

УДК 378:011.5

Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе

М. В. Шевлюгин, А. А. Куликов, Д. В. Семенова

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, г. Москва, ул Образцова, 9/9

Для цитирования: Шевлюгин М. В., Куликов А. А., Семенова Д. В. Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 975–986. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-975-986

Аннотация

Цель: Снизить экономические потери в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе. Существующие электромагнитные влияния на железной дороге на переменном токе приводят к существенным экономическим потерям. Дополнительно присутствует проблема пережога контактного провода (КП) при прохождении нейтральной вставки с поднятым токоприемником под напряжением на высокоскоростной магистрали (ВСМ). Пережог КП приводит к выходу из строя контактной сети, затратам на ремонт, возможному повреждению чужого имущества и подвижного состава. В совокупности это все представляет собой большие экономические потери. **Методы:** Проводился анализ материальных и временных затрат на устранение проблем, которые возникают по причине пережога КП или из-за использования ручного труда при монтаже ВЛ, в сравнении с предлагаемыми решениями для снижения экономических потерь. **Результаты:** В решении проблемы негативного электромагнитного влияния контактной сети (КС) на воздушную линию (ВЛ) призван помочь мобильный механизированный комплекс (ММК), который выполняет транспозицию проводов ВЛ в 6 шагов с прокруткой на 60° каждую опору. Данный способ позволит расположить провода ВЛ на равноудаленном расстоянии от контактного провода. Прокрутка с частотой в каждую опору выровнит несимметрию погонных электрических параметров. В совокупности ММК выполняет монтаж в автоматизированном режиме. Проблемы пережога КП способно снизить устройство изолирующего сопряжения (УИС) КС. УИС КС представляет собой набор ступенчатых сопротивлений, которые располагаются на крайних участках фазных проводов перед и после нейтральной вставки. Оно направлено на снижение тока до безопасной величины, который не приведет к пережогу контактного провода, выходу КС и/или подвижного состава из строя и возможному причинению вреда чужому имуществу. **Практическая значимость:** Итогом является комплекс мер в виде ММК для снижения экономических потерь в ВЛ от влияния КС и УИС КС для снижения потерь в контактной сети за счет сохранения работоспособности контактного провода.

Ключевые слова: Транспозиция, шестишаговая транспозиция, монтажный комплекс, электромагнитное влияние, несимметрия, пережог, контактный провод, устройство изолирующего сопряжения, ступенчатые сопротивления, воздушная линия, контактная сеть.

Количество экономических потерь на железной дороге зависит от количества ошибок, допущенных при проектировании того или иного участка дороги. В случае электрифицированной

железной дороги проблемы будут отличаться в соответствии с типом тока, которым питается подвижной состав. На железной дороге переменного тока на сегодняшний день основными

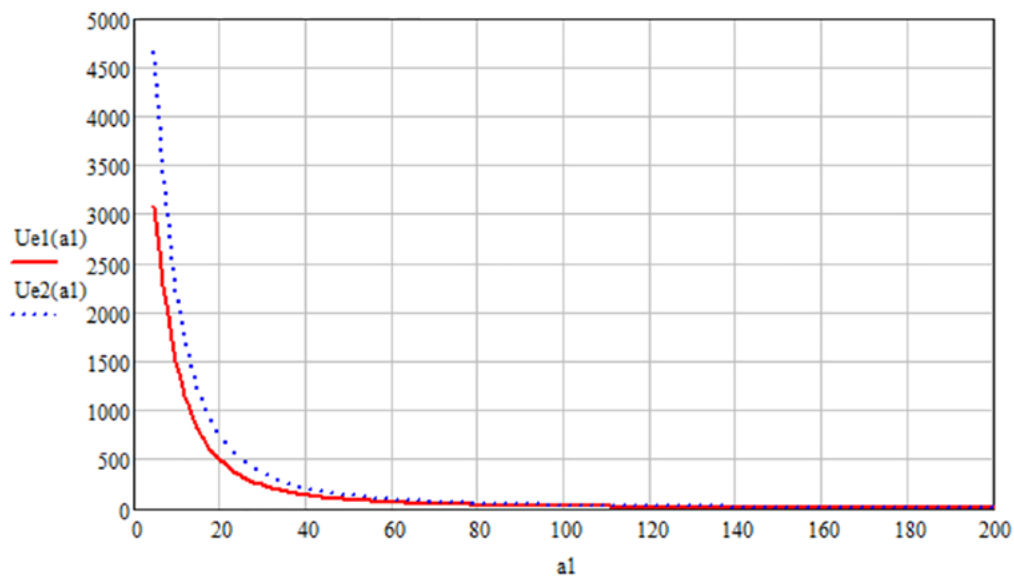


Рис. 1. Зависимость электрических влияний участка тяговой сети переменного тока на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии:
 Ue1 — электрические влияния на однопутном участке, Ue2 — на двухпутном участке

источниками экономических потерь являются потери электроэнергии. Поэтому можно выделить два основных направления потерь: проблемы линий, расположенных вдоль контактной сети, и проблемы непосредственно самой контактной сети.

Качество электроэнергии напрямую связано с эффективностью подвижного состава, работающего от постоянного или переменного тока [1]. Помимо внедрения новых методик расчета и учета электроэнергии, актуальным остается решение задачи практического плана [2–4]. Одной из таких проблем является негативное электромагнитное влияние контактной сети (КС) переменного тока на воздушную линию продольного электроснабжения [5].

