

Кисель Наталья Николаевна – e-mail: nnkisel@sfnedu.ru; тел.: +78634371634; кафедры антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Grishchenko Sergey Grigorievich – Southern Federal University; e-mail: grishchenko@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371883; cand. of eng. sc.; associate professor; director of Institute of Radio Engineering Systems and Control.

Kisel Natalia Nikolayevna – e-mail: nnkisel@sfnedu.ru; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.3

А.В. Шандыбин

МЕТОД АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ

Рассматривается вопрос электромагнитных влияний сети электропитания железнодорожного транспорта на линию связи. Приведен краткий анализ применяемых методов и средств защиты направляющих линий. Рассмотрена необходимость создания устройства, компенсирующего повышенные уровни негативных влияний в кабельных линиях. Во второй части рассмотрены эксплуатационные измерения наводок в кабельных линиях связи, в том числе участка ст. Подкумок – ст. Кисловодск Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Подробно рассмотрена схема измерений и приведены эмпирические значения опасных и мешающих факторов. Рассмотрена возможность определения оптимального порога срабатывания компенсирующего устройства на основе статистического анализа измеренных токов. В третьей части приведена схема и результат измерений спектральных составляющих излучения тока локомотива на примере электровоза 2ЭС6-001. Приведена эмпирическая корреляционная функция, полученная в результате быстрого преобразования Фурье измеренной спектральной плотности. Произведена ее аппроксимация в виде ряда из нормализованных В-сплайнов на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки. В четвертой части рассмотрена упрощенная схема компенсатора наведенных токов. Произведено вычисление импульсной функции данного устройства на основании критерия минимума дисперсии погрешности компенсации с учетом эффективного времени корреляции. Получена и приведена импульсная функция компенсатора, построенная в виде линейной оболочки В-сплайна. В дополнении рассмотрена схема компенсирующего устройства для токов с не нулевым математическим ожиданием и произведен анализ полученных результатов. В заключении сделан вывод о возможности и целесообразности построения устройства компенсации наведенных токов для усиления защищенности кабельных систем электросвязи и, как следствие, повышения безопасности перевозочного процесса железных дорог России.

Наведенные токи; электромагнитная совместимость; функция корреляции; спектральная плотность; В-сплайн; импульсная характеристика; компенсатор.

A.V. Shandybin

METHOD FOR ACTIVE COMPENSATION OF INDUCED CURRENTS

The article deals with electromagnetic influences over communication lines from rail power supply system. A brief analysis of the applied methods and line protection means is carried out. The need to create the device for compensating elevated levels of the negative impact in cable lines was considered. In the second part of the article measurements of interference in cable communication lines are described including the site of Art. Podkumok – Art. Kislovodsk of the North-Caucasian Railway – branch of JSC "Russian Railways". Measurement schemes and empirical values of dangerous and confounding factors were examined in details and given in the article. The possibility of determining the optimal triggering threshold of compensating device was considered based on a statistical analysis of the measured currents. The diagram and the result of

measurements of the spectral components of emission at the example of an electric locomotive 2ES6-001 is given in the third part. Empirical function of correlation is shown. This function is obtained as a result of the fast Fourier transformation of the measured spectral density. Approximation of function as a series of normalized B-spline based on the criterion of minimum of average squared error is done. A simplified diagram of the compensator of induced currents is given in the fourth part. Calculation of the impulse function of this device was done on the basis of the criterion of minimum of variance of compensation error with consideration of the effective correlation time. Approximation of the resulting function was done in the form of a linear span of B-spline. In addition the scheme of the device for currents compensation with not zero expectation is considered. The analysis of the results obtained is done. Finally, the conclusion about the possibility and feasibility of creating the device for compensation of induced currents to enhance security of cable telecommunications systems and, consequently, improve safety of the transportation process of the Russian railways was made.

Induced currents; electromagnetic compatibility; the correlation function; spectral density; B-spline; pulse characteristics; compensator.

Введение. Разработка методов и средств защиты от электромагнитных влияний занимает важное место среди вопросов взаимного функционирования всех видов электронных устройств, направляющих и электропитающих линий [1]. Проблемы электромагнитной совместимости с каждым годом становятся все значимее – возрастают уровни передаваемых и потребляемых токов, увеличивается количество телекоммуникационных устройств и линий связи.

