ВЛИЯНИЕ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫХ ОТРЕЗКОВ КАБЕЛЕЙ НА ЗАТУХАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИХ ПЕРЕДАЧЕ ПО ШАХТНЫМ СИЛОВЫМ СЕТЯМ

Б. Ф. Козырь, И. Ф. Огороднейчук

Харьков

При передаче сигналов телемеханики с помощью токов высокой частоты по шахтным силовым сетям без высокочастотной обработки силовых потребителей, трансформаторов и ответвлений необходимо учитывать шунтирующее действие послелних Исследования, проведенные рядом институтов, показывают, что шунтирующее действие потребителей

сильно сказывается на частотах ниже 5 *кгц* при схеме присоединения фаза — фаза. При схеме фаза — земля шунтирование проявляется на частотах 200 *кгц* и выше. В диапазоне 20—180 *кгц* оно незначительно.

В тракте передачи от распределительного пункта участка на поверхность по схеме фаза — фаза на частотах 40—60 *кгц* распространение электромагнитной энергии может зависеть от последовательного резонанса, образованного контуром: индуктивность рассеяния силового трансформатора — приведенная емкость высоковольтной сети плюс межвитковая емкость. Однако при отсутствии резонанса в силовой сети сопротивление ее всегда не совпадает с входным сопротивлением трансформатора и, следовательно, наблюдается затухание сигнала в тракте передачи. В случае же резонанса увеличивается рассогласованность низковольтной сети с аппаратурой канала, но уменьшается рассогласованность линии с трансформатором, так как контур емкость силовой сети — индуктивность трансформатора — собственная емкость работает как резонансный согласующий трансформатор. Все это приводит к тому, что затухание сигнала при передаче от распределительного пункта на поверхность в диапазоне последовательного резонанса 40—60 *кгц* изменяется незначительно.

Отрезки кабеля длиной, кратной $\frac{\lambda}{4}$, могут повышать и снижать коэффициент передачи. Повышение его может быть вызвано четвертьволновым отрезком питающего кабеля от трансформатора до распределительного пункта. Такой отрезок играет роль трансформатора, согласующего низкое входное сопротивление сети распределительного пункта участка с высоким входным сопротивлением силового трансформатора. Снижение стабильности уровня сигнала на конце линии при передаче его по силовой сети вызывают все ответвления длиной $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{5}{4}\lambda$ и т. д. Это затухание тем больше, чем меньше коэффициент затухания и длина линии. Наибольшее затухание дают четвертьволновые отрезки линии. Так как обычно ответвления питают асинхронные двигатели и трансформаторы, которые в диапазоне 20—200 *кгц* имеют входное сопротивление от сотен ом до нескольких килоом, можно считать конец линии разомкнутым. Если представить шахтную силовую сеть состоящей из отрезков однородных линий, то для линии с ответвлением будет справедлива система уравнений

$$U_1 = U_3\left[\operatorname{ch}\gamma(l_1+l_2)+\frac{z_c}{z_0}\operatorname{sh}\gamma l_1\operatorname{ch}\gamma l_2\right]+J_3 z_c\left[\operatorname{sh}\gamma(l_1+l_2)+\right.$$
$$\left.+\frac{z_c}{z_0}\operatorname{sh}\gamma l_1\operatorname{sh}\gamma l_1\operatorname{sh}\gamma l_2\right]. \qquad (1)$$
$$J_1 = U_3\left[\frac{1}{z_c}\operatorname{sh}\gamma(l_1+l_2)+\frac{1}{z_0}\operatorname{ch}\gamma l_1\operatorname{ch}\gamma l_2\right]+J_3\left[\operatorname{ch}\gamma(l_1+l_2)+\right.$$
$$\left.+\frac{z_c}{z_0}\operatorname{ch}\gamma l_1\operatorname{sh}\gamma l_2\right],$$

где z_c — волновое сопротивление линии;
z_0 — сопротивление ответвления;
l_1 — длина отрезка от генератора с внутренним сопротивлением z_i до ответвления;
l_2 — длина отрезка от ответвления до нагрузки $z_{н_3}$;
l_3 — длина ответвления до нагрузки на конце $z_{н_4}$.

