

В.В. Коренский, канд. техн. наук

(Россия, Мирный, филиал Якутского государственного университета)

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Промежуточные ступени диагностики контактных сетей реализуют компенсационный метод контроля утечек тока наложенным гармоническим оперативным напряжением повышенной частоты, следовательно, при разработке экспериментального образца естественно поставить вопрос: какими должны быть параметры этого напряжения, чтобы разрабатываемое устройство по сложности, стоимости и эксплуатационным характеристикам было оптимизировано хотя бы в первом приближении. Определившись с формой гармонического сигнала число параметров оперативного напряжения уменьшаем до двух: частота и амплитуда. Причем определяющим параметром является частота. Что касается амплитуды, то она в соответствии с установившимися в измерительной технике подходами должна обеспечивать требуемое соотношение сигнал – помеха. Учитывая, что электрические помехи в контактных сетях представляют собой в основном высокочастотные составляющие питающего напряжения и тока, а спектры составляющих имеют тенденцию убывать с ростом частоты, то частоту оперативного напряжения желательно выбирать как можно выше. Тогда в силу уменьшения интенсивности помех разумное соотношение сигнал-помеха достигается при меньших значениях амплитуды оперативного напряжения, что уменьшает сложность и энергоемкость устройств защитного отключения. Однако с ростом частоты оперативного напряжения сильнее проявляются волновые свойства контактной сети, снижающие достоверность индикации травмоопасных утечек.

В результате анализа влияния контактной сети на эксплуатационные характеристики средств защитного отключения установлено, что если контактная сеть в системах защиты используется в режиме холостого хода по оперативному току, то для обеспечения требуемой стабильности чувствительности средств защитного отключения к перемещающимся точечным утечкам частоту оперативного напряжения следует выбирать исходя из допустимого значения мнимой части постоянной распространения $\alpha_{дон}$:

$$f_0 \leq \frac{v\alpha_{дон}}{2\pi} , \quad (1)$$

где $\alpha_{дон}$ определяется предельным значением коэффициента трансформации $K_{тр пред}$ и суммарной длиной защищаемого участка контактной сети, т.е.

$$\alpha = \frac{\arccos \sqrt{\frac{1}{K_{тр.пред.}}}}{l_{\Sigma}}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$f_0 = \frac{v}{2\pi l_{\Sigma}} \arccos \sqrt{\frac{1}{K_{тр.пред.}}}. \quad (3)$$

Предельное значение коэффициента трансформации $K_{тр.пред.}$ определяется требованиями, предъявляемыми к устройствам и системам защиты от поражения электрическим током и не должно превышать 1,5. Математическое ожидание суммарной длины защищаемого участка контактной сети по данным МакНИИ следует принимать равным (2 – 3) км. Что же касается скорости распространения электромагнитной волны в контактных сетях, входящей в выражения (1) и (3), то она в зависимости от первичных параметров сети может принимать значения, отличающиеся друг от друга почти в три раза. В магистральных выработках рудных шахт Кривбасса v изменяется от $v_{\min} = 0,7 \cdot 10^8$ м/с до $v_{\max} = 1,96 \cdot 10^8$ м/с, имея среднее значение $v_{cp} = 1,37 \cdot 10^8$ м/с и средневзвешенное с учетом длин выработок $v_{cp.выр.} = 1,46 \cdot 10^8$ м/с. В ортах заездах соответствующие значения; м/с: $v_{\min} = 0,67 \cdot 10^8$; $v_{\max} = 1,65 \cdot 10^8$ м/с; $v_{cp.} = 1,06 \cdot 10^8$; $v_{cp.выр.} = 1,01 \cdot 10^8$. Усредненное по всем выработкам, с учётом процентного содержания их длин, значение скорости распространения электромагнитных волн в шахтных контактных сетях составляет $1,32 \cdot 10^8$ м/с.

Таким образом, значение частоты оперативного напряжения, при котором достигается необходимая стабильность эксплуатационных параметров средств защитного отключения, когда контактная сеть пребывает в режиме холостого хода по оперативному току, находится в пределах (1,24 – 3,6) кГц и имеет средневзвешенное значение 2,7 кГц. Полученные данные в какой-то степени поясняют причину неудачных попыток внедрения частотных защит типа РКС, АЧЗ, РУКС, в которых частота оперативного напряжения составляет соответственно (5,4; 10; 14) кГц, что существенно больше допустимых значений, приведенных выше. Здесь же следует заметить, что указанные типы защит в рекомендуемом частотном диапазоне не могут быть задействованы, так как это потребовало бы недопустимого увеличения габаритов электровозных заградителей.

