

Применение итерационных методов исчисления для анализа и моделирования мгновенных схем тягового электроснабжения

А.А. Капкаев

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Статья посвящена возможности применения методов последовательных приближений при анализе мгновенной схемы тяговой сети. Описываемый подход позволяет улучшить точность моделирования динамическим режимов работы участков тягового электроснабжения, а также позволяет существенно улучшить процесс моделирования систем диагностики и управления электроподвижным составом на стадии проектирования опираясь на более точную модель динамически изменяющихся входных параметров тяговой сети в зависимости от необходимого их уровня.

Ключевые слова: тяговая сеть, мгновенная схема, диагностика, моделирование, итерация.

Повышение точности и адекватности математических моделей, описывающих электрические процессы в тяговой сети электрических железных дорог особенно при динамическом изменении параметров является одной из актуальных и важных задач. Это позволит увеличить точность моделирования на этапе проектирования, а также улучшить методы диагностики и точность работы оборудования автоматического управления электроподвижным составом. Совершенно очевидно, что чем лучше математическая модель отражает реальные процессы, чем ближе заложенный в неё математический подход к реальному поведению системы во времени, тем адекватней эта модель при построении реальных систем диагностики и автоматизированного управления, оптимизации алгоритмов выбора дорогостоящего оборудования [1] а также создания различных тренажёрных комплексов [2]. В итоге такая задача является комплексной и охватывает целый ряд важных и связанных между собой направлений.

Тяговая сеть представляет собой совокупность контактной сети, рельсовой цепи и набора дополнительных проводников. При этом электрической нагрузкой в тяговой сети является электроподвижной состав, перемещающийся внутри межподстанционной зоны, т.е. участка между двумя тяговыми подстанциями. Электрическое питание ЭПС получает за счёт контактного токосъёма с проводников контактной сети.

На сегодняшний день при расчёте различных режимов работы тяговой сети электрические нагрузки такие как ЭПС рассматриваются в виде источника заданного тока (Рис.1а), а изменение тока в самой контактной сети приближённо оценивается через различные соотношения. К сожалению подобный подход является неточным т.к. в

действительности любой ЭПС следует рассматривать в виде источника заданной мощности [3,4] (Рис. 1б).

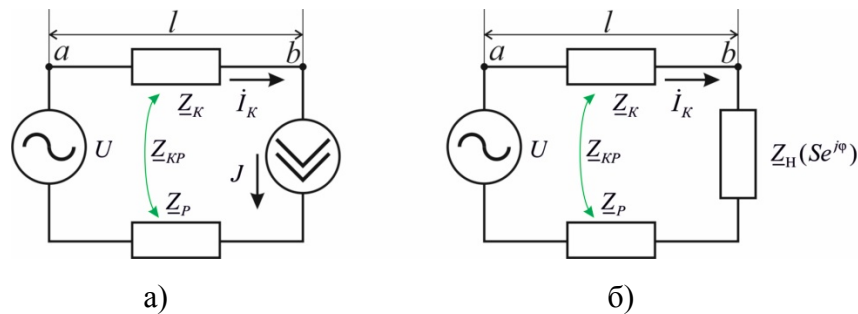


Рис. 1 – Представление ЭПС в виде: а) источника заданного тока J б) в виде источника заданной мощности $Z_H(Se^{j\varphi})$.

На рис.1 Z_K – комплексное сопротивление контура «эквивалентный контактный провод – земля» зависящее от сечения проводников контактной сети, расстояния между ними и проводимости грунта; Z_P – комплексное сопротивление контура «эквивалентный рельс – земля» зависящее от типа рельса и проводимости грунта; Z_{KP} – взаимоиנדуктивное сопротивление между контурами «рельс-земля» и «контактный провод-земля».

В действительности ЭПС содержит в себе элементы преобразовательной техники в частности электровозы снабжаются тяговыми трансформаторами снижающим питающее напряжение от контактной сети и осуществляющим регулировку его уровня на выходе, выпрямители, инверторы, сглаживающие фильтры и т.д. При этом основным показателем при движении электровоза является его скорость, в свою очередь для развития определённой скорости при определённой массе поезда и профиле пути необходимо поддержание входных электрических параметров электродвигателей на необходимом уровне. С данными задачами в стационарном режиме справляется преобразовательная техника ЭПС, а вот входные характеристики со стороны тяговой сети изменяются т.к. ЭПС перемещается по участку и электрические сопротивления динамически изменяются в связи с изменением расстояния от источника питания до ЭПС.

В случае рассмотрения ЭПС в виде источника заданной мощности мгновенная схема может быть рассчитана методом последовательных приближений или линейных итераций.

