

УДК 666.97.035.51

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСКРЕТНОЙ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ АКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ  
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется влияние частоты электрического тока на эффективность дискретной разрядно-импульсной активации цементных систем. Определен наиболее эффективный метод снижения энергозатрат при интенсификации набора прочности монолитного бетона. Таковым на данный момент является использование электронно-ионных технологий. Выбрано устройство для проведения активации цементных суспензий. Для данного устройства рассчитаны основные зависимости между величинами элементов его составляющих. Найдена взаимосвязь параметров элементов устройства для обработки цементных суспензий с частотой электрического тока, используемого для обработки. Произведен расчет параметров устройства для различных частот электрического тока. На основе опытных данных подтверждена зависимость эффективности обработки от частоты электрического тока.

**Введение.** Наиболее распространенный способ ускорения набора прочности бетона при возведении монолитных конструкций – использование энергии электрического поля. С целью снижения энергозатрат при электрообработке необходимо применять методы, ускоряющие процессы гидратации цемента и структурообразования бетона. Перспективным в этом направлении является внедрение электронно-ионных технологий, связанных с целенаправленным использованием энергии электрического поля.

При внедрении интенсивных приемов обработки компонентов бетонной смеси электрическим полем с различными комбинациями формы и направленности можно обеспечить оптимальные условия самоорганизации, распределения модифицирующих веществ и активации вяжущего [1 – 3].

В работе [4] предложено устройство для обработки цементных суспензий. Схема устройства для проведения дискретной разрядно-импульсной обработки представлена на рисунке 1.

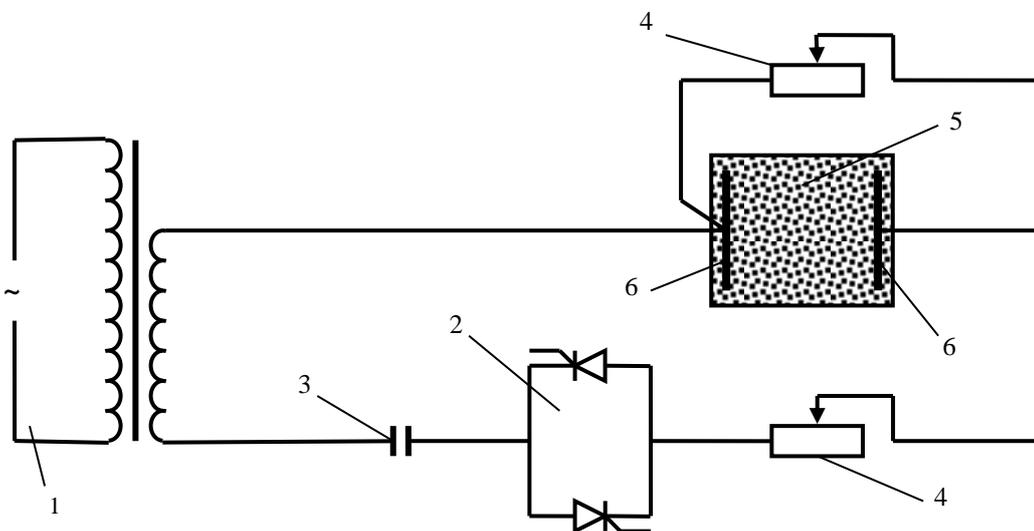


Рис. 1. Схема устройства для проведения дискретной разрядно-импульсной обработки цементных суспензий:

1 – источник тока; 2 – тиристорный регулятор напряжения; 3 – накопительная емкость;  
4 – подстроечные сопротивления; 5 – емкость для обработки; 6 – электроды

Характер изменения напряжения на отдельных элементах устройства проиллюстрирован рисунком 2. Выполним расчеты для определения соотношений между величиной омического сопротивления, емкости для обработки, заполненной цементной суспензией, величиной накопительной емкости и частотой используемого для обработки напряжения, исходя из следующих соображений:

- 1) получения наибольшей величины напряжения в момент начала разряда конденсатора;
- 2) после начала разряда конденсатора характер напряжения должен изменяться по закону, близкому к синусоидальному;

3) подстроечное и регулирующее сопротивление не учитываем, так как их величины будут определяться по найденным соотношениям в зависимости от конкретных условий каждого опыта (обработки).