В области железных дорог основным источником негативных электромагнитных влияний являются сети тягового электропитания. При этом подверженными оказываются все кабельные направляющие линии, расположенные вдоль железных дорог. Подобные воздействия вызывают деструктивные процессы в самой линии, а так же могут повредить дорогостоящее телекоммуникационное оборудование.

Снижение частоты аварий является приоритетной задачей для всех разрабатываемых методов обеспечения электромагнитной совместимости железных дорог и смежных систем связи, а также средств защиты кабельных линий от наводимых перенапряжений [1–5].

В настоящее время широко распространены различные пассивные меры защиты. Самым эффективным среди них является увеличение расстояния между влияющей и подверженной влиянию линией, но осуществление этого часто связано с повышенными затратами на строительство и эксплуатацию, а в некоторых случаях просто невозможно [2, 3]. Так же для улучшения защитных свойств рекомендуется использовать современные кабели со специальной броней и защитной оболочкой или с дополнительными экранами [5].

Защита от грозовых разрядов и кратковременных коротких замыканий реализуется с применением различных разрядников, предохранителей и дренажных катушек, срабатывающих при превышении наводимым током определенного порога. Однако при сравнительно долговременных (по сравнению с грозовыми перенапряжениями) коротких замыканиях в тяговой сети они часто выходят из строя. Современные аналоги рассмотрены в [6, 7].

К менее распространенным относятся применение разделительных и редуционных трансформаторов. Разделительные трансформаторы предназначены для разделения двухпроводной линии на несколько гальванически не связанных участков, в результате чего улучшается симметрирование цепи, снижаются коэффициент чувствительности и уровни мешающих влияний. Редуционные трансформаторы направлены на улучшение коэффициента экранирования кабеля, за счет увеличения индуктивного сопротивления кабельной оболочки [3]. Перечисленные методы довольно сложны в реализации.

Со времени разработки рассмотренных защитных мер произошли значительные изменения в сфере технического оснащения железных дорог, а также значительно усложнилась общая электромагнитная обстановка. В результате обострилась проблема недостаточности применения только пассивных методов защиты.

Стала актуальной задача развития активных мер защиты смежных линий от влияния тяговых сетей железных дорог. К таким методам можно отнести изменение системы питания тяговой сети (переход от системы 1х25 кВ к более современным сбалансированным сетям, например к сети с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП)), применение отсасывающих трансформаторов и демпфирующих контуров, а также сглаживающих фильтров и более современных выпрямителей на тяговых подстанциях постоянного тока. Применение отсасывающих трансформаторов и модернизация выпрямителей приводит к значительным затратам на их приобретение, установку и обслуживание [2, 3].

Рассмотренные выше варианты решений весьма трудоемки и не всегда дают желаемого повышения защищенности. Это вызвано спецификой самого явления наведения токов, заключенной в огромном множестве взаимоувязанных факторов, составляющих наводимые токи в каждый момент времени. Невозможность определения всех элементов влияния и отделения одних от других дополнительно осложняют моделирование и создание систем защиты.

Все эти методы защиты в первую очередь направлены на снижение уровня электромагнитной энергии, излучаемой тяговыми сетями, и требуют для своей реализации внесения серьезных изменений в действующие и проектируемые схемы питания. Однако даже такие капитальные мероприятия не всегда могут гарантировать снижение уровня наводимых токов до безопасного уровня. Так, например, при переходе к системе питания с ЭУП максимальное расстояние между тяговыми подстанциями может увеличиваться в два раза. На увеличившийся участок помещается большее количество электроподвижного состава, который вызывает повышенные электромагнитные влияния, что в свою очередь нивелирует защитный эффект от перехода к системе с ЭУП.

В данной работе предлагается система, выполняющая компенсацию повышенных уровней негативных влияний в направляющих линиях.

Метод измерения наведенных токов. В эксплуатационной практике выбор оптимальных методов защиты производится на основе предварительного определения уровней и степени опасности наводимых влияний для каждого конкретного участка [8-10].

С этой целью на основании технического задания субподрядного договора проводились измерения параметров электромагнитного влияния внешних факторов на кабельные линии оперативно-технологической связи ОАО «РЖД» на нескольких постах ЭЦ в штатном режиме работы сети [8].

Среди исследуемых рассматривался участок с односторонним питанием тяговой сети ст. Подкумок – ст. Кисловодск Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Для более протяженных участков такой режим работы считается аварийным и характеризуется опасными уровнями наводимых влияний.