Выражения (1) можно переписать в виде

$$U_1 = U_3 A + J_3 B. \qquad (2)$$
$$J_1 = U_3 C + J_3 D.$$

Из второго уравнения системы (2) имеем

$$J_3 = \frac{J_1}{D} - \frac{U_3 C}{D}.$$

Подставляя выражение для J_3 в первое уравнение, имеем

$$U_1 = U_3\left(A - \frac{CB}{D}\right) + \frac{J_1 B}{D}.$$

Разделим левую и правую часть полученной формулы на U_1

$$1 = AK_u - \frac{CB}{D} K_u + \frac{B}{z_i D},$$

где $K_u = \frac{U_3}{U_1}$ — коэффициент передачи напряжения,

$$K_u = \frac{D - \frac{B}{z_i}}{AD - CB}. \qquad (3)$$

Примем $l_1 = l_2 = l_3 = \frac{\lambda}{4}$, $z_0 = z_c \operatorname{cth} \gamma l$ (разомкнутый конец $z_{н4} = \infty$). Тогда

$$A = D = \operatorname{ch} 2\gamma l + \frac{0{,}5 \operatorname{sh} 2\gamma l}{\operatorname{cth} \gamma l} = 1{,}5 \operatorname{ch} 2\gamma l - 0{,}5,$$

$$B = z_c\left(\operatorname{sh}^2 \gamma l + \frac{\operatorname{sh}^3 \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l}\right),$$

$$C = \frac{\operatorname{sh} 2\gamma l}{z_c} + \frac{\operatorname{ch} \gamma l \operatorname{sh} \gamma l}{z_c} = \frac{1{,}5 \operatorname{ch} 2\gamma l}{z_c}, \qquad (4)$$

$$AD = \frac{9}{4} \operatorname{ch}^2 2\gamma l - \frac{3}{2} \operatorname{ch} 2\gamma l + 0{,}25, \qquad (5)$$

$$BC = 1{,}5 \operatorname{sh}^2 2\gamma l + 3 \operatorname{sh}^4 \gamma l,$$
$$AD - BC = 0{,}75 \operatorname{ch}^2 2\gamma l + 1{,}75 - 1{,}5 \operatorname{ch} 2\gamma l - 3 \operatorname{sh}^4 \gamma l,$$
$$D - \frac{B}{z} = -\operatorname{sh} \gamma\gamma l + \frac{\operatorname{sh}^3 \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l} + 1{,}5 \operatorname{ch} 2\gamma l - 0{,}5. \qquad (6)$$

Отсюда коэффициент передачи напряжения при $z_{н_3} = z_c = z_i$

$$K_u = \frac{-\operatorname{sh} 2\gamma l + \frac{\operatorname{sh}^3 \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l} + 1{,}5 \operatorname{ch} 2\gamma l - 0{,}5}{0{,}75 \operatorname{ch}^2 \gamma l + 1{,}75 - 1{,}5 \operatorname{ch}^2 \gamma l - 3 \operatorname{sh}^4 \gamma l}. \qquad (7)$$

Из системы уравнений (1) можно определить коэффициент передачи по мощности от генератора к нагрузке $z_{н_3}$. Для этого умножаем попарно левые и правые части системы:

$$J_1 U_1 = (U_3 A + J_3 B)(U_3 C + J_3 D),$$
$$P_1 = U_3^2 AC + U_3 J_3 AD + U_3 J_3 BC + J^2 BD. \qquad (8)$$

Делим левую и правую часть на P_3:

$$\frac{1}{K_p} = \frac{P_1}{P_2} = AD + BC + z_{н_3} AC + \frac{1}{z_{н_3}} BD,$$
$$AD + BC = 2{,}25 \operatorname{sh}^2 2\gamma l + 1 + 3 \operatorname{sh}^4 \gamma l - 1{,}5 \operatorname{ch}^2 \gamma l,$$

$$AC = \frac{1,5}{z_c}(1,12\,\mathrm{sh}\,4\gamma l - 0,5\,\mathrm{sh}\,2\gamma l),$$

$$BD = z_c[0,75\,\mathrm{sh}^4\,\gamma l - 0,5\,\mathrm{sh}\,2\gamma l + 0,5\frac{\mathrm{sh}^3\,\gamma l}{\mathrm{ch}\,\gamma l}(3\,\mathrm{ch}\,2\gamma l - 1)].$$

Подставляя полученные выражения в формулу (3), находим при $z_i = z_{н_3} = z_c$

$$\frac{1}{K_p} = 2,25\,\mathrm{sh}^2\,2\gamma l + 1 + 3\,\mathrm{sh}^4\,\gamma l - 1,5\,\mathrm{ch}^2\,\gamma l + 2,45\,\mathrm{sh}\,4\gamma l -$$

$$- 1,25\,\mathrm{sh}^2\gamma l + 0,5\frac{8h^3\gamma l}{\mathrm{ch}\,\gamma l}(3\,\mathrm{ch}\,2\gamma l - 1). \qquad (9)$$

Количество четвертьволновых отрезков, укладывающихся в данной линии, обозначим через n. Тогда затухание, вносимое ответвлениями длиной, кратной четверти длины волны, определится из выражения

$$b_{отв} = \frac{1}{2}\left(\ln\frac{1}{K_p} - \frac{\pi n\beta}{\alpha}\right).$$

