

Определение степени усиления гармоник тока электровозов в тяговых сетях

Канд. техн. наук И. В. ПАВЛОВ и инж. Л. И. ЕВМИНОВ

Москва

Тяговые сети оказывают значительное влияние на линии связи, проложенные вдоль электрифицированных железных дорог. Это влияние обусловлено содержанием в токе электровозов высших гармонических составляющих, которые, резонируя, усиливаются в тяговой сети, представляющей линию с распределенными индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением.

В исследованиях по оценке усиления высших гармонических тока электровозов с учетом распределенных параметров тяговой сети [Л. 1—4] рассматривается усиление гармоник тока в тяговой сети при нагрузке ее одним электровозом, который, являясь генератором гармоник [Л. 5], имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление. Вследствие того, что помехи, индуктированные в линии связи, в основном определяются резонансными явлениями в тяговой сети, в ЦНИИ МПС проведен анализ степени усиления гармоник тока электровоза с оценкой правомерности допущений, принятых в [Л. 1—3].

Одним из показателей, характеризующих волновые процессы в тяговой сети, является коэффициент усиления K_{yc} , определяющий во сколько раз гармоника n тока у тяговой подстанции больше, чем у электровоза:

$$K_{yc} = \left| \frac{i_2}{i_1} \right|,$$

где i_2 — гармоника n тока вблизи тяговой подстанции, a ; i_1 — гармоника n тока электровоза, a .

Согласно [Л. 1] модуль коэффициента усиления гармоник n тока электровоза

$$K_{yc} = \frac{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{b_{l-l_0}^2}{2} \right) \cos a_{l-l_0} \right]^2 + \left[b_{l-l_0} \sin a_{l-l_0} \right]^2}}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{b_l^2}{2} + \frac{R}{|Z_B|} b_l \right) \cos a_l - \left(1 + \frac{b_l^2}{2} \right) \frac{X}{|Z_B|} \sin a_l \right]^2 + \left[b_l - A \left(1 + \frac{b_l^2}{2} \right) \right]^2 \sin^2 a_l + B^2 b_l^2 \cos^2 a_l}} \quad (1)$$

где l_0 — расстояние от тяговой подстанции до электровоза, км (рис. 1); l — длина фидерной зоны, км; Z_B — волновое сопротивление тяговой сети, ом; причем $Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0} - j \frac{r_0}{\omega C_0}}$ при

$g_0 = 0$; R , X — активное и индуктивное сопротивления в омах трансформатора для n -й гармоники тока;

коэффициент фазы a и коэффициент затухания b находится из выражений:

$$a_l = \sqrt{\frac{1}{2} (\omega C_0 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} + \omega^2 L_0 C_0) l}, \text{ рад};$$

$$b_l = \sqrt{\frac{1}{2} (\omega C_0 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} - \omega^2 L_0 C_0) l}, \text{ непер}.$$

здесь r_0 , L_0 , g_0 , C_0 — соответственно активное сопротивление (ом), индуктивность (гн), проводимость (1/ом) и емкость (ф) одного километра тяговой сети для n -й гармоники тока.

При получении формулы (1) гиперболические функции заменены степенными рядами, а поскольку коэффициент затухания для тяговой сети не превышает значения 0,1, ограничились при разложении $\text{sh } b$ одним членом ряда, а при разложении $\text{ch } b$ двумя членами ряда: $\text{sh } b = b$; $\text{ch } b = 1 + b^2/2$. Кроме того, принято, что $Z_B = |Z_B|$.

Для случая, когда электровоз находится в конце фидерной зоны, т. е. $l = l_0$, уравнение (1) примет вид [Л. 1 и 2] ($a = a_l$, $b = b_l$):

$$K_{yc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{R}{|Z_B|} b + \frac{b^2}{2} \right) \cos a - \frac{X}{|Z_B|} \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \sin a \right]^2 + \left[b + \frac{R}{|Z_B|} \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \right]^2 \sin^2 a + \frac{X}{|Z_B|} b \cos a}} \quad (2)$$

Анализ формул (1) и (2) показывает, что проведенная замена гиперболических функций первыми членами степенных рядов не приводит к заметной погрешности в вычислениях K_{yc} . Однако допущение, что $Z_B = |Z_B|$, вызывает значительную ошибку. Учитывая, что $Z_B = R_B - jX_B$, из (1) получим формулу, в которой исключена погрешность, вносимая этим допущением:

$$K_{yc} = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{b_{l-l_0}^2}{2} \right)^2 \cos^2 a_{l-l_0} + b_{l-l_0}^2 \sin^2 a_{l-l_0}}}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{b_l^2}{2} - Ab_l \right) \cos a_l - B \left(1 + \frac{b_l^2}{2} \right) \sin a_l \right]^2 + \left[b_l - A \left(1 + \frac{b_l^2}{2} \right) \right]^2 \sin^2 a_l + B^2 b_l^2 \cos^2 a_l}} \quad (3)$$

