

CALCULATION OF A DOUBLE-TRACK SECTION OF A CONTACT LINES FOR RAILWAYS A POST SECTIONING AND DOUBLE-SIDED POWER SUPPLY USING THE MATRIX METHOD

Bayanov I.N., Badretdinov T.N.

Tashkent state transport university (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract: This article presents research on the calculation of complex sections of contact lines for railways. The authors propose to use the matrix method to analyze sections with partitioning posts and two-way power supply. The article describes a mathematical model of a section of a contact line, and also provides calculation algorithms based on the use of matrix operations. The method proposed in the work makes it possible to effectively optimize the parameters of the sections of contact lines to ensure reliable and stable power supply to railway transport at minimal cost. The results obtained can be applied both for the design of new sections of contact lines and for the modernization of existing ones.

Key words: traction power supply, contact lines for railways, voltage on the current collector, equivalent circuit, matrix equation.

РАСЧЕТ ДВУХПУТНОГО УЧАСТКА КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ПОСТОМ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ И ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

Баянов И.Н., Бадретдинов Т.Н.

Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Узбекистан)

Аннотация: В статье представлены исследования по расчету сложных участков контактных сетей для железных дорог. Авторы предлагают использовать матричный метод для анализа участков с отдельными постами и двухсторонним питанием. В работе описана математическая модель участка контактной сети, а также приведены алгоритмы расчета, основанные на применении матричных операций. Предложенный метод позволяет эффективно оптимизировать параметры участков контактных сетей, обеспечивая надежное и стабильное электроснабжение железнодорожного транспорта при минимальных затратах. Полученные результаты могут быть применены как для проектирования новых участков контактных сетей, так и для модернизации существующих.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, контактные сети для железных дорог, напряжение на токоприемнике, эквивалентная схема, матричное уравнение.

Введение.

Современные тенденции в области железнодорожного транспорта требуют поиска новых подходов к обеспечению надежного электроснабжения, особенно в условиях растущей интенсивности движения и внедрения высокоскоростных поездов. Одной из ключевых проблем является обеспечение минимальных потерь напряжения при высоких нагрузках, что особенно актуально для двухпутных участков с постами секционирования. Внедрение матричных методов для анализа и оптимизации параметров контактной сети открывает новые возможности для решения этой задачи. Эти методы позволяют учитывать сложные схемы электроснабжения, обеспечивая точные расчеты токов и напряжений в разных режимах работы.

История электрификации железных дорог Узбекистана началась в 1971 году. За прошедшие половину века в железнодорожном транспорте и его электроснабжении произошли

существенные изменения. Так если электрификация начиналась на постоянном токе, то с 1985 года все электрифицированные участки стали переводить на переменный ток и к 1993 году участков дорог на постоянном токе на магистральных линиях уже не осталось; полученные из Испании в 2010 году первые высокоскоростные поезда на следующий год начали свое регулярное движение; в последние годы интенсивность и грузоподъемность движения по железным дорогам растет.

За этот длительный период существующая и обеспечивающая движение электроподвижных составов (ЭПС) контактная подвеска устарела как морально, так и физически. В связи с чем встал вопрос о модернизации контактных сетей путем замены подвесок с учетом вышеперечисленных изменений.

Проблема возникла в связи с истекшим сроком эксплуатации контактной сети и предстоящей заменой контактного провода и несущего троса с учетом изменившихся условий эксплуатации. Таким образом, перед авторами в связи с производственной необходимостью была поставлена задача – рассчитать режим работы участка контактной сети с постом секционирования между двумя тяговыми подстанциями с максимальным одновременным нахождением там пяти ЭПС для дальнейшего выбора типа контактной подвески.

Методики расчета.

При выборе типа контактной подвески необходимо было учесть использование материалов, выпускаемых в Республике как по электрическим, так и механическим параметрам, подходящим к применению на скоростных участках дорог, а также должна учитываться интенсивность движения по железным дорогам, чтобы предотвратить чрезмерный перегрев и недопустимо низкое напряжение на токоприемниках электроподвижного состава. Для этого предполагается применение комбинации различных типов контактных подвесок с учетом определенного количества поездов в межподстанционной зоне.

