

СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ОДНОФАЗНО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ЛИНИИ СВЯЗИ¹

*В.Н. Лившиц, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН, д.э.н., профессор, livchits@isa.ru;
О.А. Шорин, Генеральный директор ООО «НСТТ», д.т.н., профессор, oshorin@gmail.com*

УДК 621.391

Аннотация. В статье решается проблема оценки влияния токов в железнодорожной контактной сети на близлежащие линии связи, когда имеет место негативный внешний неоднородный системный эффект, величину которого надо уметь рассчитывать, ограничивать до допустимых пределов и оптимизировать по экономическим критериям. Исследование данной проблемы началось в нашей стране еще с 60-х гг., но до настоящего времени методические вопросы оценки влияния помех со стороны контактных линий на сети связи является актуальной.

Ключевые слова: железнодорожная контактная сеть; помехи; негативный внешний неоднородный системный эффект; значения индуцированных электродвижущих сил на концах линии связи.

SYSTEM-ANALYTICAL APPROACH TO THE ESTIMATION OF THE MAGNETIC INFLUENCE OF THE RAILWAY CONTACT NETWORK OF A SINGLE-PHASE-AC VOLUME ON THE COMMUNICATION LINE

*Veniamin Livshits, Chief researcher, FRCCSC, doctor of economics, professor;
Oleg Shorin, General director of LLC «NXTT», doctor of technical science.*

Annotation. The article solves the problem of assessing the influence of currents in the railway contact network on nearby communication lines when there is a negative external heterogeneous system effect, the magnitude of which should be calculated, limited to acceptable limits and optimized by economic criteria. The study of this problem began in our country since the 60s, but to date, the methodological issues of assessing the impact of interference from the contact lines on the communication network is relevant.

Keywords: railway contact network; interference; negative external heterogeneous system effect; values of induced electromotive forces at the ends of the communication line.

Введение

Речь пойдет о непростом, можно сказать революционном периоде технической жизни нашей страны второй половины пятидесятых годов, когда на железных дорогах стала активно внедряться новая более прогрессивная система электрификации вместо постоянного тока на однофазном почти на порядок более повышенного напряжения переменном токе в контактной сети с использованием выпрямительных электровозов. Эти электровозы были более эффективны, чем другие типы электровозов на переменном токе (моторгенераторные, например, усиленно лоббировавшиеся тогда в институте электродинамики академиком М.П. Костенко [20] и в институте комплексных транспортных проблем АН СССР) по большинству технико-экономических транспортных показателей, но имели значительный негатив в сфере электросвязи – представляли собою для контактной сети нелинейную несинусоидальную нагрузку. По этой причине возникавшие в контактной сети токи и волновые процессы в окружающем железную

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №№17-06-00058, 17-06-00041).

дорогу пространстве создавали в свою очередь мощное несинусоидальное электромагнитное поле, наводившее в близлежащих воздушных и кабельных линиях связи сильные препятствующие информационным целям и опасные для их участников помехи, требовавшие немалых инвестиций для защиты от них и резко снижавшие порою до нуля и даже ниже эффективность электрификации на переменном токе, особенно при неверном уровне определения помех. А это тогда часто имело место, так как определение мешающего влияния на связевых приемниках обычно производилось с нарушением принципов системного анализа – отдельно и приближенно рассматривались процессы в контактной сети, и затем отдельно и независимо в сети связи. Так делалось даже в самой продвинутой научной статье (А. Снарский, 1957), в которой, как и в других работах неадекватно предполагалось постоянство величины силы тока (эффективного его значения) в различных точках контактной сети, но зато адекватно моделировалась линия связи (кабель) как длинная электрическая линия с распределенными параметрами.

Естественно позже возникла идея провести системный расчет оценки мешающего влияния для более точно определенных процессов в контактной сети и их влияния на линии связи со взаимоувязкой волновых процессов в них обеих, рассматривая обе системы как длинные линии и совместно. Именно такой системный расчет величин напряжения U_A и U_D на конечной электросвязевой нагрузке при различных ее величинах и схемах подключения был выполнен в конце 50-х гг. в Институте комплексных транспортных проблем при Госплане СССР и опубликован в обширной статье (Лившиц, 1960), значительно сокращенный вариант которой и приводится ниже (**Задача**) в данной статье после рассмотрения таких некоторых системных аспектов транспорта – неотъемлемых элементов методологии системного анализа – как структуризация системных эффектов в транспортных проектах, системное моделирование и алгоритмизация соответствующих процессов. Поскольку полная величина, возникающего в сложных транспортных системах, эффекта состоит из трех составляющих: внутреннего (прямого) эффекта, внешнего (косвенного) эффекта и эффектов взаимодействия объектов (системных синергических эффектов), и при этом первые два вида эффектов в транспортных системах достаточно хорошо были изучены и изложены в отраслевой профессиональной литературе, то ниже акцент будет сделан на третью составляющую – эффекты взаимодействия (главное – их моделирование и алгоритмизация). В связи с этим представляется полезным ввести (конечно, с определенной степенью условности) некоторую классификацию таких синергических эффектов, *например, делить их на:*

- **внутренние**, когда эффекты взаимодействия возникают между объектами, входящими в рассматриваемую транспортную систему, и **внешние**, когда эффекты взаимодействия возникают между объектами транспорта и не входящими в его рассматриваемую систему;
- **однородные**, когда эффекты взаимодействия возникают между объектами одинаковой «природы» (например, между транспортными или, в более общем случае, производственными объектами), и **неоднородные**, когда эти эффекты возникают между транспортными и нетранспортными объектами (к примеру влияние входящих в систему транспортных объектов на относительно самостоятельные внетранспортные – экологические, социальные, информационные и др.);
- **негативные**, когда эффекты взаимодействия снижают народнохозяйственную (общественную) и/или коммерческую эффективность рассматриваемой транспортной системы, и **позитивные**, когда они ее/их повышают;
- **и т. д.**

Конечно, учет различных видов синергических эффектов опирается как на общие принципы системного анализа, так и на многие профессиональные транспортные «детали». И те, и другие, естественно, должны учитываться при конкретном прикладном

системном анализе реальных транспортных ситуаций. Рассмотрим, как это осуществлялось при решении ряда задач с различными типами системных транспортных эффектов – внешними и внутренними, неоднородными и однородными.

