

Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская, канд-ты техн. наук, В.В. Винокуров
Украина, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ТЯГОВОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТА С ИНДУКЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

Введение.

Несмотря на большой объем конвейеризации, проведенный на угольных шахтах, рельсовый транспорт занимает лидирующее положение в транспортировании породы, вспомогательных материалов и людей. Поэтому применение бесконтактных электровозов повышенной частоты, особенно на грузонапряженных направлениях, является перспективным, поскольку позволяет повысить безопасность процесса добычи и транспортировки угля благодаря безыскровому токосъему.

Постановка проблемы.

Важным элементом рассматриваемого транспорта, обеспечивающим направленную передачу энергии электровозу, является тяговая сеть, параметры режимов которой должны соответствовать требованиям области применения. Однако все полученные до последнего времени решения сводились к частным случаям с упрощенным представлением элементов транспорта [1].

Анализ результатов последних исследований.

В работе [2] выделены основные задачи моделирования режимов транспорта с индуктивной передачей энергии. Очевидно, что возможны различные подходы к решению выдвинутых задач. Одним из вариантов моделирования тяговой сети в режиме пуска показан в [3]. Нагруженный режим тяговой сети исследован недостаточно, что обусловлено сложностью математического описания включения в работающую в квазиустановившемся режиме тяговую сеть (нестационарной) нагрузки [4].

Цель и задачи исследований.

Настоящая работа призвана дать подробный анализ разработанных моделей и обосновать их дальнейшее развитие в целях обеспечения эффективной работы транспорта для достижения необходимой точности расчета параметров режима сети.

Изложение основного материала

Аналитические выражения, описывающие параметры установившегося режима тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии, приведенные в [1], получены на основании решения дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами и периодически включенными неоднородностями, каковыми представлены конденсаторы продольной компенсации. Они учитывают параметры линии и конденсаторов, а также места их установки и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U(x) &= z_B I_0 \frac{sh \gamma \cdot (l-x)}{ch \gamma l} - \frac{jch \gamma x}{\omega \cdot ch \gamma l} \sum_{k=1}^n \frac{I(x_k)}{C_K} ch \gamma (l-x_k) + \frac{j}{\omega} \sum_{k=1}^n \frac{I(x_k)}{C_K} ch \gamma (x-x_k) \cdot 1(x-x_k); \\ I(x) &= I_0 \frac{ch \gamma \cdot (l-x)}{ch \gamma l} - \frac{jsh \gamma x}{z_B \omega \cdot ch \gamma l} \sum_{k=1}^n \frac{I(x_k)}{C_K} ch \gamma (l-x_k) + \frac{j}{\omega z_B} \sum_{k=1}^n \frac{I(x_k)}{C_K} sh \gamma (x-x_k) \cdot 1(x-x_k), \end{aligned} \quad (1)$$

где m – число компенсационных пунктов, на участке сети от ее начала до рассматриваемого сечения; k – номер компенсирующего конденсатора; n – общее число компенсационных пунктов тяговой сети; $I(x)$, $U(x)$ – ток и напряжение на компенсирующем конденсаторе; I_0 – ток в начале линии; ω – угловая частота; C_K – емкость конденсатора продольной компенсации; $1(x-x_k)$ – единичная функция:

$$1(x-x_k) = \begin{cases} 0 & x < x_k, \\ 1 & x > x_k. \end{cases}$$

Численные решения этих уравнений выполнены на ЭВМ с использованием метода итераций. Учитывая, что токи и напряжения в различных сечениях линии являются комплексными величинами, проверку условия сходимости решения необходимо осуществлять как для действительной, так и мнимой

частей корней уравнений. При этом вследствие высокой добротности тяговой линии ($Q \approx 80$) и нахождения резонансных точек компенсируемых участков примерно посередине участка, не удастся достичь высокой точности расчета и поэтому приходится увеличивать погрешность решения, т.к. в противном случае процесс решения может носить расходящийся характер. Указанный недостаток устранен путем применения метода эквивалентных преобразований схемы замещения тяговой сети.

Рассмотрим тяговую сеть транспорта повышенной частоты с индуктивной передачей энергии (рис. 1).