Для схемы, изображённой на рис.1 б (случай одностороннего питания) последовательность расчёта системы начинается с определения первичного приближения

для этого можно идеализировать схему и полностью убрать все сопротивления. Тогда нулевое или начальное приближение выглядит как:

$$\tilde{I}_0 = \frac{S e^{j\phi}}{U} = \frac{P - jQ}{U} \quad (1)$$

В выражении (1) P – активная мощность потребителя, Вт; Q – реактивная мощность потребителя ВАр; S – кажущаяся (полная) мощность потребителя; $\tilde{I}_0 = I_n^0 e^{-j\phi^0}$ сопряжённое комплексное значение тока.

Здесь стоит отметить, что значение мощности развиваемой потребителем может определяться с высокой точностью, а также непосредственно измеряться при движении поезда в само ЭПС.

Далее если ввести все значения сопротивления мы получим следующее неравенство:

$$\left(\underline{I}_K Z_K - \underline{I}_P Z_{KP} + \underline{I}_P Z_P - \underline{I}_K Z_{KP} \right) \cdot l + \frac{S}{\tilde{I}_0} \neq \underline{U} \quad (2)$$

В выражении (2) \underline{I}_K \underline{I}_P комплексные значения тока в контактной сети и рельсовой цепи соответственно, l – расстояние до расчётного поезда. При этом в выражении 2 значение тока \underline{I}_K \underline{I}_P непосредственно связаны с расстоянием до источника питания в данной статье мы рассмотрим случай нахождения ЭПС на незначительном удалении от тяговой подстанции когда током утечки в землю можно частично пренебречь $\underline{I}_K = \underline{I}_P = \underline{I}_n^0$. Тогда для перехода выражения (2) к уравнению вводится уточнение переменной \tilde{I} :

$$\tilde{I}_n^1 = \frac{S}{\underline{U} - \underline{I}_n^0 \cdot l \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP})} \quad (3)$$

В общем виде:

$$\tilde{I}_n^{i+1} = \frac{S}{\underline{U} - \underline{I}_n^i \cdot l \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP})} \quad (4)$$

Где i – шаг итерации.

Количество итераций определяется сходимостью процесса к стационарным значениям корней и по факту к нахождению корня уравнения для контура, изображённого на Рис. 1б. Однако даже в наиболее простом случае количество линейных итераций для

допустимой погрешности составляет 6-10 ед. в зависимости от принятых значений постоянных принятых в уравнении. К примеру, при значении расстояния l в пределах от 1 до 10 км. Для некоторых случаев достаточно 4 итераций, а в случае 40 км уже необходимо 10 и т.д.

Для уменьшения числа итераций можно использовать известный метод Ньютона-Рафсона производящий уточнение параметра оценкой приращения аргумента и скорости его изменения [5,6]

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f(x^k)}{f'(x^k)}$$

Тогда из выражения (2) будет играть роль функции от заданной переменной, а уточнённое значение переменной будет определяться как:

$$\tilde{I}_H^{i+1} = \tilde{I}_H^i - \frac{U - \underline{I}_H^i \cdot l \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP}) - \underline{S} / \tilde{I}_H^i}{\frac{d}{d\underline{I}_H^i} [U - \underline{I}_H^i \cdot l \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP}) - \underline{S} / \tilde{I}_H^i]} \quad (5)$$

В случае более сложных систем много проводных тяговых сетей с двухсторонним питанием, когда система содержит целый набор, связанных переменных к примеру, можно рассмотреть систему с двусторонним питанием потребителя (Рис.2)

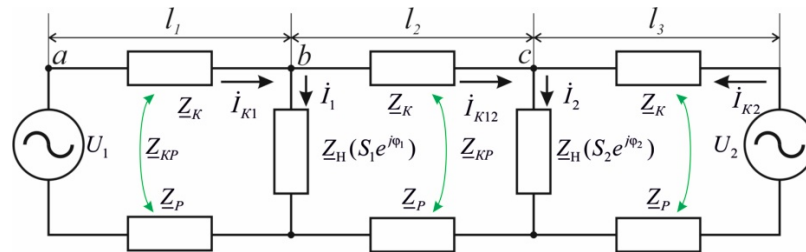


Рис. 2 – Упрощенная схема замещения однопутного участка тяговой сети с двухсторонним питанием.