Задача. Оценка влияния железных дорог, электрифицированных на однофазном переменном токе, на близлежащие линии связи.

В соответствующем периоде (50-60-е гг.) решение указанной задачи было очень актуально (Тихменев, 1958 [3]), так как тогда в нашей стране после очень удачного опыта такой электрификации в SNCF во Франции (Bouckel, 1942 [1]; Nouvion [2], 1951) на магистральном железнодорожном транспорте СССР тоже стало в массовом порядке осуществляться широкомасштабное внедрение этой новой прогрессивной системы электрической тяги на однофазном переменном токе промышленной частоты высокого напряжения при использовании выпрямительных электровозов. Сегодня – в начале XXI века актуальность этой задачи по-видимому сохраняется в нашей стране из-за намечаемого интенсивного развития систем магистральных транспортных коридоров и высокоскоростных железных дорог, рядом и параллельно с которыми нередко расположены линии связи. Наряду со многими чисто транспортными технико-экономическими преимуществами (благодаря им эта система однофазной электрификации железных дорог на переменном токе высокого напряжения и получила интенсивное развитие за рубежом, прежде всего и не только во Франции, а затем и в ряде других стран, включая СССР) одним из основных недостатков этой прогрессивной системы было сильное мешающее влияние токов в контактной сети на близлежащие линии связи (особенно при использовании, что было технически и экономически целесообразно, относительно более мощных электровозов выпрямительного типа с их весьма нелинейной токовой нагрузкой и широким спектром составляющих частот – гармоник тока). Помехи особенно усиливались в связи с тем, что и контактная сеть, и линия связи – это взаимосвязанные электрические системы с распределенными параметрами, в которых наблюдаются сильные резонансные явления, т. е. резкое усиление (по некоторым гармоникам в несколько десятков раз (Лившиц, Матвеева 1957; Лившиц 1960 [12, 14]) силы тока в контактной сети и соответствующей амплитуды электродвижущей силы, наведенной в линии связи резонирующей составляющей тока выпрямительного электровоза. Тем самым на приемниках связи может возникнуть заметный физиологически опасный и психофизически вредный уровень напряжения. Таким образом имеет место **негативный внешний неоднородный системный эффект**, величину которого надо уметь рассчитывать, ограничивать до допустимых пределов и оптимизировать по экономическим критериям, тем более что защитные устройства (например, надежное каблирование линий связи) заметно удорожали проект и снижали его преимущества по сравнению с альтернативным вариантом – электрификацией железных дорог по традиционной для СССР системе постоянного тока.

Рассмотрим, как следует определять главный технический показатель системного эффекта – уровень наведенного напряжения у приемника связи, на базе которого естественным образом затем проводятся оптимизационные расчеты и определяется эффективность.

Рассмотрим последовательно аналитическое определение этих напряжений при обеих основных схемах питания контактной сети от тяговых подстанций – консольную схему одностороннего питания (рис.1) и схему параллельного двустороннего питания (рис. 2.)

Хотя в практических расчетах для их упрощения часто рассматривают частные случаи короткого замыкания линий связи или работы ее на «холостом ходу» – изолированной на концах, т. е. случаи Z_A и Z_D , равными нулю или бесконечности, но

лучше проанализировать общий случай, когда, как это показано на рис. 1, концы линии связи А и Д аппаратурой соединены с землей через любые комплексные сопротивления Z_A и Z_D . Расположение фрагмента линии связи длиной l_c относительно влияющего участка контактной сети длиной l_n двустороннего питания и расположения на нем выпрямительного электровоза на расстоянии x от тяговой подстанции № 1 приведено на рис. 1.

Полученные по ниже обоснованным уравнениям (11)-(16) для n гармоники эффективные значения индуцированных электродвижущих сил на концах линии связи позволяют путем их соответствующего взвешивания и последующего суммирования легко определять и итоговые опасные и мешающие напряжения в точках А и Д. Такого рода расчеты были проведены в свое время на ЭВМ «Стрела» [12] и они показали, что по сравнению с расчетами без учета взаимодействия резонансных явлений в контактной сети и линиях связи, при использовании уравнений (11)-(16) происходит существенное уточнение величин опасных и мешающих напряжений на подключаемых к линиям связи приемникам. Выбор на основе вариантной оптимизации рациональных защитных средств дает возможность обеспечить эффективность и качество связи с учетом рассматриваемых системных эффектов.

Магнитное влияние контактной сети при одностороннем ее питании

Пусть как это показано на рис. 1, усилительный участок АД телефонной сети имеет длину l_c км, причем пункт В (местонахождение тяговой подстанции) находится на расстоянии l_1 км от начала цепи связи (пункт А), а конец участка питания контактной сети (пункт С) на расстоянии l_2 км от конца цепи связи (пункт Д).

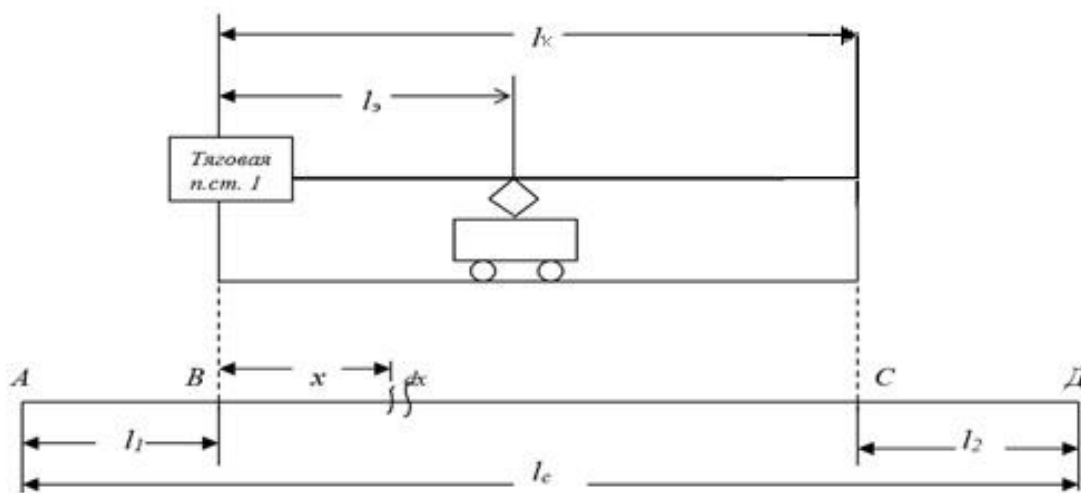


Рисунок 1

Если в элементе контактной сети, отстоящем на x км от тяговой подстанции, протекает переменный ток с амплитудой n -й гармоники i_x , то в соответствующем элементе линии связи наведется на частоте $n\omega$ элементарная электродвижущая сила.