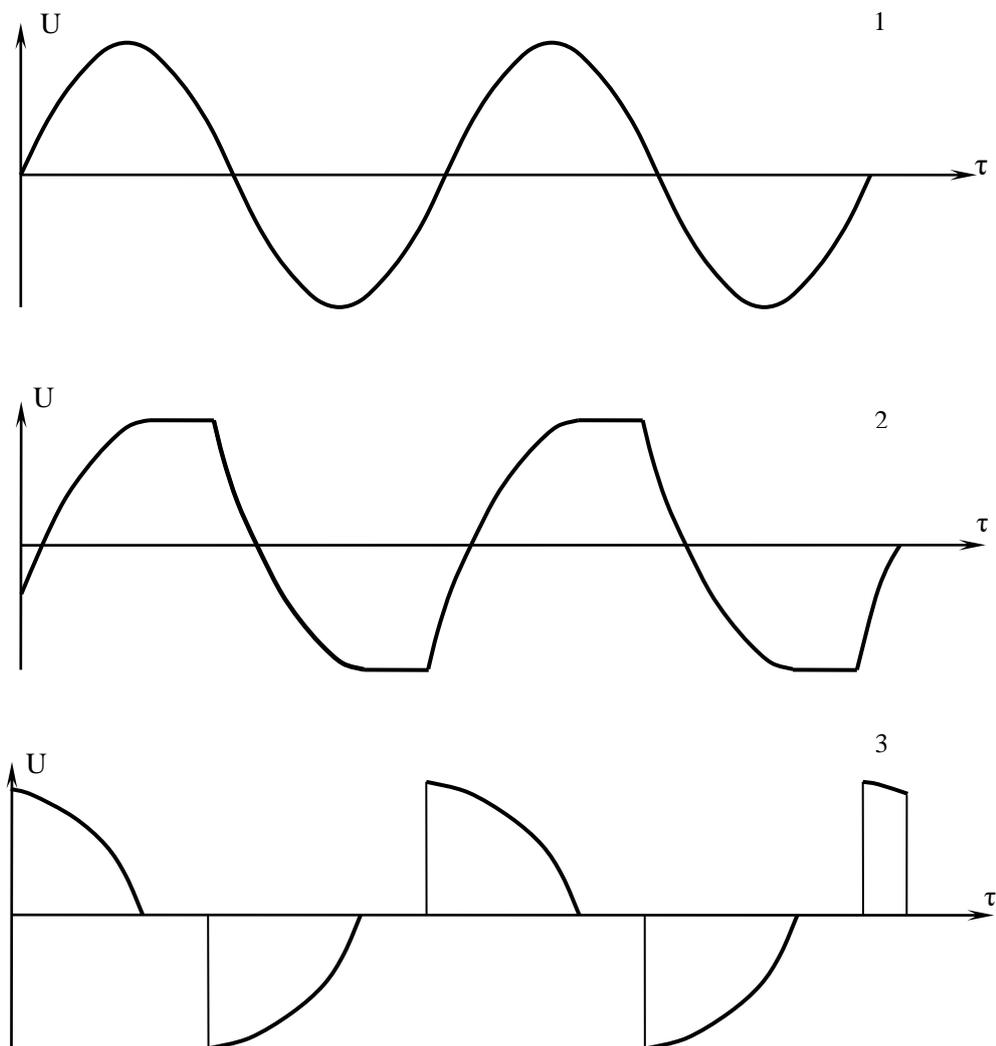


Рис. 2. Характер изменения напряжения на отдельных элементах устройства:  
 1 – на источнике тока; 2 – на накопительной емкости; 3 – на емкости для обработки

Исходя из вышеизложенного расчетная схема для определения соотношений между параметрами тока будет иметь вид, показанный на рисунке 3.

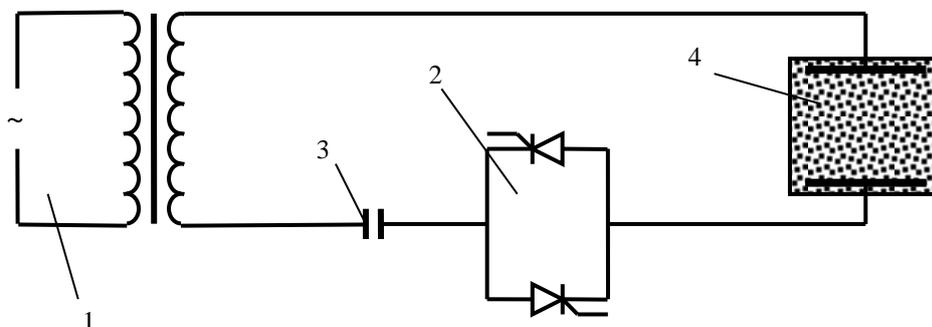


Рис. 3. Расчетная схема для определения соотношений между параметрами тока:  
 1 – источник тока; 2 – тиристорный регулятор напряжения; 3 – накопительная емкость; 4 – емкость для обработки

