

УДК 622.235.432

С.П. Масков

ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ФАЗ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ ЭЛЕКТРОВЗРЫВАНИЯ

Приведена методика графоаналитического определения возможности отказов в трехфазной системе электровзрывания значительно упрощающая анализ электровзрывной цепи на безотказное срабатывание электродетонаторов.

Семинар № 5

При массовом электровзрывании часто используется трехфазная система напряжений при непосредственном ее включении на электровзрывную цепь (ЭВЦ). Вследствие неравномерности включения ножей входного рубильника (запаздывание включения отдельных ножей может составлять до 3-4 мс [1]), группы электродетонаторов (ЭД), подключенные к различным фазам, будут получать различные импульсы тока, что будет отрицательно влиять на выполнение условий безотказности во всей системе электровзрывания [2]. Проанализируем влияние запаздывания включения отдельных фаз напряжения на безотказность срабатывания ЭД всей электровзрывной цепи, состоящей из трех групп ЭД, подключенных к различным фазам напряжения.

Нагрузка (электровзрывная цепь) может соединяться звездой или треугольником. С точки зрения надежности и повышения безотказности предпочтительным является соединение нагрузки треугольником по следующим причинам: во-первых, в случае соединения нагрузки в треугольник потребляемая ЭВЦ мощность увеличивается в три раза (по сравнению с соединением в звезду); во-вторых, при обрыве в результате срабатывания ЭД одной из

ветвей электровзрывной цепи в случае соединения в треугольник две оставшиеся ветви остаются под линейным напряжением, т.е. в них условия безотказности продолжаются выполняться. В случае соединения звездой при срабатывании ЭД в одной фазе две другие ветви электровзрывной цепи образуют один общий контур и оказываются под напряжением, равным половине линейного напряжения (первоначальным для этих фаз было напряжение, в $\sqrt{3}$ раз меньшее линейного напряжения). Таким образом, после срабатывания ЭД в группе, относящейся к какой-то одной фазе соединенной в звезду электровзрывной цепи, две другие окажутся под напряжением в $2/\sqrt{3}$ меньше расчетного напряжения, что может привести к отказам.

При дальнейшем анализе будем рассматривать соединение групп ЭД в треугольник (рис. 1). Электровзрывная сеть представлена тремя ветвями (ЭВЦ_{ab}, ЭВЦ_{bc} и ЭВЦ_{ca}). Каждая ветвь может состоять из нескольких групп ЭД соединенных по смешанной схеме, что учитывается соответствующими коэффициентами передачи. R_A, R_B, R_C - сопротивления магистральных проводов. 1 - участковая трансформаторная подстанция. 2 - фрагмент мин-

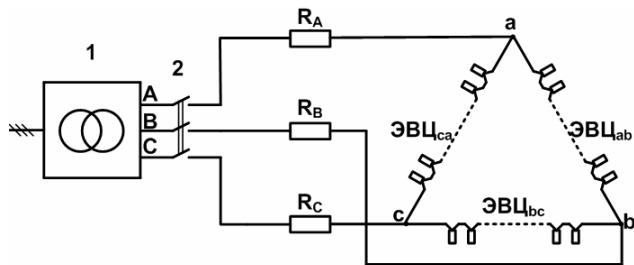


Рис. 1. Соединение ветвей электровзрывной цепи в треугольник

$$K_{AB} = \int_{t_1}^t (\alpha_{AB} i_{AB})^2 dt = \frac{(\alpha_{AB} U_{mAB})^2}{R_{AB}^2 \cdot \omega} \times$$

$$\times \left[\omega t - \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t + 2\psi_{AB}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1 + 2\psi_{AB}) \right] \quad (5)$$

$$K_{BC} = \int_{t_1}^t (\alpha_{BC} i_{BC})^2 dt = \frac{(\alpha_{BC} U_{mBC})^2}{R_{BC}^2 \omega} \times$$

$$\times [\omega t - \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t + 2\psi_{AB} - \frac{4\pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1 + 2\psi_{AB} - \frac{4\pi}{3})]. \quad (6)$$

$$K_{CA} = \int_0^t (\alpha_{CA} i_{CA})^2 dt = \frac{(\alpha_{CA} U_{mCA})^2}{R_{CA}^2 \omega} \times$$

$$\times [\omega t - \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t + 2\psi_{AB} + \frac{4\pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1 + 2\psi_{AB} + \frac{4\pi}{3})], \quad (7)$$

где R_{AB} , R_{BC} и R_{CA} – сопротивления электровзрывных цепей, подключенных соответственно под напряжение U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} ; ψ_{AB} – начальная фаза линейного напряжения.