Эффективное значение $d\dot{E}_x$ этой наведенной э.д.с. можно, согласно [20], вычислить по уравнению:

$$d\dot{E}_x = -\frac{jn\omega\lambda r m i_x}{\sqrt{2}} dx, \quad (1)$$

где

λ – коэффициент, характеризующий экранирующее действие рельс на частоте $n\omega$;
 m – коэффициент взаимной индукции между контактным проводом и линией связи, выраженный в $гн/км$;

r – коэффициент защитного действия оболочки кабеля.

Для воздушных линий связи $r=1,0$.

Если принять

$$-\frac{jn\omega\lambda r m i_x}{\sqrt{2}} = C_n. \quad (2)$$

То уравнение (1) переписывается в виде

$$d\dot{E}_x = C_n i_x dx. \quad (3)$$

Следует отметить, что строго говоря C_n также как и значение характеристик силы тока в различных точках линии связи непостоянна, так как коэффициенты λ , m и r , несколько изменяются по модулю и фазе при изменении относительного расположения контактной сети и линии связи, изменении проводимости грунта в различных точках, изменении напряженности поля в оболочке кабеля и т.д. Значение характеристик силы тока, как функции положения электровоза x , установленной в аналитическом виде [14] зависит и от емкости системы «тяговая сеть\земля».

Совершенно строгий аналитический учет всех этих факторов, по-видимому, практически невозможен и поэтому обычно при расчетах принимают некоторые усредненные значения коэффициентов λ , m и r , считая при этом входящую в уравнение (3) величину C_n постоянной.

Рассмотрим различные схемы соединения линии связи.

1. Пусть провод связи изолирован с обеих сторон.

Тогда наведенная в элементе dx линии связи продольная э. д. с. $d\dot{E}_x$ вызовет в точке наведения ток

$$di_x = \frac{d\dot{E}_x}{Z_{Bx1} + Z_{Bx2}}, \quad (4)$$

где Z_{Bx1} и Z_{Bx2} – входные сопротивления однородной линии от участка dx в сторону пункта А и в сторону пункта Д. Если через Z_c обозначить волновое сопротивление линии связи, то при обоих разомкнутых концах

$$Z_{Bx1} = \frac{Z_c}{th_{y_c}(x+l_1)}, \quad (5)$$

и

$$Z_{Bx2} = \frac{Z_c}{th_{y_c}(l_c - x + l_1)}. \quad (6)$$

Приращение напряжения $d\dot{U}_A$ в точке А от действия продольной э. д. с. $d\dot{E}_x$ выразится для рассматриваемого случая в виде:

$$d\dot{U}_A = di_x \frac{Z_{ex1}}{ch_{y_c}(x+l_1)} = \frac{d\dot{E}_x}{\frac{Z_c}{th_{y_c}(x+l_1)} + \frac{Z_c}{th_{y_c}(l_c - x + l_1)}} \times \frac{Z_c}{th_{y_c}(x+l_1) ch_{y_c}(x+l_1)}.$$

После промежуточных алгебраических и тригонометрических преобразований величину $d\dot{U}_A$ можно будет привести к виду

$$d\dot{U}_A = \frac{\dot{E}_x}{chy_c l_c} chy_c [l_c + (l_1 + x)] = \frac{c_n i_x dx}{chy_c l_c} chy_c (l_c - l_1 - x) . \quad (7)$$

Следует отметить, что уравнение (7) отличается от приведенного в [20] выражения $d\dot{U}_A$ только по форме записи, причем это различие вызвано тем, что мы отсчитываем x от тяговой подстанции, а в [20] за начало отсчета принято начало линии связи (точка А).

Если в уравнении (7) заменить $l_1 + x$ на x , то оно примет вид, полностью совпадающий с приведенным в [20] выражением для $d\dot{U}_A$. Поэтому в дальнейшем для разработанных в [20] случаев будем пользоваться приведенными в этой работе формулами для определения $d\dot{U}_A$ и $d\dot{U}_Д$, заменяя в них величину x на $l_1 + x$.

Найдем теперь, согласно (7), результирующее напряжение \dot{U}_A , т.е. опасное напряжение на ближнем конце провода связи:

$$\dot{U}_A = \int_0^{l_1} \frac{c_n i_x}{chy_c l_c} shy_c (l_c - l_1 - x) dx . \quad (8)$$

Если в уравнение (8) подставить полученные ранее значения токов i_x , то с учетом направления наведенных э.д.с. можно записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & \int_0^{l_1} \frac{c_n i_2}{chy_c l_c} shy_c (l_k - l_2 - x) dx \left[\frac{z}{z_g} shy_k x + chy_k x \right] dx - \\ & - \int_{l_1}^{l_k} \frac{c_n i_Д}{chy_c l_c} shy_c (l_k + l_2 - x) \times \left[\frac{z}{z_g} chy_k l_3 + shy_k l_3 \right] \frac{shy_k (l_k - x)}{chy_k (l_k - l_3)} dx . \end{aligned}$$