Тяговая сеть, изображенная на рисунке, не является симметричной, т.к. провода, подключенные к выходным зажимам 1 и 2 преобразователя частоты, при монтаже могут прокладываться в различных выработках. Поскольку тяговая сеть является короткозамкнутой напряжением в конце линии равно нулю $U(l) = 0$. Следова-

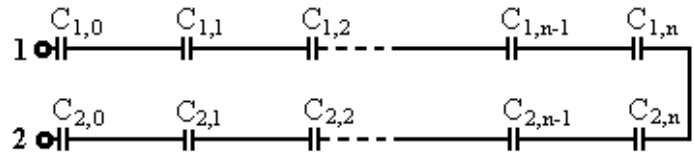


Рис. 1. Схема тяговой сети

тельно, при замыкании этой точки на землю параметры режимов в различных сечениях сети не изменятся, поэтому можно рассматривать режимы работы каждого провода с присущими ему удельными параметрами и известными граничными условиями $I(0) = I_0, U(l) = 0$. В этом случае входное сопротивление участка сети от последнего конденсатора C_n до точки короткого замыкания описывается выражением $Z_{\text{вх кз}} = Z_0 \text{th}(\gamma \cdot l_{\text{кз}})$, где Z_0 – волновое сопротивление линии; γ – коэффициент распространения; $l_{\text{кз}}$ – место короткого замыкания (индексы рассматриваемого провода могут быть опущены). С учетом рассмотрения целостной структуры тяговой сети $l_{\text{кз}} = 0,5 \cdot l_{\text{к}}$, где $l_{\text{к}}$ – шаг компенсации.

Таким образом, схема замещения приобретает вид (рис. 2)

В рассматриваемой эквивалентной схеме замещения можно считать, что $X_{C_n} + Z_{\text{вх кз}}$ являются нагрузкой последнего участка сети, т.е. полагается,

что конденсатор включен в конце участка. Тогда $Z_{\text{ин}} = 1/(\omega \cdot C_n) + Z_{\text{вх кз}}$ (рис. 3), т.е. сопротивление нагрузки последнего участка может быть определено исходя из конфигурации сети и значений выбранных элементов. Зная сопротивление нагрузки последнего (n-го) участка несложно определить его входное сопротивление, учитывая, что его длина составляет $l - x_n$. При этом преобразуем, известное выражение для определения входного сопротивления [2] и представим его в виде:

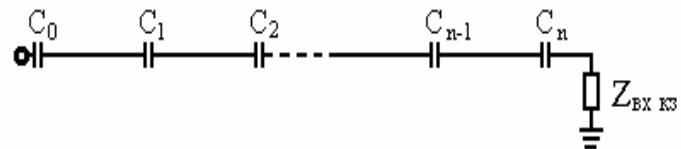


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения

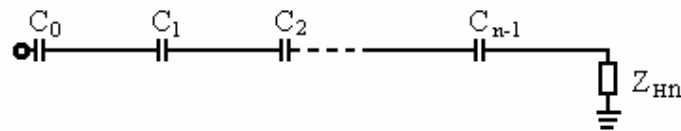


Рис. 3. Преобразование схемы замещения

$$Z_{\text{вх}} = Z_B \frac{Z_H + Z_B \text{th} \gamma(l - x_n)}{Z_B + Z_H \text{th} \gamma(l - x_n)}, \quad (2)$$

где $Z_H = Z_{\text{ин}} = 1/(\omega \cdot C_n) + Z_{\text{вх кз}}$ – сопротивление нагрузки последнего участка.

Далее, действуя аналогично, можно определить входное сопротивление предпоследнего участка с учетом того, что его длина равна $x_n - x_{n-1}$, и так далее пока не будет достигнуто начало линии.

Зная входные сопротивления компенсированных участков и ток в начале тяговой сети, можно определить токи и напряжения в любом сечении ненагруженной сети [1]:

$$\begin{aligned} U(x) &= U_H \text{ch} \gamma - I_H Z_B \text{sh} \gamma; \\ I(x) &= I_H \text{ch} \gamma - U_H \text{sh} \gamma / Z_B, \end{aligned} \quad (3)$$

где U_H, I_H – напряжение и ток в начале линии соответственно.

Емкости компенсирующих конденсаторов выбираются из условий получения режима резонанса напряжений на компенсируемых участках, с учетом требований безопасности, а емкости конденсаторов в начале тяговой сети – из требований, предъявляемых тяговым преобразователем частоты к сопротивлению его нагрузки.

Таким образом, при первом проходе, двигаясь от конца линии к ее началу, определяются входные сопротивления компенсированных участков тяговой сети и значения нагрузки этих участков. При втором проходе и обратном движении рассчитываются значения токов и напряжений в интересующих сечениях тяговой сети. Шаг расчета может быть произвольным, но не превышать значения шага компенсации.