Для данной схемы определим соотношение между параметрами составляющих ее элементов, при которых одновременно с разрядом накопительной емкости будет достигаться максимальное значение напряжения на нагрузке и близкий к синусоидальному дальнейший характер его изменения.

Для определения соотношений вначале рассмотрим диаграмму напряжений на элементах (рис. 4).

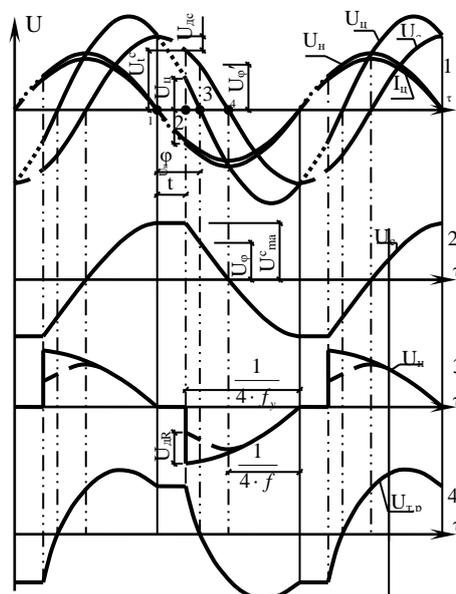


Рис. 4. Колебания напряжений на участках и элементах расчетной схемы:

- 1 – колебания напряжения и тока при отсутствии тиристорного регулятора;  
 2 – колебания напряжения на накопительной емкости; 3 – колебания напряжения на нагрузке;  
 4 – колебания напряжения на тиристорном регуляторе

На диаграмме штриховыми линиями показан интервал времени, в течение которого, при наличии регулятора, цепь будет разомкнута. Как видно из рисунка 4, при наличии тиристорного регулятора на участке 1 – 2 из-за разрыва цепи ток будет отсутствовать, поэтому заряд конденсатора и напряжение на нем будет оставаться постоянным и соответствовать максимальному значению. В момент замыкания цепи на нагрузке будет происходить выделение энергии как от разряда конденсатора, так и из сети из-за наличия активного сопротивления. В начальный момент на нагрузке необходимо получить максимальное напряжение, которое будет соответствовать значению амплитудного напряжения для принятой нами условной частоты, в дальнейшем оно должно изменяться по закону, близкому к синусоидальному.

Условную частоту, т.е. частоту, для которой в момент разрядки конденсатора достигается максимальное значение напряжения на нагрузке, можно определить, пользуясь рисунком 4. В соответствии с этим рисунком условная и используемая частота синусоидального тока, а также время открытия тиристорного регулятора связаны следующим соотношением:

$$\frac{1}{4 \cdot f_y} = \frac{1}{2 \cdot f} - t \quad (1)$$

На основании (1) значение условной частоты определяется следующим выражением:

$$f_y = \frac{f}{2 \cdot (1 - 2f \cdot t)} \quad (2)$$

Причем в момент времени  $t$  сумма напряжения на конденсаторе и нагрузке равна напряжению в сети. Напряжение на нагрузке должно быть следующим:

$$U_n = I_{кр} \cdot R \quad (3)$$

Величина  $I_{кр}$ , соответствующая амплитудному значению для принятой условной частоты  $f_y$ , и максимальное (амплитудное) значение для используемой при обработке частоты тока в соответствии с рисунком 4 связаны следующим соотношением:

$$I = I_{кр} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_y \cdot \frac{1}{4 \cdot f}\right), \quad (4)$$

или с учетом (2) имеем:

$$I_{кр} = \frac{I}{\sin\left[\frac{\pi}{4 \cdot (1 - 2 \cdot f \cdot t)}\right]}. \quad (5)$$