При использовании контактных сетей в рациональном режиме, допустимое значение частоты оперативного напряжения определяется не суммарной длиной защищаемого участка контактной сети, а расстоянием до точки контактной сети максимально удаленной от тяговой подстанции, что в среднем в 2,5 раза меньше. Тогда диапазон рекомендуемых частот находится в пределах (3,1 – 9) кГц, а средневзвешенное значение составляет 6,125 кГц.

Кроме того, при реализации компенсационного метода утечек тока, не

требующего заграждения силовых цепей электровозов по оперативному току, при выборе частоты оперативного напряжения следует учитывать влияние входного сопротивления контактной сети (в особенности его изменений) на работу блока компенсации и его взаимодействие с измерительным блоком.

Контактная сеть при отсутствии электровозов представляет собой по входным зажимам двухполюсник с активно-емкостным импедансом. Активная составляющая входной проводимости определяется в основном только несовершенством изоляции контактной сети и даже в наилучших вариантах соизмерима с пороговой проводимостью утечки средств защитного отключения. Емкостная же составляющая в контактных сетях средней конфигурации превосходит по модулю пороговую проводимость утечки на один-два порядка. Появление электровоза, представляющего собой активно-индуктивный двухполюсник, существенно изменяет входное сопротивление контактной сети.

Из теории цепей известно [1], что входное сопротивление линии, замкнутой на комплексное сопротивление $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$,

$$\underline{Z}_{ex} = \underline{Z}_c \frac{R_2 \cos \alpha l + j(x_2 \cos \alpha l + Z_c \sin \alpha l)}{Z_c \cos \alpha l - x_2 \sin \alpha l + jR_2 \sin \alpha l}. \quad (4)$$

Раскладывая приведенное выражение на действительную и мнимую части, получим:

$$R_{ex} = \frac{Z_c^2 R_2}{(Z_c \cos \alpha l - x_2 \sin \alpha l)^2 + jR_2^2 \sin^2 \alpha l}; \quad (5)$$

$$X_{ex} = Z_c \frac{Z_c X_2 \cos 2\alpha l - 0,5(R_2^2 + x_2^2 - Z_c^2) \sin 2\alpha l}{(Z_c \cos \alpha l - x_2 \sin \alpha l)^2 + R_2^2 \sin^2 \alpha l}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае под комплексным сопротивлением, нагружающим линию, следует понимать сопротивление электровоза, включенное параллельно с отрезком линии, находящегося за электровозом и пребывающего в режиме холостого хода по оперативному напряжению, т.е.

$$Z_2 = \frac{Z_3 [-jZ_c \operatorname{ctg} \alpha (l-x)]}{Z_3 - jZ_c \operatorname{ctg} \alpha (l-x)} \quad (7)$$

или с учетом, что $Z_3 = R_3 + jX_3$

$$Z_2 = \frac{(R_3 + jX_3) jZ_c \operatorname{ctg} \alpha (l-x)}{R_3 + jX_3 - jZ_c \operatorname{ctg} \alpha (l-x)}. \quad (8)$$

Что касается входного сопротивления отрезка линии от места нахождения электровоза и до конца защищаемого ответвления, то при принятых ограниче-

ниях на частоту оперативного напряжения известно, что оно всегда емкостного характера и принимает значения от 250 Ом и выше. Сопротивление электровоза по оперативному току зависит от его энергетического режима в силу изменения индуктивности двигателей при их подмагничивании тяговым током. Причем изменяется не только реактивная составляющая $X_9 = j\omega L_9$, что очевидно, при $L_9 = var$, но и активная в силу известной зависимости потерь в сердечнике от амплитуды магнитной индукции:

$$P_\Gamma = \sigma_\Gamma f B_m G; \quad P_B = \sigma_B f^2 B_m^2 G \gamma,$$

где P_Γ и P_B – потери на гистерезис и вихревые токи соответственно; f – частота; B_m – амплитуда магнитной индукции; G – масса сердечника; γ – удельная проводимость; σ_Γ – гистерезисный коэффициент; σ_B – коэффициент вихревых токов.