Измерения проводились на посту ЭЦ ст. Подкумок. Объектом испытаний был кабель МКПпАБпШп 7х4х1,05+5х2х0,7+1х0,7 прокладки 2006 г. В качестве испытательного оборудования использовались следующие приборы:

- ◆ токовые клещи АРРА 39Т, зав. № 75500122;
- ◆ мультиметр цифровой АРРА-109N, зав. № 73601401;
- ◆ мультиметр цифровой АРРА-305, зав. № 74202421;
- ◆ псофометр П-323ИШ, зав. № 035694;
- ◆ персональный компьютер с ПО к цифровому мультиметру.

Согласно схеме организации измерений, представленной на рис. 1, токовые клещи подключались на оболочку брони измеряемого кабеля перед входным заземлением. Полученные действующие значения напряжения с выходов токовых клещей снимались мультиметром и заносились специализированной программой в таблицу результатов. Программа позволяла производить автоматизированные измерения с частотой 2 замера в секунду. Одновременно с этим замерялось психометрическое напряжение шума в измеряемом кабеле и напряжение жила-земля, в режиме замыкания этой жилы на противоположном конце на землю.

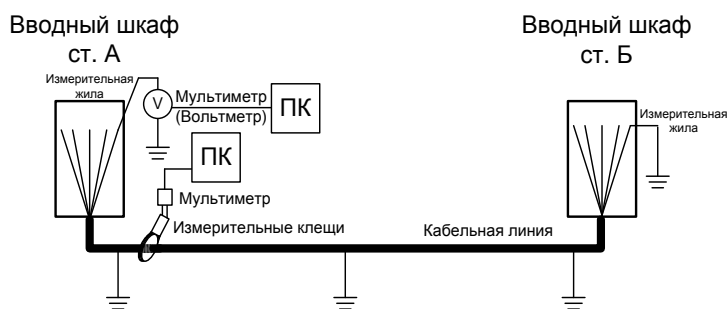


Рис. 1. Структурная схема организации измерений

Испытания проводились в течении более 3 часов. В дальнейшем был произведен пересчет измеренных напряжений в значения наводимых на оболочку кабеля токов. Результаты приведены на рис. 2.

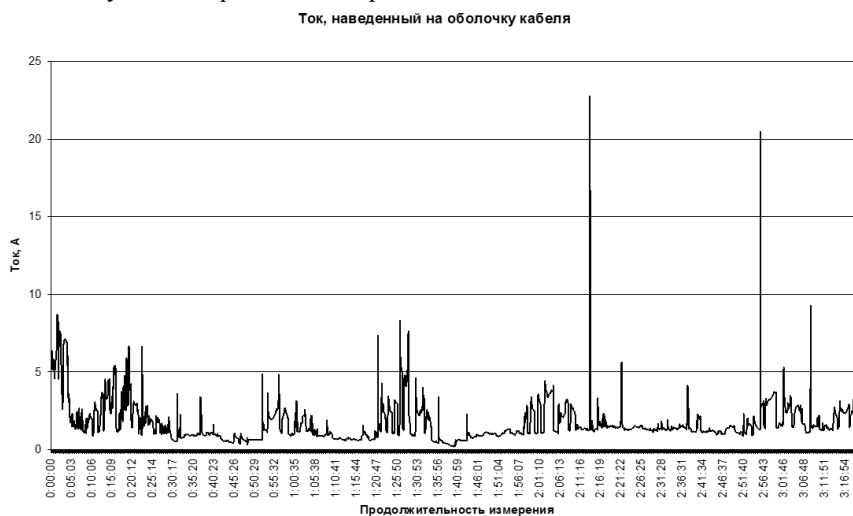


Рис. 2. Опасные и мешающие влияния, наведенные на кабельную линию

По результатам испытаний найдены плотность вероятности токов и соответствующая функция распределения по методике приведенной в работе [11]. Плотность вероятности позволяет обоснованно получить порог срабатывания устройства компенсации.

Построение экспериментальной корреляционной функции. Для осуществления идеи компенсации наведенных токов необходимо иметь корреляционную функцию [12]. Определить ее можно несколькими путями. Рассмотрим один из них.

Измерительная схема определения спектральной плотности наведенных токов приведена на рис. 3 [10].