Если проинтегрировать полученное выражение, то после промежуточных преобразований получим следующую формулу для определения величины $d\dot{U}_A$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & \frac{c_n i_2}{(y_c^2 - y_k^2) shy_c l_c} \left[\frac{z}{z} y_k shy_c (l_k + l_2) + y_c chy_c (l_k + l_2) - y_c chy_c (l_k + l_2 - l_2) \right] \times \\ & \times \frac{\frac{z}{z_g} shy_k l_k + chy_k l_k}{chy_k (l_k - l_3)} - y_k shy_c l_2 \frac{\frac{z}{z_g} chy_k l_k + shy_k l_3}{chy_k (l_k - l_3)} . \quad (9) \end{aligned}$$

Если допустить, что электровоз находится на самом конце консоли, т.е. $l_k + l_3$, то формула (9) немного упрощается:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & \frac{c_n i_2}{(y_c^2 - y_k^2) shy_c l_c} \times \\ & \times \left[\frac{z}{z} y_k shy_c (l_k + l_2) + y_c chy_c (l_k + l_2) - y_c chy_c l_2 \left(\frac{z}{z_g} shy_k l_k + chy_k l_k \right) - y_k shy_c l_2 \left(\frac{z}{z_g} chy_k l_k + shy_k l_k \right) \right] . \quad (10) \end{aligned}$$

При отсутствии в контактной сети волновых процессов, т.е. при $\gamma_k = 0$ из уравнения (10) получаем формулу, приведенную в работе А.А. Снарского

$$\dot{U}_A = \frac{c_n i_2}{y_c \operatorname{sh} y_c l_c} [\operatorname{ch} y_c (l_k + l_2) - \operatorname{ch} y_c l_c] . \quad (11)$$

Приведенные уравнения (9) и (10) дают возможность оценить точность приближенного метода определения влияния на линии связи по эквивалентному току. Выполненные расчеты показали, что в случае, когда электровоз находится на самом конце консоли (или близок к этому), расчет по эквивалентному току дает достаточно точные результаты.

При этом, если определять $i_{\text{нЭКВ}}$ так, как это предлагается в настоящей работе (т.е. исходя из среднего значения амплитуд), мы получаем обычно несколько (в пределах до 5-10%) преуменьшенные значения \dot{U}_A .

Если же $i_{\text{нЭКВ}}$ определяется так, как это рекомендуется в [10], т.е. по действующему значению амплитуд, то мы обычно получаем большие (до 15-20%) значения \dot{U}_A , чем при расчете по уравнению (9). Для резонирующей гармоники достаточно точный результат получается, если принимать при расчетах $k_{cp} = \frac{2}{\pi}$. Если электровоз находится не в конце участка питания, а где-нибудь внутри зоны питания, то, как показали выполненные расчеты, метод эквивалентного тока дает ошибку большую, чем в случае, когда электровоз на самом конце консоли. При этом определение $i_{\text{нЭКВ}}$ по среднему значению амплитуд дает, как правило, меньшую погрешность, чем определение $i_{\text{нЭКВ}}$ по действующему значению амплитуд тока в тяговой сети.

Рассмотрим теперь напряжение на дальнем конце линии связи, т.е. в точке Д.

Согласно [20], можно будет записать:

$$\begin{aligned} d\dot{U}_D &= -\frac{c_n i_x dx}{\operatorname{sh} y_c l_c} \operatorname{sh} y_c (l_1 + x) . & (12) \\ \dot{U}_D &= -\int_0^{l_k} \frac{c_n i_x \operatorname{sh} y_c (l_1 + x)}{\operatorname{sh} y_c l_c} dx = -\int_0^{l_b} \frac{c_n i_2}{\operatorname{sh} y_c l_c} \operatorname{sh} y_c (l_1 + x) \left[\frac{z}{z_g} \operatorname{sh} y_k x + \operatorname{ch} y_k x \right] dx + \int_{l_b}^{l_k} \frac{c_n i_2}{\operatorname{sh} y_c l_c} \operatorname{sh} y_c (l_1 + x) \times \\ &\times \left[\frac{z}{z_g} \operatorname{ch} y_k l_g + \operatorname{sh} y_k l_g \right] \frac{\operatorname{sh} y_k (l_k - x)}{\operatorname{ch} y_k (l_k - l_g)} dx = \frac{c_n i_2}{(y_c^2 - y_k^2) \operatorname{sh} y_c l_c} \left[y_c \operatorname{ch} y_c l_1 - \frac{z}{z_g} y_k \operatorname{sh} y_c (l_1 + y_k \operatorname{sh} y_c (l_k + l_2)) \right. \\ &\left. - \frac{z}{z_g} \frac{\operatorname{ch} y_k l_g + \operatorname{sh} y_k l_g}{\operatorname{ch} y_k (l_k - l_g)} - y_c \operatorname{ch} y_c (l_1 + l_g) \frac{z}{z_g} \frac{\operatorname{sh} y_k l_k + \operatorname{ch} y_k l_k}{\operatorname{ch} y_k (l_k - l_g)} \right] . & (13) \end{aligned}$$

При $l_g = l_k$

$$\begin{aligned} \dot{U}_D &= \frac{c_n i_2}{(y_c^2 - y_k^2) \operatorname{sh} y_c l_c} \left[y_c \operatorname{ch} y_c l_1 - \frac{z}{z_g} y_k \operatorname{sh} y_c l_1 + y_k \operatorname{sh} y_c (l_k + l_1) \times \left(\frac{z}{z_g} \operatorname{ch} y_k l_k + \operatorname{sh} y_k l_k \right) - \right. \\ &\left. - y_c \left(\frac{z}{z_g} \operatorname{sh} y_k l_k + \operatorname{ch} y_k l_k \right) \operatorname{ch} y_c (l_1 + l_k) \right] . & (14) \end{aligned}$$

При $y_k = 0$ получаем формулу, приведенную в [20]

$$\dot{U}_D = \frac{c_n i_2}{y_c \operatorname{sh} y_c l_c} [\operatorname{ch} y_c l_1 - \operatorname{ch} y_c (l_1 + l_k)] . \quad (15)$$

Если в уравнении (14) принять те же условия, что и в [18] (т.е. нагрузка согласована – $z = z_g$ длины линии связи и участка контактной сети равны: $l_c = l_k$ и $l_1 = 0$), то после подстановки в (14) значения i_2 и алгебраических преобразований можно будет из (48) получить формулу, приведенную для этого случая² в работе проф. М.И. Михайлова.

$$\dot{U}_D = \frac{c_n i_2}{y_k^2 - y_c^2} \left[y_k + \frac{y_c (e^{-y_k l_c} - chy_c l_c)}{shy_c l_c} \right].$$

При рассмотрении данных для \dot{U}_A и \dot{U}_D формул может создаться впечатление, что если $y_c = y_k$, то величины U_A и U_D неограниченно возрастают, так как при этом стоящая в знаменателе величина $y_k^2 - y_c^2 = 0$.