В ходе исследования электрических влияний тяговой сети переменного тока 27,5 кВ на воздушную линию были получены зависимости, отражающие характер негативных электромагнитных влияний (рис. 1, 2).

Расчет электрических влияний производился по формуле [6]

$$U_{\text{э}} = U_{\text{к}} \frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\ln\left(\frac{2b_{\text{к}}}{\rho_{\text{к}}}\right)},$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение контактной сети, $U_{\text{к}} = 27\,500$ В;

$b_{\text{к}}$ — высота подвеса эквивалента контактной сети, можно принять $b_{\text{к}} = 6,93$ м;

$\rho_{\text{к}}$ — радиус эквивалента контактной подвески, м.

Исследование проводилось для однопутного и двухпутного участков с учетом ширины сближения контактной сети и линии от 5 до 200 м, изменение высота подвеса $b_{\text{д}}$ принималось от 3 до 15 м.

Из рис. 1 следует, что при ширине сближения провода с контактной сетью, равной 5 м, электрическое влияние на провод достигает 3072 и 4654 В для однопутного и двухпутного участка соответственно. Заметное снижение электрического влияния происходит с увеличением ширины сближения до 40 м. При достижении ширины сближения

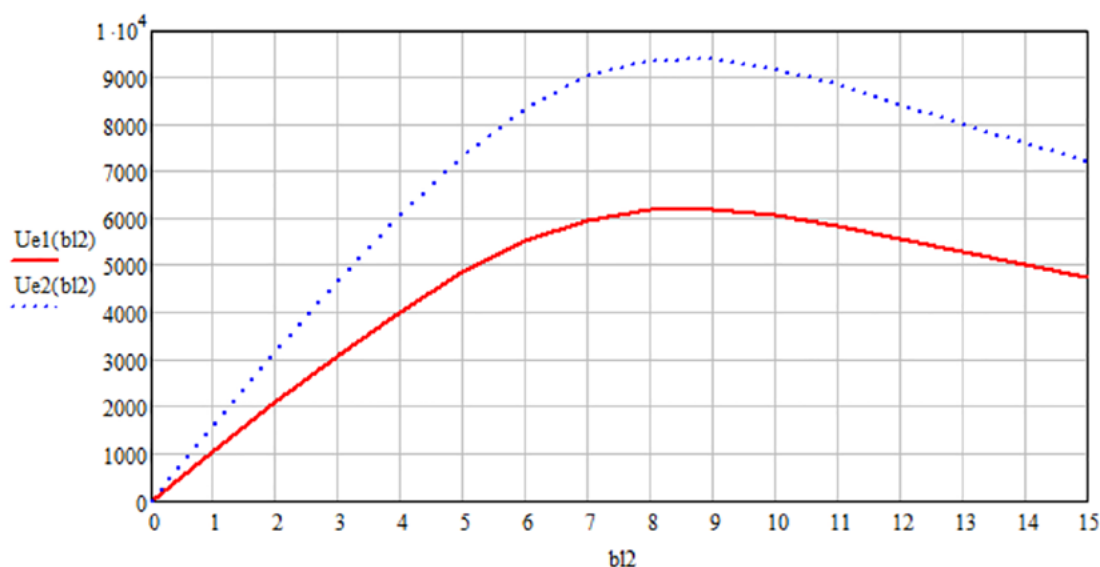


Рис. 2. Зависимость для исследования электрических влияний участка тяговой сети переменного тока на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии:

U_{e1} — электрические влияния на однопутном участке, U_{e2} — на двухпутном участке

в 200 м электрическое влияние снижается до незначительных величин.

На рис. 2 представлена зависимость электрических влияний от изменения высоты подвеса от 3 до 15 м с учетом ширины сближения 5 м. Максимальные значения будут наблюдаться при $b_{д} = 9$ м и составляют 6200 и 9400 В соответственно для однопутных и двухпутных участков.

Проведенное исследование показывает существенное влияние при сближении воздушной линии и контактной сети железной дороги переменного тока. Также в [7] приводится описание математической модели напряжений нулевой последовательности, которые возникают в ВЛ 6–10 кВ железнодорожного транспорта по причине близкого расположения к КС, в том числе на опорах КС. В виде решения предлагается интегрирование дополнительных емкостей на каждой фазе.

Другим решением, которое также является итогом исследования на рис. 1 и 2, будет отдаление ВЛ от КС на существенное расстояние. Но есть места, где нерационально или невозможно использовать этот метод. Такими местами явля-

ются тоннели, горная местность, поймы рек, районы вечной мерзлоты.

Помимо указанных электромагнитных влияний существует другая сторона проблемы — выполнение монтажа ВЛ в ручном или в полуавтоматическом режимах. В обоих случаях присутствует высокая вероятность ошибки по причине человеческого фактора, а также имеются высокие временные и экономические затраты и другие проблемы, присущие указанным видам монтажа.