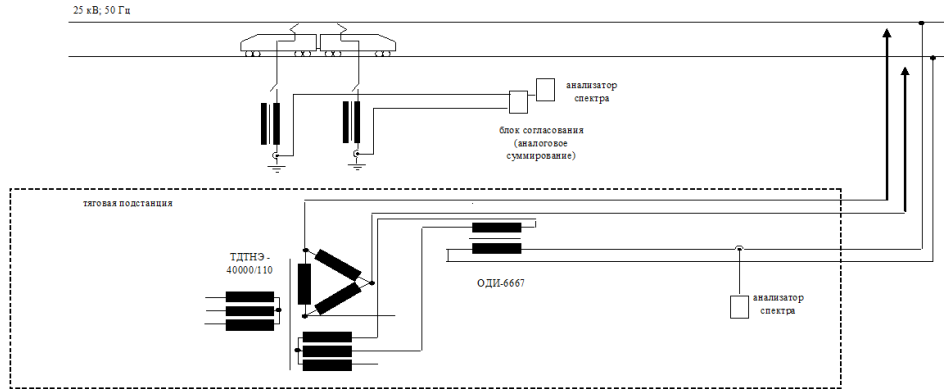


Рис. 3. Схема измерения спектральной плотности

Результат измерений представлен на рис. 4 (прил. 1 в [10]).

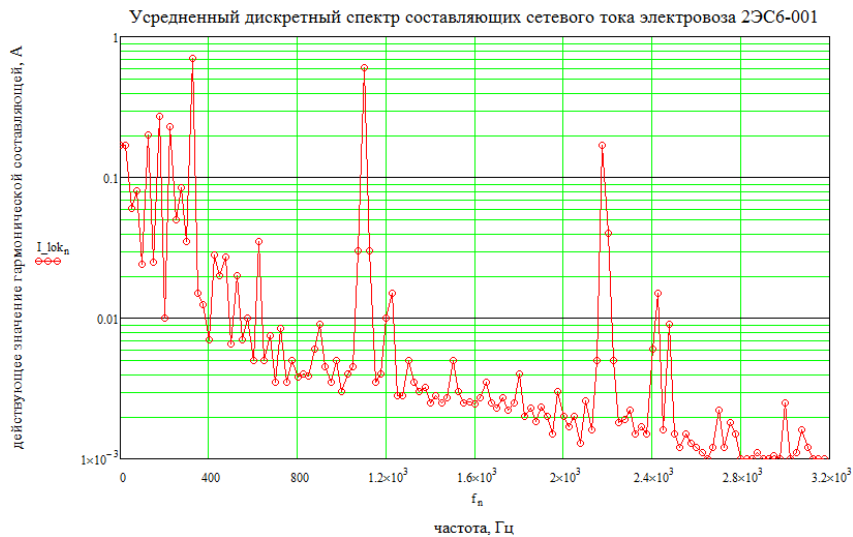


Рис. 4. Спектральная плотность наведенных токов

Примем условие эргодичности случайных процессов [13], описывающих наведенные токи. В соответствии с этой концепцией для случайных стационарных процессов между корреляционной функцией и спектральной плотностью существует связь, определяемая парой преобразований Фурье (1, 2), строго установленная для случайных стационарных процессов А.Я. Хинчиным и Н. Винером [14].

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j\omega\tau} df, \quad (1)$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$; $B(\tau)$ – корреляционная функция; $G(f)$ – спектральная функция плотности.

Экспериментальная корреляционная функция, найденная путем быстрого преобразования Фурье, представлена на рис. 5. Она не имеет аналитического описания, поэтому для дальнейшего исследования представим ее в виде ряда из нормализованных В-сплайнов [15, 16].

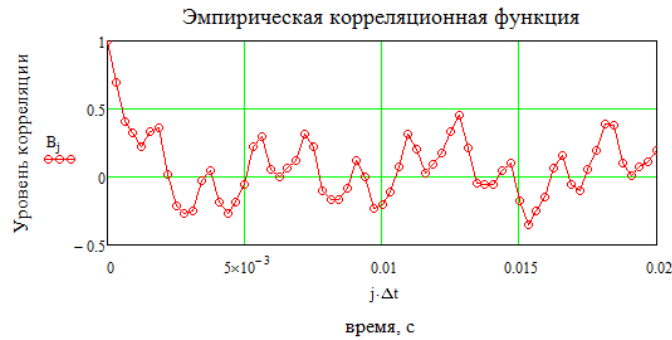


Рис. 5. Эмпирическая корреляционная функция

Аппроксимация экспериментальной функции корреляции. В качестве критерия подобия удобно использовать минимум среднеквадратической ошибки ε корреляционной функции, в виде:

$$\varepsilon[\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_m] = \int_0^T \left(K_\xi(\tau) - \sum_{i=0}^m \Omega_i N_i(\tau) \right)^2 d\tau, \quad (3)$$

где $K_\xi(\tau)$ – эмпирическая функция корреляции; Ω – вектор неизвестных параметров; $N_i(\tau)$ – i -й В-сплайн.