Система на Рис. 2 может быть упрощенно описана следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{K1}^i - I_1^i - I_{K12}^i = 0 \\ I_{K2}^i - I_2^i + I_{K12}^i = 0 \\ U_1 - I_{K1}^i \cdot l_1 \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP}) - \underline{S}_1 / \tilde{I}_1^i = 0 \\ U_2 - I_{K2}^i \cdot l_3 \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP}) - \underline{S}_2 / \tilde{I}_2^i = 0 \\ I_{K12}^i \cdot l_2 \cdot (Z_K + Z_P - 2Z_{KP}) + \underline{S}_2 / \tilde{I}_2^i - \underline{S}_1 / \tilde{I}_1^i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Выражение (6) является многомерным случаем. В данном случае необходимы начальные приближения, которые могут определяться для идеальных условий отсутствия

сопротивлений сети и равенства $U_1 = U_2 = U$ Тогда $\tilde{I}_1^0 = \frac{S_1 e^{j\varphi_1}}{U}$; $\tilde{I}_2^0 = \frac{S_2 e^{j\varphi_2}}{U}$;

Далее исходя из идеальных условий $I_{K1}^0 = I_{K2}^0 = \frac{I_1^0 + I_2^0}{2}$; $I_{K12}^0 = 0$;

Все дальнейшие итерации строятся на уточнение многомерных функций входящих систему уравнений (6) и составлении новой системы уравнений где каждое уравнение определяется как:

$$f(i) + \sum_{k=1}^n \frac{\partial f(i)}{\partial(x_k)} \cdot (x_k^{j+1} - x_k^j) = 0 \quad (7)$$

Наряду с методом Ньютона-Рафсона так же возможно применение расчётных моделей с демпфированным методом [7,8] при этом решение задачи многомерной системы является задачей многомерной оптимизации [9,10]. Стоит отметить, что на сегодняшний день расчёт систем методом итераций даже с минимальным значением погрешности является не сильно затратным и не требует большого количества времени особенно в случае работы с матрицами малых порядков. В итоге подобный подход к расчёту тяговых сетей является реализуемым и требует проработки как в вопросах подбора оптимального метода, обеспечивающего максимальную сходимость так и в вопросах наилучших начальных приближений.

Литература

1. Капкаев А.А., Микаэльян Е.Ю. Алгоритм выбора металлизированного волоконно-оптического кабеля для его работы в качестве комбинированного экранирующего провода тяговой сети электрических железных дорог // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3850
2. Юренко И.К., Шепилова Е.Г., Гречук И.А. Совершенствование бортовых систем управления локомотивов на базе технических средств тренажеро-моделирующих комплексов // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452.
3. Kulworawanichpong Thanatchai Optimising AC electric railway power flows with power electronic control // A thesis submitted to The University of Birmingham // Department of

Electronic, Electrical and Computer Engineering School of Engineering The University of Birmingham November 2003, P.304.

4. Khan A.M.M., Bickford J.P. Interactive calculation of power system transients // IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution (Volume: 127, Issue: 1, January 1980). pp.41 – 43.

5. Поляк Б.Т. Метод Ньютона и его роль в оптимизации и вычислительной математике // Труды ИСА РАН 2006. Т. 28. С.48-66.

6. Канторович Л. В. О методе Ньютона для функциональных уравнений // Доклады АН СССР. 1948. 59 (7). С. 1237–1240.

7. Levenberg K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares // Quarterly of Applied Mathematics. 1944. № 2. P. 164–168.

8. Marquardt D. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters // SIAM Journal of Applied Mathematics. 1963. 11. P. 431–441.

9. Сысолятина Л.Г. Задача многомерной оптимизации: метод Ньютона // Альманах современной науки и образования, № 8 (63) 2012. С.151-155

10. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002. С.823.

References

1. Каркаев А.А., Mikajel'jan E.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3850

2. Jurenko I.K., Shepilova E.G., Grechuk I.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2452.

3. Kulworawanichpong Thanatchai Department of Electronic, Electrical and Computer Engineering School of Engineering The University of Birmingham November 2003. P.304.

4. Khan A.M.M., Bickford J.P. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution (Volume: 127, Issue: 1, January 1980). pp.41 – 43.

5. Poljak B.T. Trudy ISA RAS 2006. Vol. 28. pp.48-66.

6. Kantorovich L. V. O metode N'jutona dlja funkcional'nyh uravnenij Doklady AN USSR. 1948. Vol. 59 (7). Pp. 1237–1240.

7. Levenberg K. Quarterly of Applied Mathematics. 1944. № 2. pp. 164–168.

8. Marquardt D. SIAM Journal of Applied Mathematics. 1963. 11. pp. 431–441.



9. Sysoljatina L.G. Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija, № 8 (63) 2012, pp.151-155
10. Vasil'ev F. P. Metody optimizacii. [Optimization methods]. 2002. P.823.