Для решения сразу всех указанных выше проблем предлагается устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов ВЛ [8]. В первую очередь данное устройство направлено на осуществление симметрии погонных электрических параметров, которые и являются причиной низкого качества передаваемой энергии. По [9] для выполнения симметрии необходимо выполнять транспозицию проводов по вершинам равностороннего треугольника. Но предлагаемое авторами данной статьи устройство выполняет транспозицию с заметным отличием от принятой на сегодня

няшний день [10], а именно в шесть шагов, получившую название «шестишаговая транспозиция» [11].

Благодаря устройству транспозиции [12] при монтаже сохраняется равнопеременное равноудаленное расстояние между КС и каждым фазным проводом, которые, в свою очередь, расположены в вершинах равностороннего треугольника и совершают вращение на 60° на каждую опору [13]. Совокупность устройств, выполняющих данный монтаж ВЛ с прокруткой проводов, называется мобильным механизированным комплексом (ММК).

ММК включает в себя крутильную машину [14], манипулятор для перемещения проводов в пространстве, устройства закрепления и натяжения проводов на опоре, набор электродвигателей, датчиков и программных блоков. За управление всей системой ММК отвечает индивидуальное программное обеспечение, спроектированное с учетом технического задания. Сам ММК базируется на передвижной платформе, например полуприцеп стандартного типа.

ММК позволяет снизить количество рабочих в бригаде до 4 человек:

- бригадир, который контролирует выполненные работы;
- оператор ММК;
- водитель;
- разнорабочий — для выполнения вспомогательной работы.

Стоимость ММК по предварительным расчетам составляет около 20 млн рублей. Потери электроэнергии после монтажа ВЛ с помощью ММК и шестишаговой транспозиции стремятся к нулю. Потери проводов по причине воровства [15–17] или повреждения устраняются, так как при новом методе монтаж производится из барабанов, установленных в крутильную машину, непосредственно на опоры.

Снижение временных затрат составляет 70 % благодаря монтажу с помощью ММК в три раза

быстрее, чем существующим ручным методом с привлечением техники.

Один монтажный комплекс позволяет экономить в год от 5 до 7 млн рублей, в зависимости от сохранения или отсутствия двух работников на вышке манипулятора для контроля выполненной ММК работы. С учетом вышеизложенного окупаемость ММК составляет от 3 до 4 лет. Срок жизни ММК ограничен сроком жизни элементов электродвигателей и манипулятора, которые, в свою очередь, выбираются из производимых сегодня заводских решений, но не менее 10 лет. Срок жизни крутильной машины неограничен.

При снижении потерь от КС на ВЛ за счет сведения электромагнитного влияния к нулю остается вопрос эффективности КС переменного тока. Новые участки железной дороги стремятся проектировать с учетом известных на сегодняшний день проблем КС. Но при этом остается ряд нерешенных задач. Одной из таких является проход нейтральной вставки подвижным составом с поднятым токоприемником, что запрещено правилами технической эксплуатации [18]. Несоблюдение этого условия вызовет образование открытой электрической дуги на изолирующих сопряжениях, в результате появится короткое замыкание между фазой *A* и фазой *B* тягового трансформатора и контактная сеть будет перегорать и падать [19]. Это приводит к большим материальным затратам на восстановление КС, подвижного состава, а также возможное устранение вреда, нанесенного чужому имуществу.

Особенно актуальной эта проблема становится при проектировании высокоскоростной магистрали (ВСМ), где наиболее сложной задачей является обеспечение контактной подвеской проход ЭПС нейтральной вставки под рабочим током [20]. Чтобы исключить возникновение электрической дуги, а следовательно, и перегорание контактного провода, необходимо снизить питающий ток до минимального значения, кото-

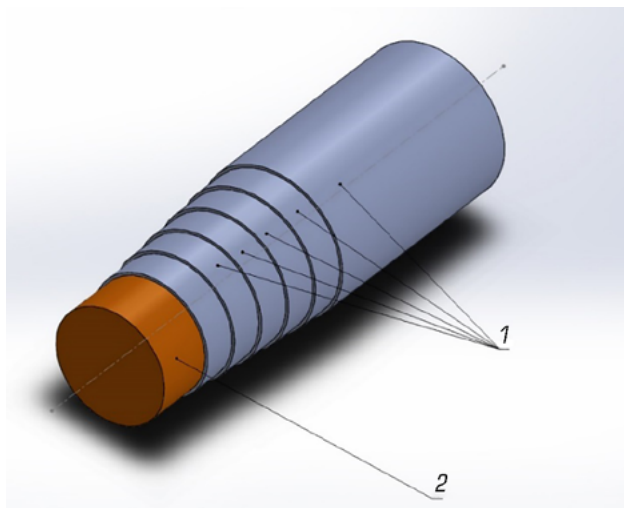


Рис. 3. Схематичное представление ступенчатых сопротивлений на контактном проводе:

1 — сопротивления разных номиналов,
2 — контактный провод

рое будет безопасным для провода в случае прохождения нейтральной вставки без опускания токоприемника.

С этим призвано справиться устройство изолирующего сопряжения контактной сети (УИС КС) и нейтральной вставки высокоскоростной железной дороги переменного тока [21], представляющее собой набор соединенных последовательно сопротивлений разного номинала, который возрастает, приближаясь к нейтральной вставке. Благодаря стремительному развитию технологий и процессов производства авторами предлагается заменить стандартные изоляторы сопротивлениями на композитной основе, формирующимися непосредственно на контактном проводе [22]. Такие сопротивления получили название «ступенчатые сопротивления», так как в схематичном виде образуют ступени из номиналов рассчитанных сопротивлений (рис. 3).