В действительности, конечно, никакого неограниченного роста величин U_A и U_D нет, и в этом можно было бы убедиться на практике, если передать сигналы связи по линии с теми же коэффициентами распространения, что и контактная сеть.

При расчетах по уравнениям (9), (10) и (13), (14) для $\gamma_c = \gamma_k$ получается неопределенность типа $\frac{0}{0}$, раскрытие которой по правилу Лопиталья, например, для уравнения (10) дает выражение

$$d\dot{U}_A = \frac{c_n i_2}{2y_c shy_c l_c} \left\{ shy_c l_k (shy_c l_2 + \frac{z}{z_u} chy_c l_2) + y_c l_k [shy_c (l_k + l_2) + \frac{z}{z_g} chy_c (l_k + l_2)] \right\}. \quad (16)$$

Из уравнения (16), справедливого для случая $l_3 = l_k$ и $y_c = y_k$, очевидно, что никакого неограниченного роста величин \dot{U}_A нет.

Аналогично можно показать это и для остальных случаев.

2. Рассмотрим теперь случай, когда один из концов линии связи заземлен. Пусть сначала заземлен дальний конец Д. Тогда согласно [20] можно для напряжения на ближнем конце, т.е. в точке А, записать

$$d\dot{U}_A = \frac{c_n i_2 dx}{shy_c l_c} chy_c (l_2 + l_k - x), \quad (17)$$

и соответственно

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \int_0^{l_3} \frac{c_n i_2}{chy_c l_c} chy_c (l_k + l_2 - x) \left[\frac{z}{z_g} shy_k x + chy_k x \right] dx - \int_{l_3}^{l_k} \frac{c_n i_2}{chy_c l_c} chy_c (l_k + l_2 - x) \times \\ &\times \left[\frac{z}{z_g} chy_k l_3 + shy_k l_3 \right] \frac{shy_k (l_k - x)}{chy_k (l_k - l_3)} dx = \left[\frac{z}{z_g} chy_k l_3 + shy_k l_3 \right] \frac{shy_k (l_k - x)}{chy_k (l_k - l_3)} dx = \\ &= \frac{c_n i_2}{(y_c^2 - y_k^2) chy_c l_c} \left[y_k \frac{z}{z_g} chy_c (l_2 + l_k) + y_c shy_c (l_2 + l_k) - y_k chy_c l_2 \frac{shy_k l_3 + \frac{z}{z_g} chy_k l_3}{chy_k (l_k - l_3)} - \right. \\ &\left. - y_c shy_c (l_2 + l_k - l_3) \frac{chy_k l_k + \frac{z}{z_g} shy_k l_k}{chy_k (l_k - l_3)} \right]. \quad (18) \end{aligned}$$

³ При этом следует в виду, что начало цепи в [18] соответствует у нас концу линии, так как источник гармоник – электровоз – расположен на конце участка.

При $l_3 = l_k$ и $y_k = 0$ получаем известную формулу [20]:

$$\dot{U}_A = \frac{c_n i_2}{y_c ch y_c l_c} [sh y_c (l_2 + l_k) - sh y_c l_2].$$

В данном случае представляет интерес проанализировать также случай $y_c = 0$, т.е. допустить отсутствие волновых процессов в линии связи. Тогда физически понятно, что величина \dot{U}_A должна быть равна суммарной продольной э.д.с. и, следовательно, результаты расчета по уравнению (18) и по методу эквивалентного тока должны совпадать.

Действительно, согласно (18) при $y_c = 0$

$$\dot{U}_A = \frac{c_n i_2}{y_k} \left[\frac{sh y_k l_3 + \frac{z}{z_0} ch y_k l_3}{ch y_k (l_k - l_3)} - \frac{z}{z_0} \right]. \quad (19)$$

Если учесть соотношения (27)-(28), то из приведенного выше выражения (19) непосредственно следует равенство

$$\dot{U}_A = c_n i_{нэв} l_k, \quad (20)$$

т.е. при пренебрежении волновыми процессами в линии связи метод эквивалентного тока дает тот же результат, что и расчет (18).

Магнитное влияние контактной сети при двустороннем (параллельном) ее питании

Пусть теперь заземлена точка А, а мы хотим найти напряжение в точке Д. Используя [20], можно показать, что

$$d\dot{U}_D = -\frac{c_n i_x dx ch y_c (x + l_1)}{ch y_c l_c}, \quad (21)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{U}_D = & -\frac{c_n i_2}{ch y_c l_c} \int_0^{l_3} ch y_c (x + l_1) \left[\frac{z}{z_0} sh y_k x + ch y_k x \right] dx + \frac{c_n i_2}{ch y_c l_c} \int_{l_3}^{l_k} ch y_c (x + l_1) \left[\frac{z}{z_0} ch y_k l_3 + sh y_k l_3 \right] \frac{sh y_k (l_k - x)}{ch y_k (l_k - l_3)} dx = \\ & -\frac{c_n i_2}{ch y_c l_c (y_c^2 - y_k^2)} \left[\frac{z}{z_0} y_k ch y_c l_1 + y_c sh y_c l_1 + \frac{y_c sh y_c (l_1 + l_3) \left(\frac{z}{z_0} sh y_k l_k + ch y_k l_k \right)}{ch y_k (l_k - l_3)} - \frac{y_k ch y_c (l_1 + l_k) \left(\frac{z}{z_0} ch y_k l_3 + sh y_k l_3 \right)}{ch y_k (l_k - l_3)} \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

При $l_3 = l_k$ и $y_k = 0$, то получаем формулу, приведенную в работе А.А. Снарского

$$\dot{U}_D = -\frac{c_n i_2}{y_c ch y_c l_c} [sh y_c (l_1 + l_k) - sh y_c l_1]. \quad (23)$$

Если принять $y_c = 0$, то нетрудно и в этом случае убедиться в том, что при отсутствии волновых процессов в линии связи определение \dot{U}_D по (22) и по эквивалентному току (27) также дает одинаковый результат. Однако это совпадение результатов расчета имеет место только в идеализированном $y_c = 0$.