При соответствующей силе тока напряжение на нагрузке будет иметь следующее значение:

$$U_n = \frac{I \cdot R}{\sin\left[\frac{\pi}{4 \cdot (1 - 2 \cdot f \cdot t)}\right]}. \quad (6)$$

В момент времени  $t$ , равный  $t$ , точка «2» (см. рис. 4) через нагрузку должна проходить наибольшую силу тока, соответствующую амплитудному значению для условной частоты. Эта величина будет результирующей силы тока от источника тока и разряда конденсатора. То есть в результате разряда конденсатора нам необходимо получить дополнительный ток, который в сумме с током источника создаст критический ток обработки. Поэтому в соответствии с рисунком

$$I_{c.p} = I_{к.p} - I \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t), \quad (7)$$

или

$$U_{\partial.R} = \frac{I \cdot R}{\sin\left[\frac{\pi}{4 \cdot (1 - 2 \cdot f \cdot t)}\right]} - I \cdot R \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t). \quad (8)$$

Для выполнения условия (8) конденсатор должен иметь такую емкость, которая позволит накопить заряд, достаточный для создания после открытия тиристорного регулятора дополнительного напряжения, обеспечивающего при разряде конденсатора необходимую величину силы тока. Величина дополнительного напряжения будет равна разности максимального напряжения на конденсаторе и напряжения в момент времени  $t$ , точка «2» (рис. 4), при работе схемы без тиристорного регулятора, т.е.

$$U_{\partial.c} = U_{\max}^c - U_t^c, \quad (9)$$

или в соответствии с рисунком 4

$$U_{\partial.c} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} - \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t). \quad (10)$$

Получив ток критической величины, необходимо сохранить режим работы всей цепи. Это возможно при неизменном результирующем напряжении в сети в точке «2» (см. рис. 4). Оно сохранится неизменным в случае равенства дополнительного напряжения на нагрузке и конденсаторе, поэтому:

$$U_{\partial.R} = U_{\partial.c}. \quad (11)$$

Тогда с учетом (8) и (10) и равенства силы тока на всех элементах цепи получаем следующее уравнение:

$$R \cdot \left\{ \frac{1}{\sin\left[\frac{\pi}{4 \cdot (1 - 2 \cdot f \cdot t)}\right]} - \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \right\} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \cdot [1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)]. \quad (12)$$

В момент времени  $\tau$ , равный углу сдвига фаз точка «3» (см. рис. 4), напряжение в цепи обработки должно отсутствовать. Если это условие не выполнится, в дальнейших расчетах нельзя использовать общепринятые закономерности для цепей переменного тока с емкостью. В точке «3» напряжение на нагрузке равно напряжению на конденсаторе. Из-за тиристорного регулятора при  $\tau$ , равном нулю, он отключается, и на конденсаторе до точки «2» сохраняется заряд. Этот заряд необходим для создания критической силы тока обработки.

Напряжение на конденсаторе и нагрузке, в период времени от  $t$  до  $\varphi$ , между точками «2» и «3» представлено в виде суммы экспоненциальной и синусоидальной функции. Все теоретические расчеты в дальнейшем будут проверяться и уточняться экспериментальным путем. Поэтому для их упрощения с определенной вероятностью можно допустить, что к моменту времени  $\tau$ , равному  $\varphi$  напряжение на конденсаторе снизится до уровня напряжения на нем при отсутствии в цепи тиристорного регулятора.

При разрядке напряжение на конденсаторе изменяется по логарифмическому закону и в момент времени, равный углу сдвига фаз, будет иметь следующую величину:

$$U_{\varphi} = U_{\max}^c \cdot e^{-\frac{\varphi-t}{RC}}. \quad (13)$$

В этот момент времени напряжение на накопительной емкости от сети в случае отсутствия тиристорного регулятора

$$U'_{\varphi} = U_{\max}^c \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi). \quad (14)$$

В момент времени  $\tau$ , равный углу сдвига фаз  $\varphi$ , (13) равно (14), поэтому:

$$e^{-\frac{\varphi-t}{RC}} = \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi). \quad (15)$$

После преобразования (15), получаем:

$$\operatorname{tg}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi) = \frac{\ln[\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi)]}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (\varphi - t)}. \quad (16)$$