УИС КС располагается на конце фазного провода перед нейтральной вставкой и в начале провода другой фазы после нейтральной вставки.

Характеристики УИС КС зависят от количества участков с сопротивлениями, их величины и длины каждого участка. В ходе исследования [23] была построена математическая модель, принципиальная схема УИС КС, а также получены зависимости основных параметров участка цепи с УИС КС.

Изначально было выбрано 240 участков с постепенным равномерным изменением сопротивления на каждом последующем участке, пока не будет достигнут ток при размыкании $I_{\text{раз}} = 0,5$ А. В процессе были получены зависимости максимальных напряжений на участках при количестве участков $i = 40$ и $i = 90$ (рис. 4).

Как видно из рис. 4, максимальное напряжение при $i = 40$ составляет 4700 В и не превышает граничных условий, поэтому данное количество участков принимается за основное. После этого необходимо было посчитать количество тепла, которое, в свою очередь, будет находиться по закону Джоуля — Ленца:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{40} \left[(I_i)^2 R_{yk} t \right].$$

Исследование проводилось для длины УИС КС $l_{\text{общ}} = 5$ м, $l_{\text{общ}} = 3$ м (рис. 5), $l_{\text{общ}} = 2$ м при разных скоростях движения подвижного состава $V_{\text{пс}} = 100$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 200$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 300$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 400$ км/ч, соответствующих кривым Q_{o24} , Q_{o23} , Q_{o22} , Q_{o21} .

По рис. 5 видно, что максимальное количество тепла будет выделяться на участке № 5 вне зависимости от скорости подвижного состава. Уменьшением общей длины УИС КС удалось снизить максимальное количества тепла, выделяемого на проводе и при скорости $V_{\text{пс}} = 100$ км/ч, количество выделяемого тепла составляет $Q_{o24\text{max}} = 0,613$ Вт · ч. Дальнейшее уменьшение длины УИС КС приводит к увеличению трудозатрат при формировании ступенчатых сопротивлений из-за плотной компоновки.

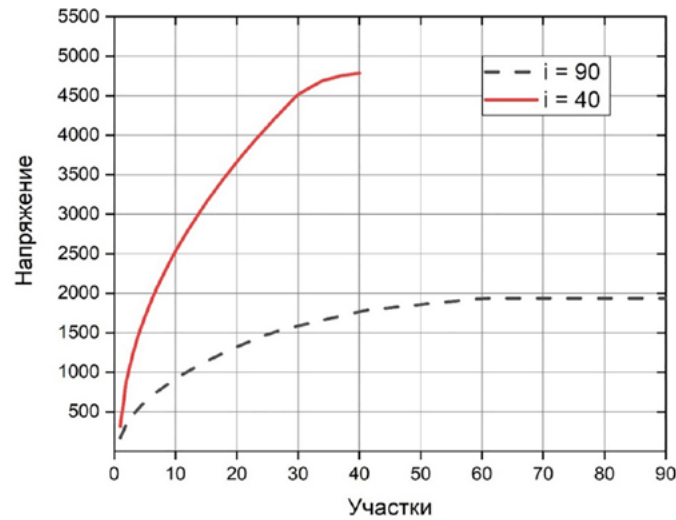
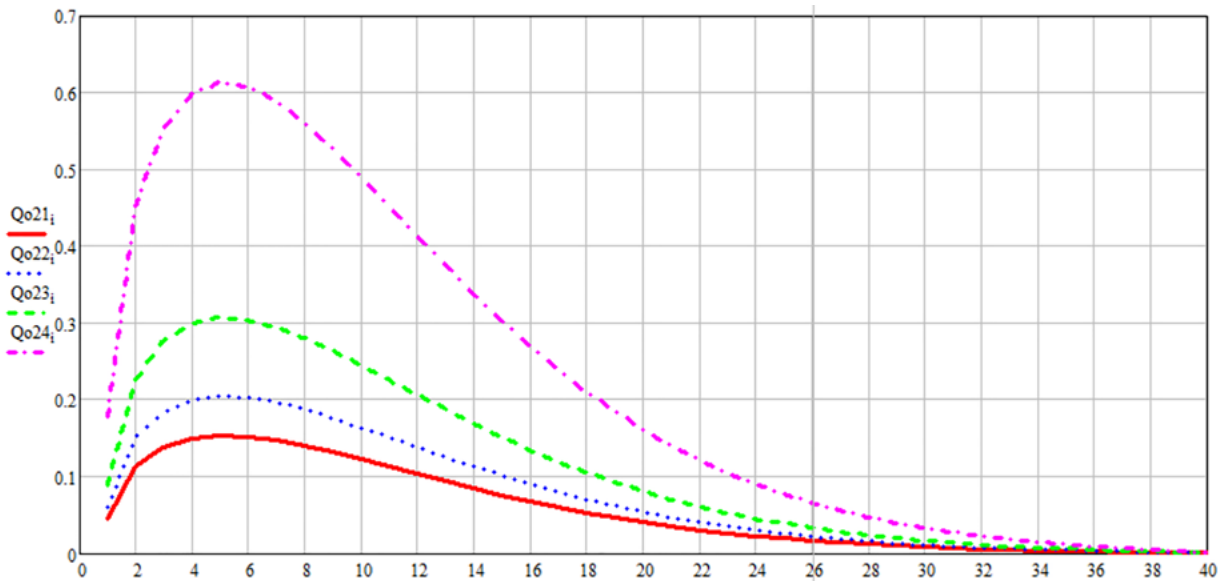