Такой метод расчета позволяет определить режимные параметры тяговой сети при переменных удельных параметрах, что невозможно выполнить, используя метод итераций. Это также позволяет учесть влияние вводов в КП, различные сечения выработок по длине маршрута и пр. Кроме того, применение такого метода снижает погрешность расчета.

Тем не менее, обладая отмеченными достоинствами, расчет параметров режима сети подобным методом не позволяет учесть их изменения в динамике. Решение этой проблемы получено на основе описания процессов в тяговой сети в виде классической системы "телеграфных уравнений", дополненной элементами, которые учитывают особенности объекта [2]. Эти уравнения могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i + F_1(x, t); \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases} \quad (4)$$

где $F_1(x, t)$ – функция, которая отражает для каждого сечения тяговой сети особенности в виде включенных неоднородностей; L_0 , R_0 , C_0 – первичные распределенные параметры линии.

Преобразование путем разделения переменных системы уравнений (4) сводит её к дифференциальным уравнениям в частных производных 2-го порядка относительно напряжения или тока. Такие уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + R_0 C_0 \frac{\partial u}{\partial t} - F_1'(x, t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + R_0 C_0 \frac{\partial i}{\partial t} + F_1'(x, t). \quad (6)$$

Подобные уравнения относятся к гиперболическому типу и решаются численными методами. Выбор метода напрямую зависит от вида функции $F_1(x, t)$.

В работах [2-4] функция $F_1(x, t)$ представлена с использованием обобщенной функции $\delta(x - x_k)$. Это позволило описать процессы в тяговой сети, имеющей сосредоточенные неоднородности в виде последовательно включенных конденсаторов продольной компенсации. Решение уравнения (5) получено методом прогонки, который обладает устойчивостью при наличии разрывных коэффициентов, а также дает погрешность в допустимых пределах при заданной постановке задачи. Однако описанное решение справедливо лишь для ненагруженной тяговой сети, т.е. позволяет рассмотреть процессы только при пуске тягового преобразователя частоты и холостом ходе линии. Появление нагрузки в виде вносимого от электровоза сопротивления обуславливает введение новой функции $F_2(x, t)$, которая описывает процессы в нагруженной тяговой сети.

В [4] показано, что такая функция может быть сформирована с помощью разрывного коэффициента $\delta(x - x_{вн})$, аналогичного тому, как учтено в [2, 4] влияние конденсаторов продольной компенсации. Подобный подход позволил смоделировать значения параметров режима тяговой сети при движении электровоза в начале маршрута [2], адекватность которых подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными. При этом погрешность составила 5%. Однако использование такой модели при рассмотрении электровоза в середине и конце маршрута показало, что с удалением от тяговой подстанции погрешность расчета увеличивается до недопустимых значений. Последнее свидетельствует о необходимости внесения корректив в части учета влияния вносимого электровозом сопротивления.

Выводы

Таким образом, при определении параметров режима тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии положительный результат достигается благодаря использованию обобщенных функций для описания неоднородностей в ненагруженной линии, как в установившемся, так и в переходных режимах.

Применение обобщенных функций при моделировании нагрузки от электровозов дает приемлемые результаты с точки зрения точности лишь для движения электровоза в начале маршрута.

Из вышеизложенного следует, что дальнейшие задачи моделирования параметров режима тяговой сети связаны с формированием моделей, которые позволят исключить отмеченные выше недостатки и тем самым обеспечить развитие перспективного вида шахтного транспорта.

Список литературы

1. Пивняк, Г.Г. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт [Текст] / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянц и др.; под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра. –1990. – 245 с.
2. Пивняк, Г.Г. Задачи моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии [Текст] / Г.Г. Пивняк, Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская / Технічна електродинаміка. Тематичний вип. "Проблеми сучасної електротехніки". Ч. 7, 2004, С. 112–116.
3. Хованская, Е.И. Анализ пускового режима тяговой сети в комплексе транспорта с индуктивной передачей энергии [Текст] / Е.И. Хованская, А.Р. Ковалев – Гірнич електромех. та автомат.: наук.-тех. зб. – 2000. – Вип. 64. – С.30–34.
4. Зражевский, Ю.М., Хованская Е.И., Бобров А.В. Особенности моделирования режимов работы тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии [Текст] / Ю.М. Зражевский, Е.И. Хованская, А.В. Бобров / Электротехника и электроэнергетика. – 2001. – №2. – С. 66–68.

Рекомендовано до друку: проф. Разумним Ю.Т.