где

$$A = \frac{XX_B - RR_B}{R_B^2 + X_B^2}; \quad B = \frac{R_B X + R X_B}{R_B^2 + X_B^2}.$$

Приняв в формуле (3) $l = l_0$ (электровоз в конце фидерной зоны), получим:

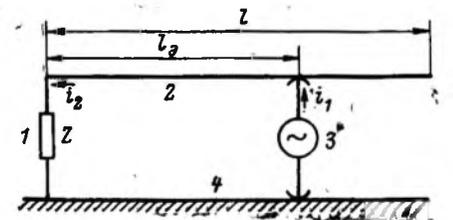
$$K_{yc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{b^2}{2} - Ab \right) \cos a - B \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \sin a \right]^2 + \left[b - A \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \right]^2 \sin^2 a + B^2 b^2 \cos^2 a}} \quad (4)$$

Необходимость введения в расчетные формулы (3) и (4) величин R_B и X_B обусловлена тем, что выражения в квадратных скобках этих формул представляют собой разность близких величин. Как известно, предельная относительная погрешность при вычислении разности близких величин может достигать десятков и даже сотен процентов при предельной относительной погрешности уменьшаемого и вычитаемого в несколько процентов, причем величина ошибки зависит от величины искомого значения.

По указанной причине во избежание значительной ошибки инженерные расчеты коэффициента усиления по (3) и (4) сле-

Рис. 1. Схема замещения тяговой сети при одном электровозе.

1 — тяговая подстанция и линия электропередачи (ВЛ); 2 — контактная сеть; 3 — электровоз; 4 — рельсы.



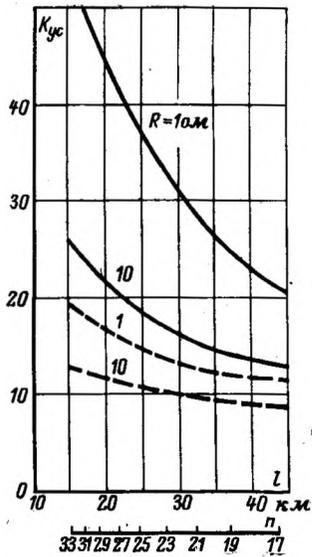


Рис. 2. Зависимость максимальных значений коэффициентов усиления K_{yc} от длины фидерной зоны l при различных значениях активного сопротивления R трансформатора тяговой подстанции и ВЛ.

— по рекомендуемым формулам (4) и (5);
- - - по формуле (2).

небрежение аргументом величины Z_b вызывает существенное снижение K_{yc} , а значительное занижение значения R ведет к резкому возрастанию K_{yc} .

Таким образом, причиной совпадения результатов расчетов в [Л. 1 и 2] с экспериментальными данными [Л. 2 и 4] является не учет реальных параметров трансформаторов тяговой подстанции и питающей ВЛ, а предварительно принятые допущения при математическом анализе. На основании исследований для вычисления модуля максимального K_{yc} может быть рекомендовано следующее выражение:

$$K_{yc} = \frac{1}{\left[b - A \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \right] \sin a + Bb \cos a} \quad (5)$$

Для вычисления K_{yc} в [Л. 1] при известном порядке резонирующей гармоники рекомендуется упрощенная формула, полученная из формулы (2):

$$K_{yc} = \frac{1}{\left[b + \frac{R}{|Z_b|} \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \right] \sin a + \frac{x}{|Z_b|} b \cos a} \quad (6)$$

Анализом установлено, что результаты расчетов K_{yc} по формулам (2) и (6) для резонирующей гармоники одинаковы, т. е., как показано выше, они меньше действительных в 1,5—2,5 раза.

Максимальное значение K_{yc} в [Л. 3] рекомендуется вычислять по формуле:

$$K_{yc} = \frac{1}{B \left(1 + \frac{R}{Z_b} \right)} \quad (7)$$

Исследования показали, что при использовании формулы (7) очень слабо передается важная зависимость K_{yc} от величины R . Поэтому значения K_{yc} , рассчитанные по (7) при $R = 1 \text{ ом}$, в 1,4—1,8 раза больше, чем по формуле (5). При $R = 10 \text{ ом}$ значения K_{yc} , полученные по (7), отличаются на 15—20% от действительных. Однако при больших значениях R результаты расчета коэффициента усиления по (5) и (7) различаются в несколько раз.

дует производить на ЦВМ, оперируя не менее, чем шестью значащими цифрами.