Рис. 4. Кривые напряжения

Рис. 5. Максимальные значения теплоты Q на i -тых участках при длине УИС КС $L_{\text{общ}} = 3$ м и при различных $V_{\text{пс}}$

На рис. 6 представлены зависимости максимального нагрева участка Tk , на котором находится подвижной состав при условии $l_{\text{общ}} = 3$ м, $i = 40$. Расчет производился также для четырех вариантов скоростей подвижного состава.

Как можно увидеть, участок № 5, которому сообщалось максимальное количества тепла (рис. 5), нагревается всего на 8 °С (рис. 6), что не приведет к расплавлению провода и выходу из строя контактной сети [24].

С учетом вышесказанного можно сделать вывод, что благодаря использованию УИС КС [21] прохождение нейтральной вставки на ВСМ возможно с поднятым токоприемником без последствий для КС, подвижного состава, а также чужого имущества благодаря снижению тока момента отрыва токоприемника от фазного провода.

Стоимость УИС КС напрямую зависит от стоимости формирования ступенчатых сопротивлений на контактом проводе и по предварительным

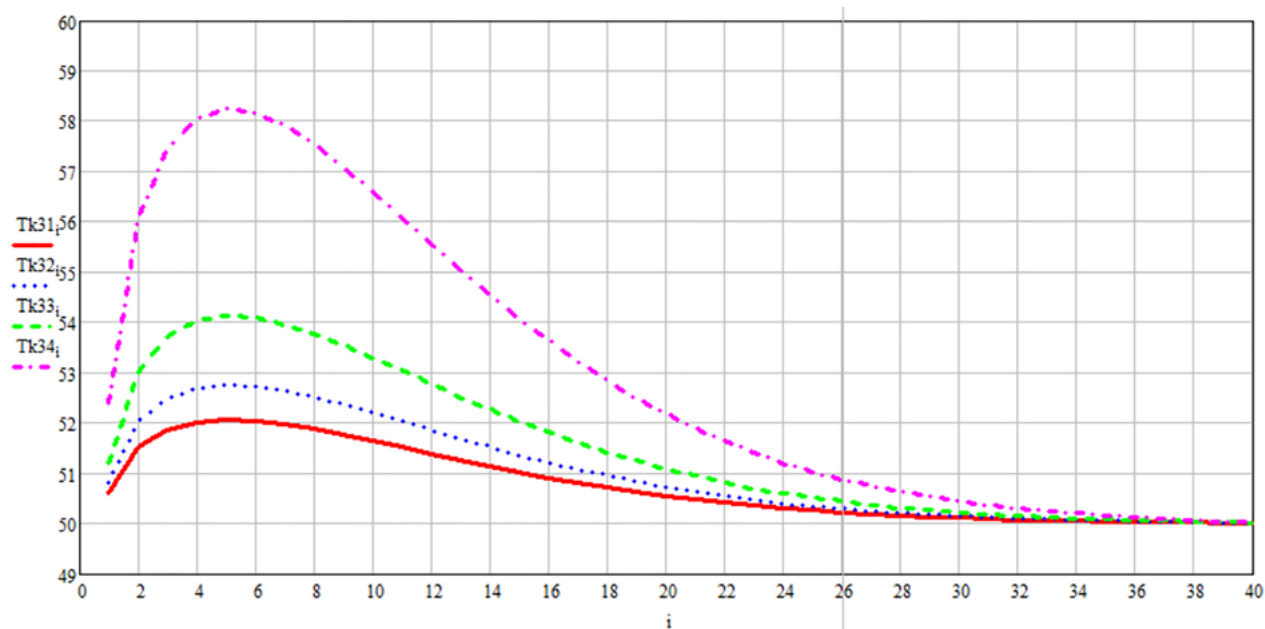


Рис. 6. Максимальные температуры i -тых участков T_k при максимальных Q на i -тых участках

расчетам должна составлять в 3–5 раз больше, чем аналогичная длина обычного контактного провода. Общая длина УИС КС составляет 3 м, а следовательно, на нейтральную вставку суммарно понадобится 6 м контактного провода со ступенчатыми сопротивлениями. В итоге на фоне общей стоимости строительства контактной сети это будет незначительное удорожание процесса. В большей мере удорожание за счет использования УИС КС будет заметно при модернизации старых контактных подвесок.

В любом из перечисленных случаев будет решена главная проблема — высокие экономические потери при обрыве контактного провода по причине пережога во время движения по ВСМ с поднятым токоприемником.

Выводы

1. Экономические потери напрямую зависят от качества контактной сети и качества электроэнергии, которая передается по ней.
2. При сближении ВЛ и КС сильно проявляется электромагнитное влияние, которое является источником электрических потерь.

3. ММК призван решить проблему негативного электромагнитного влияния КС на ВЛ за счет автоматизации процесса монтажа, а также благодаря использованию шестишаговой трансформации.