Окончательно получим

$$b_{отв} = \frac{1}{2}\ln\left\{2,25\,\mathrm{sh}^2\,\pi n\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) + 1 + 3\,\mathrm{sh}^4\frac{\pi n}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) -\right.$$

$$- 1,5\,\mathrm{ch}^2\frac{\pi n}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) + 2,45\,\mathrm{sh}\,2\pi n\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) - 1,25\,\mathrm{sh}^3\frac{\pi n}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) +$$

$$\left. + 0,5\frac{\mathrm{sh}^3\frac{\pi n}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right)}{\mathrm{ch}\frac{\pi n}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right)}\left[3\,\mathrm{sh}\,\pi n\left(\frac{\beta}{\alpha} + j\right) + 1\right]\right\} - \frac{\pi n\beta}{2\alpha}. \qquad (10)$$

В рассматриваемом случае, когда сопротивление генератора и сопротивление нагрузки согласованы с линией $z_l = z_c = z_{н_3}$, волновые процессы в тракте передачи от генератора к нагрузке отсутствуют и поэтому выражение (10) остается справедливым для участков линии l_1, l_2, имеющих ответвления длиной, кратной $\frac{\lambda}{4}$. Наибольшее затухание имеет линия с ответвлением, равным $\frac{\lambda}{4}$, для которого выражение (10) примет вид

$$b_{отв} = \frac{1}{2}\ln\left[2,25\,\mathrm{sh}^2\,2B_1 + 1 + 3\,\mathrm{ch}^4\,B_1 - 1,5\,\mathrm{sh}^2\,B_1 + 2,45\,\mathrm{sh}\,4B_1 +\right.$$

$$\left. + 1,25\,\mathrm{sh}\,2B_1 - 0,5\frac{\mathrm{ch}^3\,B_1}{hB_1}(3\,\mathrm{ch}\,2B_1 + 1)\right] - B_1, \qquad (11)$$

где

$$B_1 = \frac{\pi\beta}{2\alpha}.$$

Для исследования нестабильности уровней высокочастотных сигналов телемеханики при передаче их по шахтным силовым сетям напряжением 0,4 — 0,7/6 *кв* основной интерес представляют системы передачи информации фаза — фаза и три фазы — земля. Первая уже применяется в угольных шахтах для передачи высокочастотных сигналов, вторая может быть использована с индуктивным устройством присоединения, причем в некоторых случаях возникает необходимость в решении вопроса о выгодности той или иной схемы с точки зрения стабильности

канала. Это относится прежде всего к исследованию влияния четвертьволновых отрезков.

На основе выведенного выражения (10) нами построены кривые, характеризующие влияние четвертьволновых отрезков для двух наиболее распространенных на участках шахт типов кабелей (рис. 1). Кривые показывают, что четвертьволновые отрезки гибкого кабеля при схеме фаза — фаза приводят к увеличению затухания в тракте передачи на 13—14 *дб*. С ростом частоты влияние таких отрезков остается почти постоянным. Мало изменяется затухание при шунтировании отрезками бронированного кабеля, причем уровень сигнала уменьшается всего на 10—11 *дб*.

Схема три фазы — земля с гибким кабелем имеет бо́льший разброс затуханий от 6 *дб* на частоте 20 *кгц* до 11 *дб* на частоте 180 *кгц*. Отрезки бронированного кабеля по схеме три фазы — земля увеличивают затухание на 10—13 *дб*. Наименьшее затухание сигнала дают отрезки гибкого кабеля с линией фаза — земля (около 10 *дб* в диапазоне от 20 до 180 *кгц*).

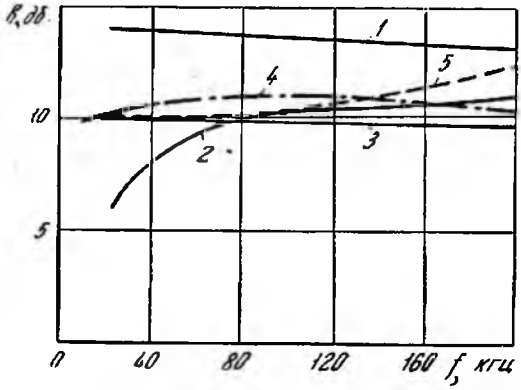


Рис. 1. Зависимость затухания сигнала от частоты при шунтировании четвертьволновым ответвлением:

1 — кабель типа ГРШ, схема фаза — фаза; *2* — кабель типа ГРШ, схема три фазы — земля; *3* — кабель типа ГРШ, схема фаза — земля; *4* — кабель типа СБ, схема фаза — фаза; *5* — кабель типа СБ, схема три фазы — земля.