Если происходит запаздывание включения, например фазы А, то до ее включения токи в фазах АВ и СА равны:

$$i_{AB} = i_{CA} = \frac{U_{mBC}}{R_{AB} + R_{CA}} \sin(\omega t + \psi_{AB} - \frac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

Ток в фазе ВС определяется по формуле (2).

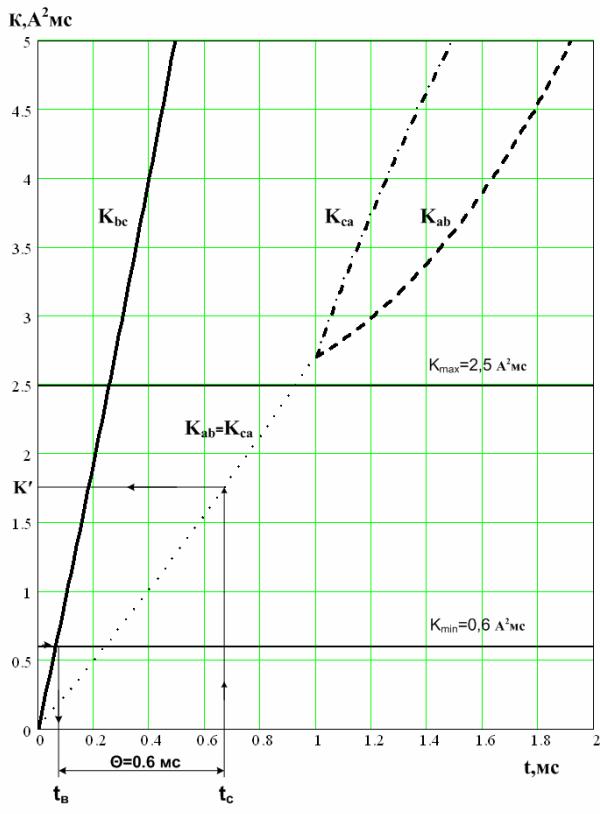
Рассмотрим, какие импульсы тока получат разные ветви электровзрывной цепи в случае одновременного включения фаз и в случае запаздывания включения фазы А; для упрощение примем $R_A = R_B = R_C = 0$. При одновременном включении фаз:

где токи i_{AB} , i_{BC} и i_{CA} определяются соответственно по формулам (1), (2) и (3); α_{AB} , α_{BC} , α_{CA} – коэффициенты передачи по току в соответствующих фазах; t_1 – момент включения рубильника (момент подачи напряжения).

При запаздывании включения фазы А импульсы, получаемые электровзрывной цепью в различных фазах при условии $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=R$, равны

$$K_{AB} = \int_{t_1}^{t_3} \left[\frac{\alpha_{AB} U_{mBC}}{2R} \sin(\omega t + \psi_A - \frac{2}{3}\pi) \right]^2 dt +$$

$$+ \int_{t_3}^t \left[\frac{\alpha_{AB} U_{mAB}}{R} \sin(\omega t + \psi_A) \right]^2 dt, \quad (8)$$



$$K_{CA} = \int_{t_1}^{t_3} \left[\frac{\alpha_{CA} U_{mBC}}{2R} \sin(\omega t + \psi_A - \frac{2}{3}\pi) \right]^2 dt + \\ + \int_{t_3}^t \left[\frac{\alpha_{CA} U_{mCA}}{R} \sin(\omega t + \psi_A + \frac{2\pi}{3}) \right]^2 dt. \quad (9)$$

Импульс тока в фазе ВС определяется по формуле (6). После интегрирования (8) и (9) получаются выражения

$$K_{AB} = \frac{(\alpha_{AB} U_{mBC})^2}{4R^2 \cdot \omega} \left[\omega t_2 - \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin x \times \right. \\ \left. \times (2\omega t_2 + 2\psi_{AB} - \frac{4\pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1 + \right. \\ \left. + 2\psi_{AB} - \frac{4\pi}{3}) \right] + \frac{(\alpha_{AB} U_{mAB})^2}{R^2 \cdot \omega} \left[\omega t_4 - \omega t_3 - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_4 + 2\psi_{AB}) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_3 + 2\psi_{AB}) \right] \quad (10)$$