4. Данное решение позволит существенно снизить экономические потери, благодаря чему окупаемость ММК составит 3–4 года.

5. На ВСМ существует проблема пережога контактного провода при прохождении нейтральной вставки с поднятым токоприемником, что ведет к большим экономическим потерям, вплоть до выхода из строя участка железной дороги и нанесения вреда чужому имуществу.

6. Решить проблему пережога КП призвано УИС КС, которое представляет собой набор ступенчатых сопротивлений, расположенных на крайних частях фазных проводов.

7. Найденные участки с максимальным количеством тепла и максимальные температуры нагрева этих участков позволяют сделать вывод об отсутствии пережога контактного провода, выхода из строя контактной сети и сохранении иного имущества.

8. Использование УИС КС позволит снизить экономические потери от пережога контактного провода, соответствующего выхода из строя контактной сети и/или подвижного состава, чужого имущества.

Библиографический список

1. Истомин С. Г. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — Вып. 3. — С. 387–396. — DOI: 10.20295/1815-588.
2. Истомин С. Г. Методология интеллектуального контроля потребления электроэнергии тягового подвижного состава железных дорог с учетом влияния изменяющихся в реальном времени параметров системы тягового электроснабжения и графиков движения поездов / С. Г. Истомин, К. И. Доманов, А. П. Шатохин и др. // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 18 ноября 2022 года. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 480–490.
3. Дементьев А. П. Унификация первичных форм учета расхода электроэнергии в моторвагонном подвижном составе / А. П. Дементьев, И. Н. Спицына, А. А. Прудников и др. // Инновации в жизнь. — 2020. — № 1(32). — С. 17–23.
4. Дрожжина И. В. Оптимизация расходов электроэнергии моторвагонным подвижным составом за счет совершенствования системы планирования затрат электроэнергии / И. В. Дрожжина, А. А. Прудников, В. С. Голавский // Управленческий учет. — 2022. — № 8-2. — С. 258–265. — DOI: 10.25806/uu8-22022258-265.
5. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС РФ, 2002. — 637 с.
6. Карпов И. П. Расчеты электрического и магнитного влияния тяговой сети системы 25 кВ в послеаварийный период / И. П. Карпов // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2020. — № 2. — С. 6–11.
7. Бодров П. А. Моделирование электромагнитного влияния контактной сети в схеме замещения воздушной линии электропередачи / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1(69). — С. 119–125.
8. Пат. 2701601 Российская Федерация. Устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, Д. В. Семенова и др. Бюл. № 28
9. Зильберман С. М. Транспозиция линий электропередачи и ее неожиданный эффект / С. М. Зильберман, Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов и др. // Электричество. — 2006. — № 5. — С. 11–16.
10. СП 226.1326000.2014. Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. — М., 2014.
11. Бадер М. П. Автоматизация монтажа проводов высоковольтной линии тягового электроснабжения на переменном токе / М. П. Бадер, А. А. Куликов // Электротехника. — 2022. — № 9. — С. 2–7. — DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2.
12. Пат. 2460654 Российская Федерация. Устройство транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, В. И. Карпенко и др. Бюл. № 25.
13. Бадер М. П. Меры защиты воздушных линий от воздействия контактной сети переменного тока / М. П. Бадер, Е. Ю. Семенова, А. А. Куликов // Энергетические системы. — 2022. — № 1. — С. 38–45. — DOI 10.34031/ES.2022.1.004.
14. Бадер М. П. Перспективные решения Для воздушных высоковольтных линий железнодорожного транспорта, электрифицированных на переменном токе / М. П. Бадер, Е. Ю. Семенова, А. А. Куликов // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2021: материалы Международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. Том 1. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2021. — С. 275–279.

15. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. — URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/24/_V_Bashkirii_raskryli_seriu_xischenij_provodov_LEP/ (дата обращения: 20.10.2023).

16. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/18/Kabely_ukrali_zhiteli_saxalinskogo_sela_10_dnej_zh/ (дата обращения: 20.10.2023).

17. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/04/06/_Ukravshego_kabelya_na_55 mln_rublej_zhitelya_Nori/ (дата обращения: 20.10.2023).

18. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286. М., 2011.

19. Марквардт К. Г. Контактная сеть / К. Г. Марквардт, И. И. Власов. — М.: Транспорт, 1977. — 3-е издание. — 272 с.

20. Беляев И. А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении / И. А. Беляев. — М.: Транспорт, 1989. — 143 с.

21. Патент 2533768 Российская Федерация. Устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Д. В. Семенова, В. И. Карпенко, Ю. В. Иодко и др. — 2006. — Бюл. № 31.

22. Шевлюгин М. В. Повышение эффективности высокоскоростной контактной подвески на переменном токе / М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова // Электричество. — 2021. — № 5. — С. 39–43. — DOI: 10.24160/0013-5380-2021-5-39-43.

23. Шевлюгин М. В. Расчет ступенчатых сопротивлений для высокоскоростной магистрали / М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова, А. А. Куликов // Кабели и провода. — 2023. — № 3(401). — С. 15–21. — DOI: 10.52350/2072215X_2023_3_15.

24. Ли В. Н. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода / В. Н. Ли, А. И. Кондратьев, Е. В. Муромцева и др. // Дефектоскопия. — 2003. — № 12. — С. 32–38.