Для расчетов был взят двухпутный участка контактной сети с постом секционирования и двухсторонним питанием (рис.1). На участке находятся пять поездов различного типа.

Схема замещения участка контактной сети с учетом расположения поездов имеет вид, показанный на рис.2, где верхние индексы «к», «р» и «э» обозначают принадлежность сопротивления контактной сети, рельсу и ЭПС, соответственно. Для расчета токов и напряжений методом контурных токов эквивалентная схема замещения была приведена к планарному виду и в ней выбраны восемь независимых контуров.

Схема замещения участка контактной сети с учетом расположения поездов имеет вид, показанный на рис.2, где верхние индексы «к», «р» и «э» обозначают принадлежность сопротивления контактной сети, рельсу и ЭПС, соответственно. Существуют различные методы расчета таких электрических цепей [1,2,3]. В данной работе для расчета токов и напряжений был выбран метод контурных токов. Для этого эквивалентная схема замещения была предварительно приведена к планарному виду и в ней выбраны восемь независимых контуров.

Матричное уравнение по методу контурных токов в общем виде имеет вид:

$$\|Z\| \cdot \vec{I} = \vec{E}, \quad (1)$$

где \vec{I} – матрица-столбец неизвестных контурных токов I_{kk} , здесь $k=1 \div 8$;

\vec{E} – матрица-столбец собственных ЭДС выбранных контуров;

$\|Z\|$ – квадратная матрица контурных сопротивлений 8-го порядка.

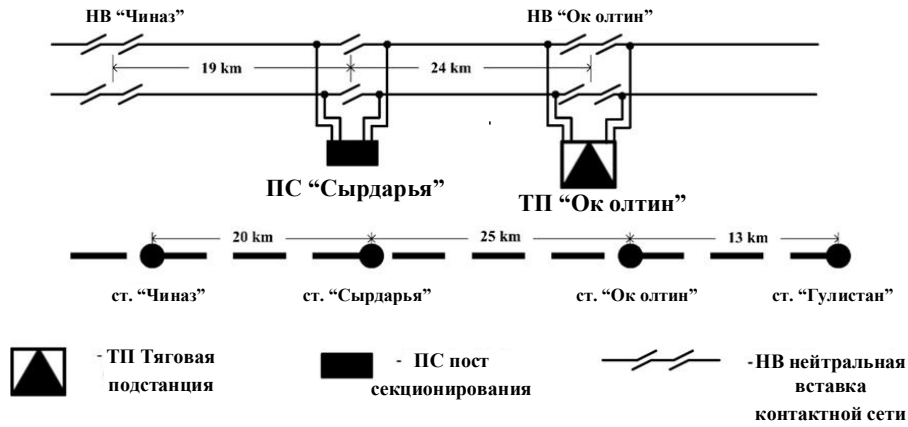


Рис.1. Схема двухпутного участка

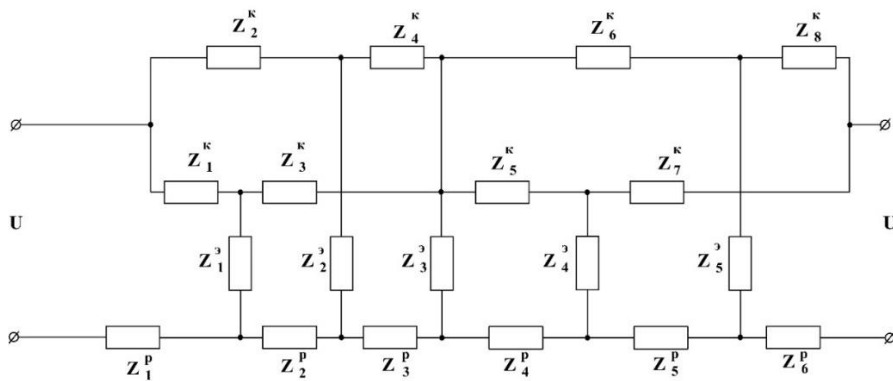


Рис.2. Схема замещения участка контактной сети с учетом расположения поездов

Элементы этой матрицы, составленной для эквивалентной схемы замещения участка межподстанционной зоны после выбора независимых контуров, определяются по следующим формулам:

-собственные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_1^K + \underline{Z}_1^P + \underline{Z}_1^3; \\
 \underline{Z}_{22} &= \underline{Z}_3^K + \underline{Z}_2^P + \underline{Z}_3^P + \underline{Z}_1^3 + \underline{Z}_3^3; \\
 \underline{Z}_{33} &= \underline{Z}_5^K + \underline{Z}_4^P + \underline{Z}_3^3 + \underline{Z}_4^3; \\
 \underline{Z}_{44} &= \underline{Z}_7^K + \underline{Z}_4^3 + \underline{Z}_4^P + \underline{Z}_6^P; \\
 \underline{Z}_{55} &= \underline{Z}_2^K + \underline{Z}_1^3 + \underline{Z}_2^P; \\
 \underline{Z}_{66} &= \underline{Z}_3^K + \underline{Z}_5^3 + \underline{Z}_6^P; \\
 \underline{Z}_{77} &= \underline{Z}_1^K + \underline{Z}_2^K + \underline{Z}_3^K + \underline{Z}_4^K; \\
 \underline{Z}_{88} &= \underline{Z}_5^K + \underline{Z}_6^K + \underline{Z}_7^K + \underline{Z}_8^K
 \end{aligned} \tag{2}$$

взаимные сопротивления контуров:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_1^3; \\
 \underline{Z}_{15} &= \underline{Z}_{51} = -\underline{Z}_1^P; \\
 \underline{Z}_{17} &= \underline{Z}_{71} = -\underline{Z}_1^K; \\
 \underline{Z}_{23} &= \underline{Z}_{32} = -\underline{Z}_3^3; \\
 \underline{Z}_{25} &= \underline{Z}_{52} = -\underline{Z}_2^P; \\
 \underline{Z}_{27} &= \underline{Z}_{72} = -\underline{Z}_3^K; \\
 \underline{Z}_{34} &= \underline{Z}_{43} = -\underline{Z}_4^3; \\
 \underline{Z}_{38} &= \underline{Z}_{83} = -\underline{Z}_5^K; \\
 \underline{Z}_{46} &= \underline{Z}_{64} = -\underline{Z}_6^P; \\
 \underline{Z}_{57} &= \underline{Z}_{75} = -\underline{Z}_2^K;
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\underline{Z}_{68} = \underline{Z}_{86} = -\underline{Z}_8^k.$$

Ненулевые элементы матрицы \vec{E}

$$\begin{aligned} \dot{E}_{11} &= \dot{U}_1; \\ \dot{E}_{44} &= -\dot{U}_2; \\ \dot{E}_{55} &= -\dot{U}_1; \\ \dot{E}_{66} &= \dot{U}_2. \end{aligned} \quad (4)$$

По методу Крамера находим контурные токи:

$$i_{kk} = \frac{\Delta_k}{\Delta}, \quad (5)$$

где Δ – определитель исходной матрицы $\|Z\|$;

Δ_k – определитель матрицы, полученный из исходной путем замены k -го столбца соответствующими элементами матрицы \vec{E} . Затем находим токи ветвей электроподвижных составов:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{11} - i_{22}; \\ i_2 &= -i_{55}; \\ i_3 &= i_{22} - i_{33}; \\ i_4 &= i_{33} - i_{44}; \\ i_5 &= i_{66}. \end{aligned} \quad (6)$$

По заданным сопротивлениям ЭПС определяем падение напряжения на них:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z}_1^3 \cdot i_1; \\ \dot{U}_2 &= \underline{Z}_2^3 \cdot i_2; \\ \dot{U}_3 &= \underline{Z}_3^3 \cdot i_3; \\ \dot{U}_4 &= \underline{Z}_4^3 \cdot i_4; \\ \dot{U}_5 &= \underline{Z}_5^3 \cdot i_5. \end{aligned} \quad (7)$$

Апробация результатов расчета.