Рис. 2. Графики зависимостей импульсов токов K_{ab} , K_{bc} , K_{ca} в различных фазах нагрузки (ветвях ЭВЦ) от времени t при запаздывании включения фазы А на $t_{3an} = 1$ мс (включение системы в момент времени $t_1 = 0$, $\psi_{ab} = 0$, при расчетных токах $I = 2.5$ А)

$$K_{CA}(t) = \frac{(\alpha_{CA} U_{mA})^2}{4R^2 \cdot \omega} \left[\omega t_2 - \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin x + \right. \\ \left. \times (2\omega t_2 + 2\psi_{AB} - \frac{4\pi}{3}) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1 + 2\psi_{AB} - \right. \\ \left. - \frac{4\pi}{3}) \right] + \frac{(\alpha_{CA} U_{mA})^2}{R^2 \cdot \omega} \left[\omega t_4 - \omega t_3 - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_4 + 2\psi_{AB} + \frac{4\pi}{3}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sin(2\omega t_3 + 2\psi_{AB} + \frac{4\pi}{3}) \right] \quad (11)$$

где t_2 – текущая переменная до запаздывания; t_3 – время запаздывания фазы; t_4 – текущая переменная после запаздывания.

По выведенным формулам были выполнены вычисления и построены графики, приведенные на рис. 2-4.

На рис. 2-4 изображены графики зависимостей импульсов токов K_{AB} , K_{BC} и K_{CA} в различных фазах нагрузки (в различных ветвях электровзрывной цепи) от времени t при запаздывании включения одной из фаз на $t_{3an} = 1$ мсек. Начальная фаза $\psi_{AB} = 0$; $\alpha_{AB} = \alpha_{BC} = \alpha_{CA} = 1$. Включение системы происходит в различные моменты времени. Расчетный ток в каждой ветви электровзрывной цепи равен 2,5 А. На рис. 2 включение системы принимается в момент $t_1 = 0$; на рис. 4 система включена в момент $t_1 = 1$ мс.

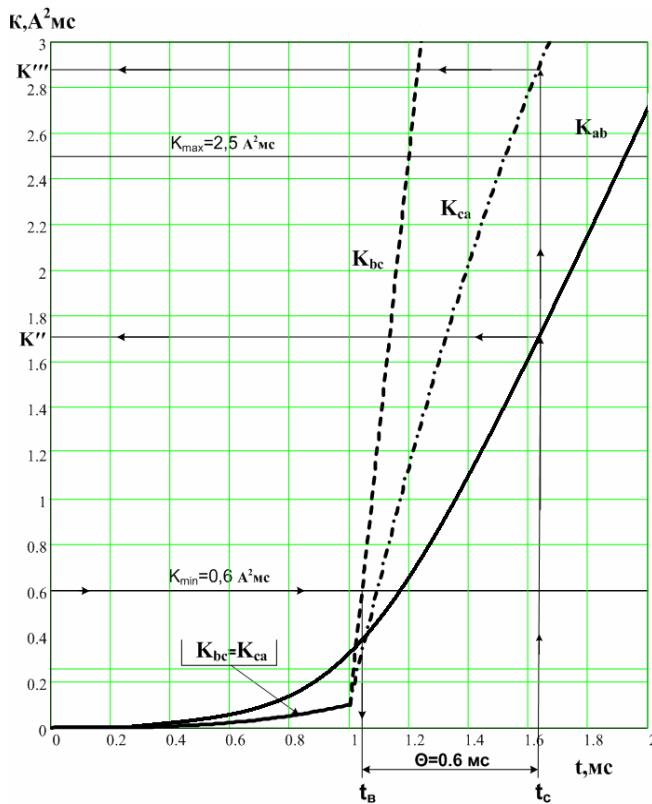


Рис. 3. Графики зависимостей импульсов токов K_{ab} , K_{bc} , K_{ca} , в различных фазах нагрузки (ветвях ЭВЦ) от времени t при запаздывании включения фазы С на $t_{зан}=1$ мс (включение системы в момент времени $t_1=0$, $\Psi_{ab}=0$, при расчетных токах $I=2.5$ А)

t_c определим импульс тока, который получит ЭД, находящийся в ветви, обтекаемой наименьшим током (в данном случае – в ветвях АВ и СА). В результате несложных геометрических построений получаем импульс

тока $K' = 1.7 \text{ A}^2 \text{ мс}$. Как видно из графика рис. 2, полученный импульс существенно меньше максимально возможного импульса, который может иметь ЭД ($K < K_{\max} = 2.5 \text{ A}^2 \text{ мс}$), т.е. в этом случае возможен отказ в ветвях ЭВЦ, подсоединенных к фазам АВ и СА.