Уравнение (11) и уравнение (16) составляют систему уравнений, связывающую параметры тока в цепи обработки:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(2\pi \cdot f \cdot \varphi)[1 - \cos(2\pi \cdot f \cdot \varphi)] = \frac{1}{\sin\left[\frac{\pi}{4(1-2f \cdot t)}\right]} - \sin(2\pi \cdot f \cdot t); \\ \operatorname{tg}(2\pi \cdot f \cdot \varphi) - \frac{\ln[\cos(2\pi \cdot f \cdot \varphi)]}{2\pi \cdot f \cdot (\varphi - t)}. \end{cases} \quad (17)$$

Решение системы уравнений (17) определяет значения угла сдвига фаз и время закрытия тиристорного регулятора. Величина  $\varphi$  определяет взаимосвязь между величиной накопительной емкости и омическим сопротивлением обрабатываемой среды.

Для изучения влияния частоты электрического тока, используемого при дискретной разрядно-импульсной обработке с использованием зависимости (17), были рассчитаны  $t$  и  $\varphi$  для частот тока 5; 50; 250; 300 и 500 Гц (таблица).

На основании закона Ома для переменного тока с данными частотами были рассчитаны значения характеристического времени (RC), а по известному электросопротивлению обрабатываемой суспензии определена величина накопительной емкости (см. таблицу).

Обработке подвергалась цементная суспензия с водоцементным отношением, равным 0,55.

Для изготовления суспензии использовался суперпластификатор С-3 в количестве 0,9 % от веса цемента и сульфат натрия в количестве 0,45 % от веса цемента.

Обработанная суспензия вводилась в бетонную смесь вместо первой партии воды затворения.

Вода и цемент, используемые для приготовления суспензии, учитывались в объем расхода материалов в составе бетонной смеси. Данные испытаний приведены в таблице.

Влияние частоты тока, используемого для дискретной разрядно-импульсной активации, на прочность бетона

Параметры обработки					Прочность бетона, МПа
частота используемого тока	угол сдвига по фазе $\varphi$ (с)	время открытия тиристорного регулятора $t$ (с)	электросопротивление цементной суспензии, Ом	величина накопительной емкости, мкФ	
5	$3.57 \cdot 10^{-2}$	$2.29 \cdot 10^{-2}$	23	670	31
50	$3.57 \cdot 10^{-3}$	$2.29 \cdot 10^{-3}$	23	67.0	32
250	$7.14 \cdot 10^{-4}$	$4.58 \cdot 10^{-4}$	23	13.0	37
300	$5.45 \cdot 10^{-4}$	$3.82 \cdot 10^{-4}$	23	11.0	39
500	$3.57 \cdot 10^{-4}$	$2.29 \cdot 10^{-4}$	23	7.0	6

**Заключение.** Имеется определенная частота электрического тока в диапазоне 200 – 350 Гц, применение которой наиболее эффективно в дискретной разрядно-импульсной обработке.

Использование оптимальной частоты электрического тока позволяет без дополнительных затрат повысить прочность бетона на 26 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Файнер, М.Ш. Энергосберегающие модификаторы цементов и бетонов / М.Ш. Файнер // Энергосбережение в строительстве: науч.-техн. конф.: тез. докл. – Киев – Черновцы, 1996. – С. 64 – 85.
2. Клименко, В.М. Электрофизическая обработка бетонных смесей с химическими добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10; 02.00.05 / В.М. Клименко; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2002. – 17 с.
3. Данилова, Ю.С. Активация цементных растворов при воздействии электрического поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ю.С. Данилова; Самарская гос. архит. строит. акад. – Самара, 2002. – 19 с.
4. Устройство для обработки цементных суспензий: пат. № 1060, МПК 7 В 28С 5/00 / А.П. Шведов; заявитель Полоц. гос. ун-т.

Поступила 11.11.2010

#### INFLUENCE OF FREQUENCY OF THE ELECTRIC CURRENT ON EFFICIENCY OF DISCRETE PULSED DISCHARGE ACTIVATION

A. SHVEDOV

*The most effective method of decrease in power inputs at an intensification of a strength setting of a site concrete is defined. At present it is use of elektron-ionic techniques. The device for conducting of cement suspensions activation is selected. For the given device the basic dependences between magnitudes of elements of its components are counted. The interconnection of parametres of elements of the device for machining of cement suspensions with frequency of the electric current used for processing is found. Calculation of parametres of the device is made for various frequencies of an electric current. On the basis of empirical data dependence of efficiency of processing on frequency of an electric current is confirmed.*