Для экспериментальной проверки влияния четвертьволнового ответвления на замирание сигнала был выбран участок сети электроснабжения, содержащий два примерно одинаковых по длине ответвления — кабель, питающий комбайн К 52-III, и кабель, питающий привод конвейера в лаве. Частота их резонанса по длине $\frac{\lambda}{4}$ оказалась близкой к 80 *кгц*. К электрической сети выемочного участка по схеме фаза — фаза был включен передатчик мощностью 10 *вт*. На поверхности запись производилась самопишущим осциллографом Н-110 с выхода селективного вольтметра. Сигнал снимался с ввода подстанции напряжением 6 *кв* посредством индуктивного устройства присоединения. Осциллографирование осуществлялось в течение трех суток. Осциллограммы статистически обработаны. Результаты представлены на рис. 2 в виде гистограммы (сплошные линии). Ответвление уменьшает уровень сигнала на 7—11 *дб*, что достаточно хорошо согласуется с предварительными выводами. Для сравнения на том же рисунке представлена гистограмма, характеризующая колебание уровня на частоте 80 *кгц* при отсутствии четвертьволновых ответвлений в тракте передачи (штриховые линии).

Тот факт, что влияние четвертьволновых ответвлений в широком диапазоне частот изменяется мало, позволяет, собрав статистические данные об относительной частоте их появления в схемах электроснабжения участков на шахтах, судить об ожидаемой стабильности линии. С этой целью было отобрано 40 схем электроснабжения высокомеханизированных шахт Донецкого бассейна и проведен такой анализ для схем фаза — фаза и три фазы — земля. Результаты анализа представлены в виде гистрограммы на рис. 3.

Из гистограмм следует, что в диапазоне частот от 15 до 40 *кгц*

каналы имеют хорошую стабильность и схемы подсоединения почти равноценны. С ростом частоты количество четвертьволновых ответвлений увеличивается и каналы становятся все более нестабильными. Для

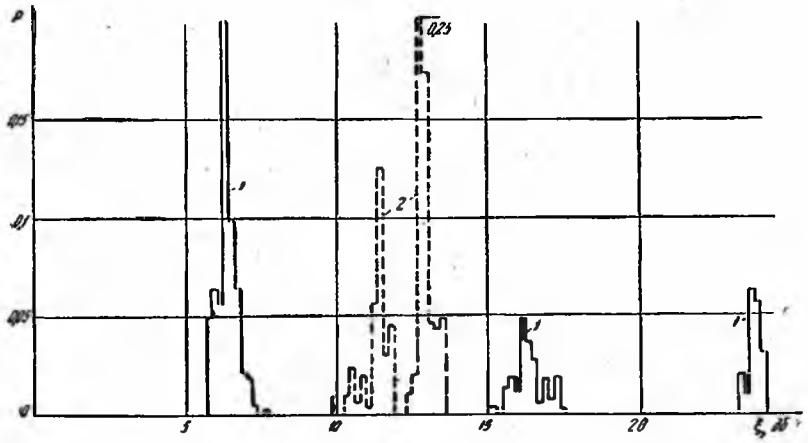


Рис. 2. Гистограммы уровня сигнала:
1 — при наличии двух четвертьволновых ответвлений на частоте 80 *кгц*; *2* — четвертьволновые ответвления на частоте 80 *кгц* отсутствуют.

системы три фазы — земля рост их числа происходит быстрее и на частоте 110—140 *кгц* достигает максимума.

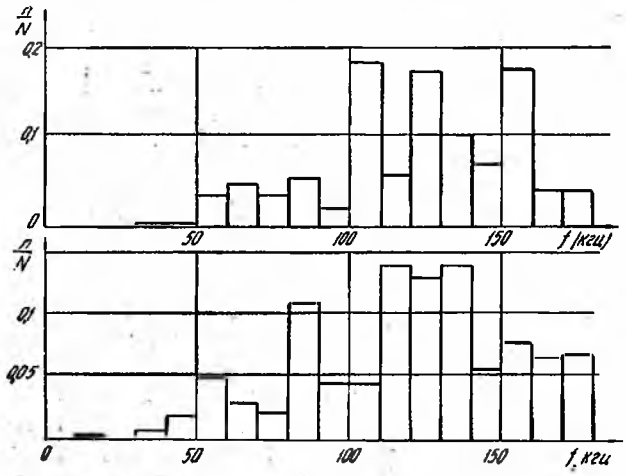


Рис. 3. Гистограммы частот появления в схемах электроснабжения четвертьволновых ответвлений:
1 — для схемы фаза — фаза; *2* — для схемы фаза — земля.

О СПОСОБЕ ВЫВОДА ДВИГАТЕЛЕЙ НА ЕСТЕСТВЕННУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВОРОТНЫМ СТАТОРОМ

И. Я. Иванченко, Е. П. Штепа, Е. К. Нечаев
Харьков

В работе [1] показано, что переключение сопротивлений, включенных последовательно в цепь роторов двух асинхронных двигателей, один из которых имеет поворотный статор, на соединение по схеме «тре-