На рис. 3 показаны графики, аналогичные графикам рис. 2, но при запаздывании включения фазы С (также на 1 мс). Построения, выполненные по аналогии с построениями рис. 2, показывают, что отказ в этом случае возможен в фазе АВ ($t_B = 1.05$ мс, $t_c = 1.65$ мс, $K'' = 1.75 \text{ A}^2 \text{ мс}$, $K''' = 2.87 \text{ A}^2 \text{ мс}$).

На распределение токов в фазах и величину получаемых различными ветвями цепи импульсов тока существенное влияние оказывает момент включения системы. На рис. 4 показаны графики импульсов, получаемых различными ветвями электровзрывной

Для анализа безотказного срабатывания ЭД в системе определим импульсы тока, которые получают ЭД различных ветвей. Воспользуемся графоаналитическим методом.

Рассмотрим наихудший случай, когда наиболее чувствительный ЭД находится в ветви, которая получает наибольший импульс тока (в рассматриваемом случае это ветвь ВС).

Откладывая по вертикали $K = K_{\min} = 0.6 \text{ A}^2 \text{ мс}$ (рис. 2), найдем по кривой $K_{BC}(t)$ минимальное время воспламенения $t_B = 0.06$ мс. Далее, прибавляя к t_B время передачи (задержки) $\Theta = 0.6$ мс, найдем общее время t_c существования цепи, т.е. время протекания тока в ней $t_c = t_B + \Theta = 0.66$ мс. По найденному времени

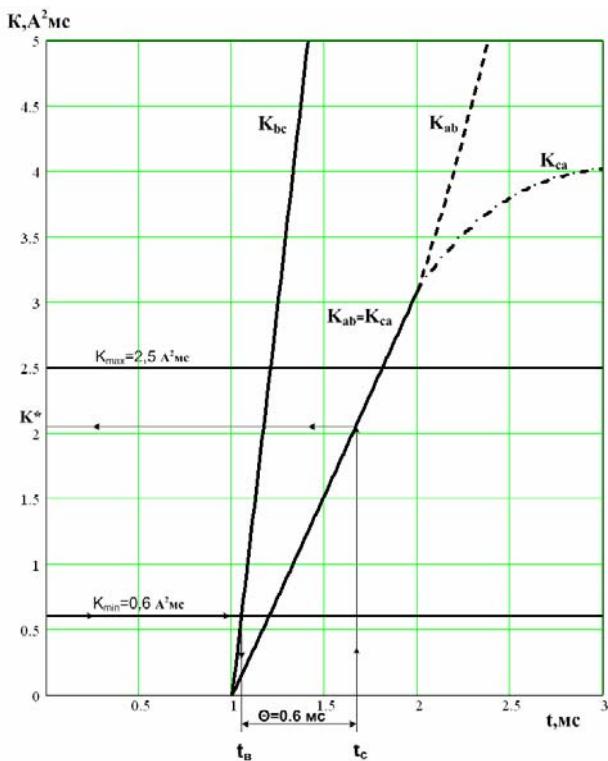


Рис. 4. Графики зависимостей импульсов токов K_{ab} , K_{bc} , K_{ca} , в различных фазах нагрузки (ветвях ЭВЦ) от времени t при запаздывании включения фазы А на $t_{3an}=1$ мс (включение системы в момент времени $t_1=1$ мс, $\Psi_{ab}=0$, при расчетных токах $I=2.5$ А)

водом) привел к аналогичным выводам: существует реальная возможность возникновения отказов в системе из-за запаздывания включения от-

дельных фаз; на распределение токов и импульсов тока отказывает существенное влияние момент включения системы на трехфазное напряжение, что при неблагоприятных условиях также может оказаться причиной отказов.

Приведенная в статье методика графоаналитического определения возможности отказов в системе значительно упрощает анализ электровзрывной цепи на безотказное срабатывание ЭД. При ведении ЭВР на горных предприятиях, особенно при проведении массовых взрывов, следует учитывать описанные в статье факторы и рассчитывать ЭВЦ с учетом возможного запаздывания фаз трехфазной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электрическому взрыванию зарядов взрывчатых веществ. Граевский М.М., «Рандеву-АМ», Москва, 2000 г.
2. «Основы теории электровзрывания», Петров Ю.С., Монография, изд. «Терек», Владикавказ, 1998 г. ГЛАБ

Коротко об авторах

Масков С.П. – ведущий инженер кафедры теоретической электротехники и электрических машин, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 5 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.А. Белин.