Дата поступления: 18.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, проф.; mx_sh@mail.ru

КУЛИКОВ Андрей Андреевич — аспирант; andrey.kulikov.1997@mail.ru

СЕМЕНОВА Дарья Владимировна — аспирант; semenovadar.ya@mail.ru

Reduction of Economic Losses in the Contact Network and Overhead Lines Electrified with Alternating Current

M. V. Shevlyugin, A. A. Kulikov, D. V. Semenova

Russian University of Transport (MIIT), 9/9, Obraztsova St., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Shevlyugin M. V., Kulikov A. A., Semenova D. V. Reduction of Economic Losses in the Contact Network and Overhead Lines Electrified with Alternating Current // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 975–986. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-975-986

Summary

Purpose: To reduce economic losses in the contact network (CN) and overhead lines (OL) electrified with alternating current. The existing electromagnetic influences on the alternating current railway lead to significant economic losses. Additionally, there is a problem of the contact wire (CW) burnout during the passage of a neutral section with a raised pantograph under voltage on a high-speed railway line (HSRL). CW burnout leads to failure of the contact network, repair costs, possible damage to other people's property and rolling stock. As a whole, all this represents significant economic losses. **Methods:** The analysis of material and time costs for the elimination of problems that arise due to the CW burnout or due to the use of manual labor during the installation of OL has been carried out, in comparison with the proposed solutions to reduce economic losses.

Results: In solving the problem of the negative electromagnetic influence of the contact line (CL) on the OL, a mobile mechanized complex (MMC) is designed to help, which performs the transposition of the OL wires in 6 steps with scrolling by 60° each support. This method will allow us to place the OL wires equidistantly from the contact wire. Scrolling with once-per-support frequency will align the asymmetry of the linear electrical parameters. All in all, MMC performs installation in an automated mode. The problems of the CW burnout can be reduced by the insulating coupling device (ICD) of the CL. ICD CL is a set of step resistances, which are located at the outer sections of the phase wires before and after the neutral section. It is aimed at reducing the current to a safe value, which will not lead to the contact wire burnout, failure of the CN and/or rolling stock and possible damage to other people's property. **Practical significance:** The result is a set of measures in the form of MMC to reduce economic losses in overhead lines from the influence of CN and ICD CL to reduce losses in the contact network by maintaining the operability of the contact wire.

Keywords: Transposition, six-step transposition, installation complex, electromagnetic influence, asymmetry, burnout, contact wire, insulating coupling device, step resistances, overhead line, contact network

References

1. Istomin S. G., Perestenko A. E. Otsenka sostavlyayushchikh poter' elektroenergii elektropodvizhnym sostavom i ustroystvami elektrosnabzheniya [Assessment of the components of electricity losses by electric rolling stock and power supply devices]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, Iss. 3, pp. 387–396. DOI: 10.20295/1815-588. (In Russian)
2. Istomin S. G., Domanov K. I., Shatokhin A. P. et al. Metodologiya intellektual'nogo kontrolya potrebleniya elektroenergii tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznikh dorog s uchetom vliyaniya izmenyayushchikhsya v real'nom vremeni parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i grafikov dvizheniya poezdov [Methodology for intelligent control of electricity consumption of traction rolling stock of railways, taking into account the influence of real-time changing parameters of the traction power supply system and train schedules]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII vserossiyskoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Omsk, 18 noyabrya 2022 goda* [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of the VII All-Russian scientific and technical conference with international participation, Omsk, November 18, 2022]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 480–490. (In Russian)
3. Dement'ev A. P., Spitsyna I. N., Prudnikov A. A. et al. Unifikatsiya pervichnykh form ucheta raskhoda elektroenergii v motorvagonnom podvizhnym sostave [Unification of primary forms of accounting for electricity consumption in multi-unit rolling stock]. *Innovatsii v zhizn'* [Innovations in life]. 2020, Iss. 1(32), pp. 17–23. (In Russian)
4. Drozhzhina I. V., Prudnikov A. A., Golavskiy V. S. Optimizatsiya raskhodov elektroenergii motorvagonnym podvizhnym sostavom za schet sovershenstvovaniya sistemy planirovaniya zatrat elektroenergii [Optimization of electricity costs of multi-unit rolling stock by improving the system for planning electricity costs]. *Upravlencheskiy uchet* [Management Accounting]. 2022, Iss. 8-2, pp. 258–265. DOI: 10.25806/uu8-22022258-265. (In Russian)
5. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2002, 637 p. (In Russian)
6. Karpov I. P. Raschety elektricheskogo i magnitnogo vliyaniya tyagovoy seti sistemy 25 kV v posleavariynnyy period [Calculations of the electrical and magnetic influence of the traction network of a 25 kV system in the post-accident period]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2020, Iss. 2, pp. 6–11. (In Russian)
7. Bodrov P. A., Zharkov Yu. I., Semenov Yu. G. et al. Modelirovanie elektromagnitnogo vliyaniya kontaktной seti v skheme zameshcheniya vozduzhnoy linii elektroperedachi [Modeling of the electromagnetic influence of the contact network in the equivalent circuit of an overhead power line].

Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2018, Iss. 1(69), pp. 119–125. (In Russian)

8. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Semenova D. V. et al. *Ustroystvo montazha transpozitsionnoy geometrii provodov vozduшной vysokovol'tnoy linii elektrosnabzheniya s povyshennoy simmetriey pogonnykh elektricheskikh parametrov linii, nakhodyashcheyся v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktной сети zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Device for mounting the transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified on alternating current]. Patent RF, no. 2701601, 2019. (In Russian)

9. Zil'berman S. M., Krasil'nikova T. G., Manusov V. Z. *Transpozitsiya linii elektroperedachi i ee neozhidannyi effekt* [Transposition of power lines and its unexpected effect]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2006, Iss. 5, pp. 11–16. (In Russian)

10. *SP 226.1326000.2014. Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebiteley. Pravila proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii* [SP 226.1326000.2014. Power supply to non-traction consumers. Rules for design, construction and reconstruction]. Moscow, 2014. (In Russian)

11. Bader M. P., Kulikov A. A. *Avtomatizatsiya montazha provodov vysokovol'tnoy linii tyagovogo elektrosnabzheniya na peremennom toke* [Automation of installation of wires of a high-voltage line of traction power supply on alternating current]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 2–7. DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2. (In Russian)

12. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Karpenko V. I. et al. *Pat. Rossiyskaya Federatsiya. Ustroystvo transpozitsionnoy geometrii provodov vozduшной vysokovol'tnoy linii elektrosnabzheniya s povyshennoy simmetriey pogonnykh elektricheskikh parametrov linii, nakhodyashcheyся v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktной сети zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Design of transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with

increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified with alternating current]. Patent RF, no. 2460654, 2012. (In Russian)

13. Bader M. P., Semenova E. Yu., Kulikov A. A. *Mery zashchity vozduşnykh liniy ot vozdeystviya kontaktной сети peremennogo toka* [Measures to protect overhead lines from the influence of the AC contact network]. *Energeticheskie sistemy* [Energy systems]. 2022, Iss. 1, pp. 38–45. DOI 10.34031/ES.2022.1.004. (In Russian)

14. Bader M. P., Semenova E. Yu., Kulikov A. A. *Perspektivnye resheniya Dlya vozduşnykh vysokovol'tnykh liniy zheleznodorozhnogo transporta, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Promising solutions for overhead high-voltage lines of railway transport, electrified with alternating current]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2021: materialy Mezhdunarodnoy-nauchno prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 09–10 noyabrya 2021 goda. Tom 1* [Transport of Russia: problems and prospects — 2021: materials International scientific and practical conference, St. Petersburg, November 09–10, 2021, vol. 1]. St. Petersburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2021, pp. 275–279. (In Russian)

15. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/24/_V_Bashkirii_raskryli_seriu_xischenij_provodov_LEP/ (accessed: October 20, 2023).

16. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/18/Kably_ukrali_zhiteli_saxalinskogo_sela_10_dnej_zh/ (accessed: October 20, 2023). (In Russian)

17. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/04/06/_Ukravshego_kablya_na_55 mln_rublej_zhitelya_Nori/ (accessed: October 20, 2023).

18. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdeny Prikazom Mintransa*

Rossii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286 [Rules for technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 № 286]. Moscow, 2011. (In Russian)

19. Markvardt K. G., Vlasov I. I. *Kontaktная set'* [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 1977, 3rd edition, 272 p. (In Russian)

20. Belyaev I. A. *Ustroystvo i obsluzhivanie kontaktnoy seti pri vysokoskorostnom dvizhenii* [Construction and maintenance of contact networks for high-speed traffic]. Moscow: Transport, 1989, 143 p. (In Russian)

21. Semenova D. V., Karpenko V. I., Iodko Yu. V. et al. *Ustroystvo izoliruyushchego sopryazheniya kontaktnoy seti i neytral'noy vstavki dlya vysokoskorostnykh magistralei zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Device for an insulating interface between a contact network and a neutral insert for high-speed railway lines electrified with alternating current]. Patent RF, no. 2533768, 2006. (In Russian)

22. Shevlyugin M. V., Semenova D. V. *Povyshenie effektivnosti vysokoskorostnoy kontaktnoy podveski na peremennom toke* [Increasing the efficiency of high-speed contact suspension on alternating current]. *Elektrichestvo*

[Electricity]. 2021, Iss. 5, pp. 39–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-5-39-43. (In Russian)

23. Shevlyugin M. V., Semenova D. V., Kulikov A. A. *Raschet stupenchatykh soprotivleniy dlya vysokoskorostnoy magistrali* [Calculation of step resistances for a high-speed line]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2023, Iss. 3(401), pp. 15–21. DOI: 10.52350/2072215X_2023_3_15. (In Russian)

24. Li V. N., Kondrat'ev A. I., Muromtseva E. V. et al. *Mekhanizmy razuprochneniya i razrusheniya kontaktnogo provoda* [Mechanisms of softening and destruction of contact wire]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 2003, Iss. 12, pp. 32–38. (In Russian)

Received: October 18, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Maxim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; mx_sh@mail.ru

Andrey A. KULIKOV — Postgraduate Student; andrey.kulikov.1997@mail.ru

Darya V. SEMENOVA — Postgraduate Student; semenovadar.ya@mail.ru