Будем и в данном рассматриваемом случае параллельного питания тяговой сети, как мы выше и сделали, анализировать общий случай, когда, как это показано на рис. 2, концы линии связи А и Д аппаратурой соединены с землей через любые по величине и фазе комплексные сопротивления Z_A и Z_D .

Расположение фрагмента линии связи длиной l_c относительно влияющего участка контактной сети длиной l_n двустороннего питания и расположение на нем выпрямительного электровоза на расстоянии x от тяговой подстанции № 1 приведено на рис. 2.

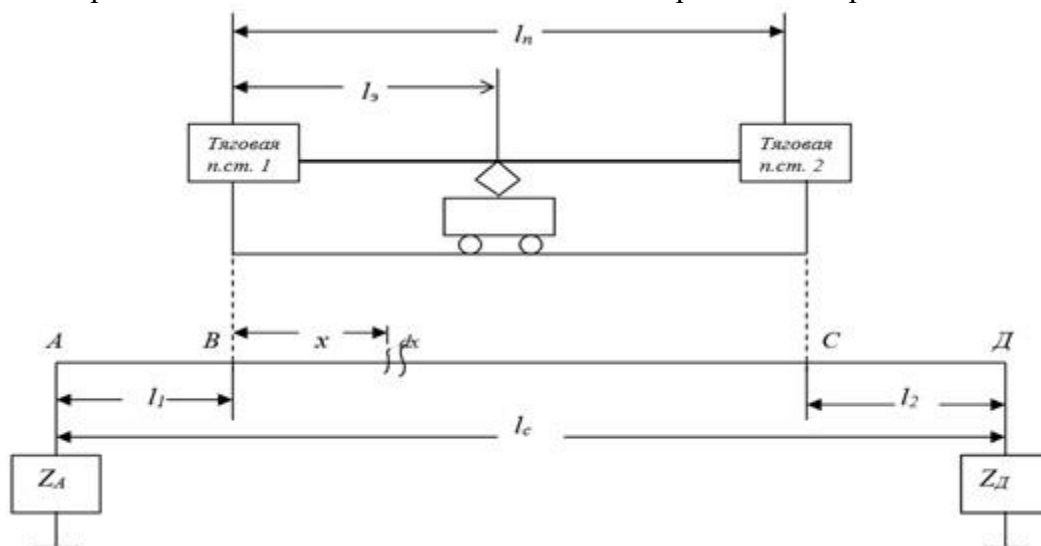


Рисунок 2

Определим чему и в этом случае будут равны приращения напряжений $d\dot{U}_A$ и $d\dot{U}_D$ от наведенной n гармоникой тока электровоза i_x в элементе линии связи dx электродвижущей силы. Эффективное значение $d\dot{E}_x$ этой э.д.с., наведенной на приемнике линии связи в ее концах, т.е. в точках А и Д, можно, также согласно [6] вычислить по нижеследующим уравнениям (24) и (25). Соответствующие их значения $d\dot{U}_A$ и $d\dot{U}_D$ можно на основании уравнений четырехполюсников выразить в виде [14,15]:

$$d\dot{U}_A = d\dot{i}_x [Z_{\text{ex1}} \operatorname{ch} \gamma_c (x+l_1) - Z_c \operatorname{sh} \gamma_c (x+l_1)]; \quad (24)$$

$$d\dot{U}_D = -d\dot{i}_x [Z_{\text{ex2}} \operatorname{ch} \gamma_c (l_c - x - l_1) - Z_c \operatorname{sh} \gamma_c (l_c - x - l_1)]. \quad (25)$$

Подставив в (24) и (25) значения $d\dot{i}_x$, Z_{ex1} и Z_{ex2} , после промежуточных преобразований получим:

$$d\dot{U}_A = \frac{C_n i_x Z_A [Z_D \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_n - x) + Z_c \operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_n - x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) \operatorname{sh} \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) \operatorname{ch} \gamma_c l_c} dx; \quad (26)$$

$$d\dot{U}_D = \frac{C_n i_x Z_D [Z_A \operatorname{sh} \gamma_c (l_1 + x) + Z_c \operatorname{ch} \gamma_c (l_1 + x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) \operatorname{sh} \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) \operatorname{ch} \gamma_c l_c} dx. \quad (27)$$

Следует отметить, что из уравнений (26) и (27) нетрудно получить значения dU_A и dU_D для всех упомянутых частных случаев: при $Z_A = \infty$ и $Z_D = \infty$ получим выражения для изолированной линии связи, при $Z_A = \infty$ и $Z_D = 0$ – выражение для определения $d\dot{U}_A$ при заземленной точке Д и при $Z_A = 0$ и $Z_D = \infty$ – выражение для значения $d\dot{U}_D$ при заземленной точке А.