На рис. 2 представлены огибающие максимальных значений коэффициента усиления, полученные в результате расчетов по (2) и (4) при исходных данных, взятых из [Л. 1] (см. таблицу), и при $X = 10 \text{ ом}$.

Из рис. 2 видно, что при $R = 1 \text{ ом}$ (как это принято в [Л. 1 и 2]) допущение $Z_b = |Z_b|$ ведет к ошибке, приводящей к преуменьшению значения коэффициента усиления примерно в 2—2,5 раза.

Исследования [Л. 6] показали, что величина R с учетом активной составляющей входного сопротивления ВЛ примерно на порядок выше, чем это принято в [Л. 1 и 2]. Сравнительно высокое значение R является одной из основных причин, ограничивающих степень усиления гармоник тока в тяговых сетях, что наглядно иллюстрируют кривые на рис. 2, полученные при $R = 10 \text{ ом}$. Следует, однако, отметить, что и в этих условиях недопустимо пренебрежение аргументом Z_b , так как это приводит к занижению K_{yc} примерно в 1,5—2 раза.

Измерения на действующих электрифицированных участках показывают, что значения K_{yc} достигают 10—20 [Л. 2 и 4]. Пре-

n	L_0 , мкг/км	C_0 , нФ/км	r_0 , ом/км	l , км	$ Z_b $, ом	R_b , ом	X_b , ом
17	1,105	16,6	0,783	43,5	258,0	257,434	—17,0782
21	1,088	16,6	0,896	32,0	256,0	255,503	—15,9470
29	1,066	16,6	1,060	18,8	253,4	253,024	—13,8082

В [Л. 1 и 2] эквивалентный влияющий ток для n -й гармоники определяется по выражению:

$$|i_{cp}| = |i_1| K_{yc} K_{cp},$$

где K_{cp} — коэффициент усреднения влияющего тока вдоль фидерной зоны.

Значение коэффициента усреднения в [Л. 1] рекомендуется вычислять также при допущении, что $Z_b = |Z_b|$, по выражению:

$$K_{cp} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \left| \frac{R}{|Z_b|} \left[\left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \cos a - 1 \right] - \frac{X}{|Z_b|} b \sin a + b \cos a + j \left\{ \left(1 + \frac{b^2}{2} + \frac{R}{|Z_b|} b \right) \sin a + \frac{X}{|Z_b|} \left[\left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \cos a - 1 \right] \right\} \right| \quad (8)$$

С учетом аргумента Z_b и после подстановки соответствующих величин получим:

$$K_{cp} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \left| A \left[1 - \left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \cos a \right] + Bb \sin a + b \cos a + j \left\{ B \left[\left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \cos a - 1 \right] + \left(1 + \frac{b^2}{2} - Ab \right) \sin a \right\} \right| \quad (9)$$

Результаты анализа формулы (9) позволяют рекомендовать для расчета K_{cp} при известном порядке резонирующей гармоники упрощенное выражение:

$$K_{cp} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \left\{ B \left[\left(1 + \frac{b^2}{2} \right) \cos a - 1 \right] + \left(1 + \frac{b^2}{2} - Ab \right) \sin a \right\} \quad (10)$$

Сравнение результатов расчетов по формулам (8) и (9) показало, что при резонирующих частотах они практически одинаковы, но на значительно больших частотах различие достигает 20%, поэтому инженерные расчеты лучше проводить по выражениям (9) и (10).

Таким образом, результаты разработок [Л. 1—3] требуют корректировки как в отношении установления степени усиления гармоник тока электровозов, необходимого для расчетов помех в линиях связи, индуктированных тяговой сетью переменного тока, так и при определении эффективности демфирующих устройств, которые могут применяться в ряде случаев для подавления резонансных явлений в тяговой сети.

ЛИТЕРАТУРА

- Лившиц В. Н. и Матвеева Н. К., К вопросу об учете резонансных явлений в контактной сети при работе выпрямительных электровозов, «Электричество», 1959, № 8.
- Карякин Р. Н., Резонанс в тяговых сетях и его демпфирование. Изд-во «Высшая школа», 1961.
- Jötten R., Lebrecht L., Die Primärströme der Stromrichterlokomotive in Fahrleitungsnetz und Drehstromnetz, «ETZ», 1956, Ausgabe A., № 7.
- Buckel R., Probleme der Beeinflussung im Bereich elektrischen Bahnen, «El. Bahnen», H. 9, 1964.
- Костенко М. П. и др., Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками, Изд. АН СССР, 1946.
- Павлов И. В., Зависимость волновых процессов в тяговой сети от параметров линий электропередачи, «Электричество», 1971, № 6.