-04	5,5	0,08	40,6	40,66	0	44,4	44,4	0
3	87-05	5,68	0,078	41,4	41,40	0,05	45,9	46,1	0,3
4	87-2(1)	3,48	0,795	356,9	357,0	0,01	365,4	377,0	3,06
5	88-002(1)	4,58	0,88	250,8	250,8	0	275,4	266,2	3,3
6	88-003(2)	4,47	0,90	255,3	254,0	0,51	280,4	284,9	1,58
7	88-004(2)	5,30	0,90	217,4	217,48	0	250,9	240,7	4,07

Результаты проверки показывают, что полученные выражения (1), (2) и (3) могут служить основой для достоверной методики расчета. Алгоритм методики может быть весьма различным, важно, чтобы в основе лежали вышеприведенные выражения. Итак:

1. В формочке сечением $0,15 \times 0,15$ м длиной $\ell_{\text{кр}}$ с электродами из тонкой черной жести площадью не менее $0,15 \times 0,15$ м измеряется удельное сопротивление бетонной смеси на $U_{\text{ф}}$. При этом весьма желательно, чтобы величина ρ определялась каждую минуту или в каждый момент, кратный 5°C n раз. Если предполагается в бункере нагревать бетонную смесь с 15 до 70°C , т. е. $\Delta t = 55^\circ\text{C}$, то и ρ_p определяется как среднегармоническая величина из n значений ρ_i в формочке, полученных на данном температурном интервале

$$\rho_p = \frac{n}{\sum_{i=1}^n 1/\rho_i}.$$

2. Подсчитывается сопротивление объема бетона в одном из центральных межэлектродных объемов

$$R = \rho_p (\ell_{\text{кр}}/S),$$

причем S – это геометрическая площадь плоского электрода, м².

3. Подсчитывается среднее по тепловому эффекту за время разогрева значение силы линейного тока в центральном электроде

$$I_B = \frac{U_n}{R} \sqrt{3}.$$

Здесь же подсчитывается среднее из двух значений силы линейных токов по крайним электродам

$$\frac{I_A + I_C}{2} = \frac{U_{\text{л}}}{R} \sqrt{1 + \xi + \frac{\xi^2}{3}}.$$

4. Подсчитывается среднее по тепловому эффекту за время разогрева значение мощности, потребляемой бункером.

$$P = 2 \left[U_{\text{ф}} \cdot I_{\text{в}} + U_{\text{ф}} \left(\frac{I_A + I_C}{2} \right) \frac{\xi}{3} \right].$$

Следует сказать, что точность расчетов по вышеприведенным формулам лимитируется лишь точностью электрических измерений и арифметических подсчетов. Неопределенность расчетов возникает лишь при определении времени разогрева или температурного интервала разогрева, т. е. при использовании значения величины к.п.д. = η .

5. Время разогрева определяется по известной формуле

$$T_p = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{P \cdot \eta}$$

или

$$\Delta t = \frac{T_p \cdot P \cdot \eta}{c \cdot m}.$$

Как установлено исследованиями, проведенными автором, величина η при прочих равных условиях зависит прежде всего от режима потребляемой мощности. И только там, где стабильно питающее напряжение, т. е. есть повторяемость режима потребляемой мощности, есть и приемлемая повторяемость в величине η . Во всех остальных случаях величина η может колебаться от 0,5 до 0,9, и, соответственно, в таком же диапазоне колеблется T_p или Δt . Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании технологии.

Выводы

1. Впервые предложена методика, позволяющая рассчитывать электротехнические параметры в технологии электроразогрева $I_{\text{л}}$ и P с предельно возможной точностью 1–3 % и технологические параметры T_p и Δt с точностью, определяемой точностью величины к.п.д.

2. Впервые дано объяснение наблюдаемому в практике электроразогрева расхождению расчетных и фактических значений $I_{\text{л}}$ и P и неравенству $I_{\text{л}}$ по крайним электродам.

3. Показана невозможность одновременного достижения равенства температуры по отсекам бункера и равенства линейных токов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов, С.А. Проект временной инструкции по бетонированию в зимних условиях с электроподогревом бетонной смеси / С.А. Миронов, А.С. Арбеньев, А.Р. Козлов // Бетонирование при низких отрицательных температурах: материалы конференции. Новокузнецк, 1964. – Новокузнецк : Новокузнецкое отделение УралНИИжелезобетона, 1965. – С. 103–118.

2. Пеккер, В.И. Влияние параметров предварительного электроразогрева на некоторые свойства тяжелой бетонной смеси и бетона : дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1969. – С. 60–69.
3. Рекомендации по изготовлению железобетонных изделий с применением электроразогрева бетонной смеси в заводских условиях / ВНИИЖелезобетон / Мин. пром. стройматериалов. СССР. – М., 1972. – С. 78.
4. Афанасьев, Н.Ф. Электроразогрев бетонных смесей / Н.Ф. Афанасьев. – Киев, 1979. – С. 103.
5. Арбеньев, А.С. Методика расчета и конструирования электроразогревательных устройств / А.С. Арбеньев // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1981. – № 11. – С. 99–102.
6. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1982. – С. 213.
7. Совершенствование технологии, организации и управления строительным производством в ГлавАлтайстрое: отчет о НИР / АлтПИ ; рук. В.Ф. Чушняков. 31.08./83 ; Барнаул, 1983. – Разд. 7. – С. 95–174. – № ГР 810035535 ; Инв. № 02830067882.
8. Титов, М.М. Круглогодичная электротермообработка бетона – способ интенсификации монолитного домостроения / М.М. Титов // Проблемы развития и интенсификации народнохозяйственного комплекса Алтайского края в 13-й пятилетке и на период до 2005 года: материалы научно-практической конференции. – Барнаул., 1989. – С. 98–100.