Согласно (24)-(25) можно записать формулы определения величин \dot{U}_A и \dot{U}_D для рассматриваемого достаточно общего случая:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & \int_0^{l_2} \frac{C_n i_2' Z_A [Z_D \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_{II} - x) + Z_c \operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_{II} - x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) \operatorname{sh} \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) \operatorname{ch} \gamma_c l_c} \times \\ & \times \left[\frac{Z_1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma_k x + \operatorname{ch} \gamma_k x \right] dx - \\ & - \frac{C_n i_2'' Z_A [Z_D \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_{II} - x) + Z_c \operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_{II} - x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) \operatorname{sh} \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) \operatorname{ch} \gamma_c l_c} \times \\ & \times \left[\frac{Z_2}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma_k (l_{II} - x) + \operatorname{ch} \gamma_k (l_{II} - x) \right] dx \end{aligned} \quad (28)$$

Уравнение (28) после громоздких промежуточных преобразований дает следующее значение напряжения на ближнем конце линии связи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & \frac{C_{II} Z_A i_1}{d} \left\{ \frac{g_1}{h} \gamma_c [Z_D \operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_{II}) + Z_c \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_{II})] + \right. \\ & + \frac{g_1}{h} \gamma_k \frac{Z_1}{Z_B} [Z_D \operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_{II}) + Z_c \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_{II})] + \\ & + \frac{f_1}{h} \left[\gamma_c (Z_D \operatorname{ch} \gamma_c l_2 + Z_c \operatorname{sh} \gamma_c l_2) - \gamma_k \frac{Z_2}{Z_B} (Z_D \operatorname{ch} \gamma_c l_2 + Z_c \operatorname{sh} \gamma_c l_2) \right] - \\ & \left. - \gamma_c [\operatorname{ch} \gamma_c (l_2 + l_{II} - l_3) Z_D + Z_c \operatorname{sh} \gamma_c (l_2 + l_{II} - l_3)] \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

где коэффициенты g_1 , f_1 , d и h определяются следующими равенствами:

$$\begin{aligned} g_1 = & \frac{Z_2}{Z_B} \operatorname{ch} \gamma_k (l_{II} + l_3) + \operatorname{sh} \gamma_k (l_{II} + l_3); \\ f_1 = & \frac{Z_1}{Z_B} \operatorname{ch} \gamma_k l_3 + \operatorname{sh} \gamma_k l_3; \\ d = & (\gamma_c^2 - \gamma_k^2) [(Z_c^2 - Z_A Z_D) \operatorname{sh} \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) \operatorname{ch} \gamma_c l_c]; \\ h = & \left(\frac{Z_1 Z_2}{Z_B^2} + 1 \right) \operatorname{sh} \gamma_k l_{II} + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_B} \operatorname{ch} \gamma_k l_{II}; \end{aligned} \quad (30)$$

Аналогично напряжение на дальнем конце линии связи, т.е. в пункте Д, может быть найдено после интегрирования в правой части уравнения (27):

$$\begin{aligned}
\dot{U}_D = & - \int_0^{l_2} \frac{C_n i_2' Z_D [Z_A sh \gamma_c (l_1 + x) + Z_c ch \gamma_c (l_1 + x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) sh \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) ch \gamma_c l_c} \times \\
& \times \left[\frac{Z_1}{Z_B} sh \gamma_k x + ch \gamma_k x \right] dx + \\
& + \int_{l_3}^{l_{II}} \frac{C_n i_2'' Z_D [Z_A sh \gamma_c (l_1 + x) + Z_c ch \gamma_c (l_1 + x)]}{(Z_c^2 + Z_A Z_D) sh \gamma_c l_c + Z_c (Z_A + Z_D) ch \gamma_c l_c} \times \\
& \times \left[\frac{Z_2}{Z_B} sh \gamma_k (l_{II} - x) + ch \gamma_k (l_{II} - x) \right] dx
\end{aligned} \quad (31)$$

Интегрирование дает после промежуточных преобразований следующее значение напряжения \dot{U}_D :

$$\begin{aligned}
\dot{U}_D = & \frac{C_n Z_D i_1}{d} \left\{ \frac{g_2}{h} \gamma_c [Z_A ch \gamma_c (l_1 + l_{II}) + Z_c sh \gamma_c (l_1 + l_{II})] + \right. \\
& + \frac{g_2}{h} \gamma_k \frac{Z_2}{Z_B} [Z_A sh \gamma_c (l_1 + l_{II}) + Z_c ch \gamma_c (l_1 + l_{II})] + \\
& + \frac{f_2}{h} \left[\gamma_c (Z_A ch \gamma_c l_1 + Z_c sh \gamma_c l_1) - \gamma_k \frac{Z_1}{Z_B} (Z_A sh \gamma_c l_1 + Z_c ch \gamma_c l_1) \right] - \\
& \left. - \gamma_c [ch \gamma_c (l_1 + l_3) Z_A + Z_c sh \gamma_c (l_1 + l_3)] \right\}
\end{aligned} \quad (32)$$

В системе соотношений (30) коэффициенты d и h определяются указанными там математическими выражениями, а параметры g_2 и f_2 могут быть найдены следующим образом:

$$\begin{aligned}
g_2 = & \frac{Z_1}{Z_B} ch \gamma_k l_3 + sh \gamma_k l_3; \\
f_2 = & \frac{Z_2}{Z_B} ch \gamma_k (l_{II} - l_3) + sh \gamma_k (l_{II} - l_3).
\end{aligned} \quad (33)$$

Полученные по уравнениям (29) и (32) для n гармоники эффективные значения индуцированных электродвижущих сил на концах линии связи позволяют путем их соответствующего взвешивания и последующего суммирования легко определять и итоговые опасные и мешающие напряжения в точках А и Д. Такого рода расчеты были проведены в свое время на ЭВМ «Стрела» [12] и они показали, что по сравнению с расчетами без учета взаимодействия резонансных явлений в контактной сети и линиях связи при использовании уравнений (29)-(32) происходит существенное уточнение величин опасных и мешающих напряжений на подключаемых к линиям связи приемникам. Выбор на основе вариантной оптимизации рациональных защитных средств дает возможность обеспечить эффективность и качество связи с учетом рассматриваемых системных эффектов.

Хотя в практических расчетах, как указывалось выше, для их упрощения часто рассматривают частные случаи короткого замыкания линий связи или работы ее на «холостом ходу» – изолированной на концах, т. е. случаи Z_A и Z_D , равными нулю или бесконечности, но лучше и при параллельном питании контактной сети проанализировать общий случай, когда,

как это показано на рис. 2, концы линии связи А и Д аппаратурой соединены с землей через любые комплексные сопротивления Z_A и Z_D .