Для проверки надежности разработанной методики расчета сечения контактных линий тот же участок был смоделирован в симуляторе Electronics Workbench (рис. 3). Напряжение 27,5 кВ однофазного переменного тока промышленной частоты подается от обеих подстанций. На двухпутном участке тяговая энергосистема формируется из контактной подвески.

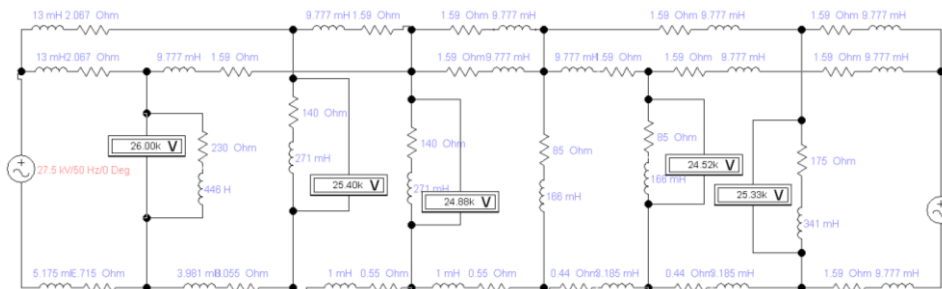


Рис. 3. Модель участка контактных линий для расчета в симуляторе

ПБСМ-95+МФ-120 и рельсы Р65. Результаты расчетов, выполненных по методике и смоделированных в симуляторе Electronics Workbench, показали расхождение в пределах 2-3% (табл. 1), что свидетельствует о надежности расчетов с использованием матричного метода. На основании полученных данных, где минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС №3 составило 23,75 кВ, выбранная контактная подвеска удовлетворяет требованиям к минимально допустимому напряжению на токоприемнике ЭПС (не менее 21 кВ).

Табл. 1.

Апробация результатов расчетов

	Напряжение на токоприемнике, кВ	
--	---------------------------------	--

№ ЭПС	Согласно расчетному методу	Смоделировано в симуляторе	Погрешность расчетного метода, %
№1	26,0	25,25	2,88
№2	25,4	24,82	2,36
№3	24,88	23,75	2,28
№4	24,52	23,83	2.81
№5	25,33	24,75	2,29

Заключение.

Таким образом, мы составили схему замещения заданного участка контактной сети, соответствующее матричное контурное уравнение и вывели формулы для искомым токов и напряжений. При известных числовых значениях исходных параметров, таких как сопротивления поездов, участков контактной сети и рельсов между ними, а также напряжения питания участка межподстанционной зоны можно использовать возможности современных компьютерных прикладных программ (например, Matlab, Matcad и др.) и найти числовые значения искомым токов и напряжений. По этим значениям выбираются конкретные типы контактных подвесок. Кроме того, составленная математическая модель позволяет исследовать и другие режимы на заданном участке путем изменения числовых значений некоторых исходных параметров.

Полученные результаты исследования подтверждают эффективность предложенного матричного метода для расчета параметров контактной сети двухпутных участков с постами секционирования и двухсторонним питанием. Разработанная методика позволяет минимизировать энергетические потери и обеспечить надежное электроснабжение электроподвижного состава при интенсивной эксплуатации железнодорожной инфраструктуры.

Практическая значимость заключается в возможности применения методики не только для проектирования новых участков железных дорог, но и для модернизации существующих систем. Проведенная апробация методом симуляции подтвердила высокую точность расчетов, что открывает перспективы для ее использования в сочетании с современными программными средствами, такими как MATLAB и Mathcad.