При использовании контактной сети в режиме короткого замыкания по оперативному току ее входное сопротивление, при наличии на защищаемом участке электровоза, является всегда активно-индуктивным, так как сама сеть представляет собой двухполюсник с очень большим активным входным сопротивлением. Выражения (4) – (6) остаются справедливыми при условии, что Z_2 , входящее в них, будет определяться не по выражениям (7) и (8), а с учетом изменения исходного режима контактной сети по оперативному току. Действительно, в данном случае Z_2 представляет собой параллельное соединение собственного сопротивления электровоза и входного сопротивления отрезка сети, находящегося за электровозом и нагруженного концевой индуктивностью, дополняющей электрическую длину отрезка до $\frac{\lambda}{4}$.

$$Z_{ex} = \frac{jZ_9 Z_c \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{\lambda}{4} - X \right)}{Z_9 + jZ_c \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{\lambda}{4} - X \right)}. \quad (9)$$

Из анализа равенства (9) следует, что входное сопротивление контактной сети будет наименьшим, если электровоз находится непосредственно у тяговой подстанции ($x = 0$). В этом случае $Z_{ex} = Z_9$ и определяется схемой соединения тяговых двигателей и энергетическим режимом электровоза. По мере перемещения электровоза вдоль контактной сети ($0 < X < l$) его входное сопротивление увеличивается и при $x \rightarrow \frac{\lambda}{8}$ стремится к Z_c .

В зависимости от места нахождения электровоза, его энергетического режима и конфигурации контактной сети ее входное сопротивление может носить как емкостный, так и индуктивный характер при изменении модуля в дос-

точно широком диапазоне значений.

Что же касается статистических характеристик этих изменений, как во времени, так и по модулю, то их аналитическое определение при реальных условиях эксплуатации не представляется возможным.

Поэтому в настоящей работе для анализа изменений входного сопротивления контактной сети применен метод экспериментальных исследований вариаций интересующего параметра в реальных условиях эксплуатации.

В ходе экспериментов [2], при одновременно работающих двух – четырех электровозов, контактная сеть зондировалась оперативным напряжением, амплитуда которого оставалась неизменной, а частота циклически изменилась (качалась) в пределах 3 – 13 кГц. При отсутствии зондирующего напряжения экспериментальная установка позволяет регистрировать спектры питающего напряжения и тягового тока.

Всего в ходе экспериментов зарегистрировано более двухсот тысяч значений гармонических составляющих выпрямленного напряжения, тягового тока и составляющих входного сопротивления контактной сети, что достаточно для статистической обработки. Для обработки такого количества данных применены методы машинной обработки информации. Они реализованы с помощью микроЭВМ, анализатора спектра СКЧ-56 и нестандартных согласующих устройств (фильтра высоких частот, амплитудного детектора, аналого-цифрового преобразователя и блока синхронизации), специально разработанных для этих целей.

Из результатов экспериментов следует, что модуль входного сопротивления контактной сети принимает максимальные значения в интервале частот 4,5 – 6,1 кГц. Следовательно, частоту оперативного напряжения следует выбирать внутри этого интервала частот, так как чем выше входное сопротивление контактной сети в реальных режимах эксплуатации, тем легче его компенсировать в устройствах контроля утечек тока [3].

Что касается выбора амплитуды оперативного напряжения, то здесь правомерны следующие соображения. Амплитуда гармонических составляющих тока в оговоренном выше интервале частот по результатам проведенных экспериментов монотонно убывает, незначительно отличаясь на границах интервала от 10^{-3} А.

Для нормальной работы аппаратуры контроля утечек тока в соответствии с требованиями ГОСТ 26.205-88 "Комплексы и устройства телемеханики. Общие технические условия" значение амплитуды оперативного тока, вызванного пороговым значением сопротивления утечки, должно, по крайней мере, в 6 раз превышать действующее значение помехи в полосе пропускания измерительных устройств. Таким образом, $I_{om} \geq 6 \cdot 10^{-3}$ А. При применении фазочувствительных измерительных устройств с учетом того, что начальная фаза помехи относительно оперативного напряжения с равной вероятностью может принимать любые значения от 0 до 2π и, учитывая, что среднее значение гармонической функции за половину периода равно 0,63 от максимального, оправдано рекомендовать следующее значение амплитуды оперативного тока:

$I_{om} \geq 3,8 \cdot 10^{-3}$ А. При значении сопротивления пороговой утечки 6000 Ом, что определено "Основными техническими требованиями к системам защиты от токов утечки для шахтных контактных сетей", указанное значение тока может быть обеспечено при действующем значении оперативного напряжения не менее 16 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч. 3. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 296 с.
2. Трач А.Н. Исследование и разработка аппаратуры контроля утечек тока в контактных сетях на открытых горных работах.: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: 1972. – 23 с.
3. Коренский В.В., Юрченко А.В. Направление развития УЗО в электровозной откатке. //Горн. информ.– аналит. бюлл. МГГУ. – 2004. – № 11. – С. 283.