Полученные по уравнениям (29) и (32)-(33) для n гармоники эффективные значения индуцированных электродвижущих сил на концах линии связи позволяют путем их соответствующего взвешивания и последующего суммирования легко определять и итоговые опасные и мешающие напряжения в точках А и Д. Такого рода расчеты были проведены в свое время на ЭВМ «Стрела» [12] и они показали, что по сравнению с расчетами без учета взаимодействия резонансных явлений в контактной сети и линиях связи, при использовании уравнений (11)-(16) происходит существенное уточнение величин опасных и мешающих напряжений на подключаемых к линиям связи приемникам³. Выбор на основе вариантной оптимизации рациональных защитных средств дает возможность обеспечить эффективность и качество связи с учетом рассматриваемых системных эффектов и защитных мероприятий [7, 18].

Заключение

В итоге полезно заметить, что после опубликования фундаментальной статьи [14] в 1960 г. к сожалению указанное в ней корректное аналитическое направление повышения точности расчета влияния на линии связи вопреки ожиданиям существенного развития у нас не получило (нет новых публикаций). Возможно это объясняется как математической непростотой аналитической научной деятельности, особенно если речь идет о сложных сетевых структурах, так и определенной сложностью самих расчетов по полученным зависимостям. А может быть и дело в том, что к сожалению, в построенной у нас после 1991 г. методом шоковой терапии псевдорыночной экономике в стране заметно снизился уровень образования вообще и особенно его инженерно-математического кластера. Правда одна весьма успешная попытка такого расчета была сделана в 1961-1962 гг. – в это время приехавший на обучение в Москве в ВЦ АН СССР аспирант Академии Наук КНР ШИ Чжун Цы по собственной инициативе написал компьютерную программу для весьма быстродействующей по тому времени ЭВМ «БЭСМ-6» и провел на ней большую серию расчетов по всем приведенным выше итоговым формулам и для одностороннего и для двустороннего питания контактной сети. Полученные весьма интересные числовые результаты (они частично потом были включены в [19]) подтвердили и работоспособность программы и изложенной выше теории и ее конечных формул.

Литература

1. Buckel R. Art und Ergebnisse neuerer Untersuchungen über die Beeinflussung von Fernmeldeleitungen der Deutschen Reichsbahn durch Starkstromanlagen. Elektrische Bahnen, Bd. 18, 1942.
2. Nouvion F. Essais et enquetes diriges par la SNCF sur la traction monophasée. Bulletin Societe Francaise Electriciens, 1951. – № 1.
3. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. Трансжелдориздат, 1958.
4. Чернышев М.А. Определение высших гармоник первичного тока вентильного электровоза однофазно-постоянного тока. ЦНИИ МПС, 1951.

³ Вообще говоря, научное внимание к необходимости учета распределенных емкостей контактной сети и возникающих в ней интенсивных резонансных явлений было впервые указано Йоттеном и Лебрехтом в [11]. К сожалению, в этой интересной и полезной статье был допущен ряд математических неточностей, которые вскоре были вскрыты и исправлены в публикациях [12,14] и др. Тем не менее эта статья имела немалый синергический полезный эффект, в том числе тем, что вызвала повышенный интерес к более детальному изучению спектрального состава тока выпрямительных электровозов и условий их резонирования в тяговой сети.

5. Голованов В.А. Определение гармонических составляющих и эквивалентного мешающего тока в контактной сети при работе электровозов с ионными преобразователями. В сб. «Вопросы электрификации железных дорог на однофазном токе». Из-во АН СССР, 1957.
6. Снарский А.А. Влияние контактной сети электрических железных дорог однофазного переменного тока на кабельные линии связи. В «Сборнике статей по железнодорожной автоматике, телемеханике и связи». Трансжелдориздат, 1957.
7. Михайлов М.И., Марков М.В., Разумов Л.Д. Опыты по выявлению влияния электрических железных дорог переменного тока на цепи связи. «Электричество», 1954. – № 4.
8. Круг К.А. Основы Электротехники. Госэнергоиздат, 1952.
9. Баев Н.А. и Удалов А.П. Лекции по теории цепей с сосредоточенными элементами. Связьиздат, 1956.
10. Гантмахер Ф.Р., Теория Матриц.
11. Jotten R. und Lebrecht H. Die Primärströme der Stromrichterlokomotive in Fahrleitungsnetz und Drehstromnetz. ETZ, 1956. – № 7.
12. Лившиц В.Н, Матвеева Н.К. К вопросу об учёте резонансных явлений в контактной сети при работе выпрямительных электровозов. «Электричество», 1959. – № 8.
13. Аверин Ю.А., Карякин Р.Н., Панин А.П. Результаты экспериментального определения спектрального состава первичного тока выпрямительного электровоза. «Тр. ЦНИИ МПС», вып. 156, Трансжелдориздат, 1958.
14. Лившиц В.Н. Резонансные явления в контактной сети и методы их учета при оценке влияния электрической тяги однофазного тока на проводные линии связи. В сб. Электрификация железных дорог. Изд. АН СССР. Вып.3 1960. – С. 186-222.
15. Карякин Р.Н. Оценка величины эквивалентного мешающего тока тяговой сети с учётом резонансных явлений при работе выпрямительных электровозов. «Вестник ВНИИЖТ», 1959. – № 3.
16. Buckel R., Muttelsee W. und Riedel H. Dämpfung von Oberschwingungen in einer 50 Hz Fahrleitung mit Hilfe eines RC Gliedes. Elektrische Bahnen, 1959. – № 8.
17. Михайлов М.И., Купцов Ю.И., Разумов Л.Д. Определение электрических параметров контактной сети однофазного переменного тока. «Вестник ВНИИЖТ», 1957. – № 8.
18. Михайлов М.И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. Связьиздат, 1959.
19. Лившиц В.Н. Исследование некоторых вопросов электрификации железных дорог на однофазном переменном токе промышленной частоты. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Успешно защищена в диссертационном совете факультета электрификации промышленности и транспорта Московского энергетического института 04 ноября 1961 г.
20. Костенко М.П., Нейман Л.Р. и Бландзевич Г.Н. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд-во АН СССР. 1946.