В дальнейшем планируется исследование влияния различных типов контактной подвески на устойчивость электроснабжения, а также разработка рекомендаций по выбору оптимальных параметров в зависимости от специфики эксплуатационных условий и типов подвижного состава.

Обозначение:

- ЭПС электроподвижной состав;
- Zсопротивление элементов цепи;
- U напряжение тяговой подстанции;
- ТПтяговая подстанция;
- ПСПост секционирования;
- НВ нейтральная вставка.

References

1. Abrahamsson, L., Schütte, T., & Östlund, S. Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies. *Energy for Sustainable Development*, 2012;16(3): 368-378.

2. Arboleya, P., Mayet, C., Mohamed, B., Aguado, J. A., & de La Torre, S. A review of railway feeding infrastructures: Mathematical models for planning and operation. *eTransportation* 5 (2020), 100063.
3. Badretdinov T.N. Problems of operation of electrified railways on the example of Uzbekistan // *Universum: technical sciences*. 2020. № 9-2 (78). pp. 103-105.
4. Nazirova Z.G. Diametric method for calculating the scheme of a traction power supply section. *The scientific journal vehicles and roads*, 2023; 4: 183-189.
5. Bayanov I, Badretdinov T., Muminov S., Karimov I., Saydivaliev S, and Saliyev E. "The electric field of the sliding contact during the interaction of the pantograph and the contact wire." // *In E3S Web of Conferences*, vol. 264, p. 04029. EDP Sciences, 2021. doi:10.1051/e3sconf/202126404029
6. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A.: *Power supply of railways (Russian language)*: Brooks/Cole 2014. – 432p.
7. Mahmood Nahvi, Joseph A. Edminister *Theory and Problems of Electric Circuits: Fourth Edition*. – New York: McGraw-Hill Book Company, 2003. – 481p.

Литература

1. Abrahamsson, L., Schütte, T., & Östlund, S. Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies. *Energy for Sustainable Development*, 2012;16(3): 368-378.
2. Arboleya, P., Mayet, C., Mohamed, B., Aguado, J. A., & de La Torre, S. A review of railway feeding infrastructures: Mathematical models for planning and operation. *eTransportation* 5 (2020), 100063.
3. Бадретдинов Т.Н. Проблемы эксплуатации электрифицированных железных дорог на примере Узбекистана // *Universum: технические науки*. 2020. № 9-2 (78). с. 103-105.
4. Nazirova Z.G. Diametric method for calculating the scheme of a traction power supply section. *The scientific journal vehicles and roads*, 2023; 4: 183-189.
5. Bayanov I, Badretdinov T., Muminov S., Karimov I., Saydivaliev S, and Saliyev E. "The electric field of the sliding contact during the interaction of the pantograph and the contact wire." // *In E3S Web of Conferences*, vol. 264, p. 04029. EDP Sciences, 2021. doi:10.1051/e3sconf/202126404029
6. Э.В.Тер-Оганов, А.А. Пышкин *Электроснабжение железных дорог – Екатеринбург: изд-во. УрГУПС*, 2014. – 432с.
7. Mahmood Nahvi, Joseph A. Edminister *Theory and Problems of Electric Circuits: Fourth Edition*. – New York: McGraw-Hill Book Company, 2003. – 481p.

Information about the authors / Сведения об авторах

Bayanov Ildar Nazipovich – PhD, Associate Professor of the Department of "Power Supply", Tashkent State Transport University e-mail: ildar-lili@yandex.ru

Badretdinov Timur Nailevich – PhD, acting associate professor of the Department of "Power Supply", Tashkent State Transport University e-mail: tim_bad2107@mail.ru

Баянов Ильдар Назипович – PhD, доцент кафедры «Электроснабжения», Ташкентского государственного транспортного университета e-mail: ildar-lili@yandex.ru

Бадретдинов Тимур Наильевич – PhD, и.о. доцента кафедры «Электроснабжения», Ташкентского государственного транспортного университета e-mail: tim_bad2107@mail.ru