Ошибка ε является функцией от m переменных Ω , поэтому ее минимум находится в стационарной точке, определяемой системой уравнений:

$$\frac{\partial \varepsilon[\Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_m]}{\partial \Omega_j} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получим уравнение:

$$\int_0^T 2 \left(K_\xi(\tau) - \sum_{i=0}^m \Omega_i N_i(\tau) \right) N_j(\tau) d\tau = 0, \quad (5)$$

преобразуя (5), придем к системе уравнений (6):

$$\sum_{i=0}^m \Omega_i \int_0^T N_i(\tau) N_j(\tau) d\tau = \int_0^T K_\xi(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (6)$$

при $j = 0, 1, \dots, m$.

Для дальнейшего преобразования введем обозначения матрицы A и вектора B :

$$A_{i,j} = \int_0^T N_i(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (7)$$

$$B_j = \int_0^T K_\xi(\tau) N_j(\tau) d\tau, \quad (8)$$

при $i, j = 0, 1, \dots, m$.

Окончательно система линейных уравнений приобретет канонический вид

$$\sum_{i=0}^m \Omega_i A_{i,j} = B_j, \quad j = 0, 1, \dots, m, \quad (9)$$

из (9) определяется вектор Ω :

$$\Omega = A^{-1}B. \quad (10)$$

Найденные коэффициенты функции аппроксимации В-сплайном дают минимум среднеквадратичного отклонения и могут быть использованы для генерации устройства компенсации наводимых токов.

Компенсатор. Идея компенсатора основана на подавлении шумовых сигналов и не является абсолютно новой, например в [17] показана адаптивная система компенсации шумовых помех в речи. Наипростейший вариант исполнения компенсатора проиллюстрирован на рис. 6.

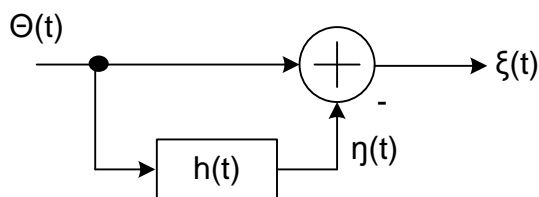


Рис. 6. Структурная схема компенсатора

Из рис. 6 видно, что ядром устройства является преобразователь измерительной информации в компенсирующий ток.

Для нахождения импульсной функции компенсатора определим дисперсию погрешности

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t) - \eta(t))^2], \quad (11)$$

где $\Theta(t)$ – сигнал наведенного воздействия; $\eta(t)$ – компенсирующий ток (противодействие); $\xi(t)$ – погрешность компенсации.

Ток компенсирующего устройства $\eta(t)$ является результатом преобразования наведенного сигнала $\Theta(t)$ устройством компенсации, описываемого линейной системой

$$\eta(t) = \int_0^t h(t - \tau)\Theta(\tau)d\tau, \quad (12)$$

где $h(t - \tau)$ – импульсная функция корректирующего устройства.

Для заданной схемы корректора требуется определить такую импульсную функцию, чтобы минимизировать дисперсию погрешности компенсации (11). В развернутом виде погрешность имеет вид

$$M[\xi(t)^2] = M[(\Theta(t)^2 - 2\Theta(t)\eta(t) + \eta(t)^2)]. \quad (13)$$

Первое слагаемое представляет собой дисперсию наведенного тока $M[\Theta(t)^2] = D_\Theta(t)$, второе – корреляцию:

$$M[\Theta(t)\eta(t)] = \int_0^t h(t - \tau)M[\Theta(t)\Theta(\tau)]d\tau. \quad (14)$$

Третье слагаемое равно [18]

$$M[\eta(t)^2] = \int_0^t \int_0^t h(t - \tau_1)h(t - \tau_2)M[\Theta(\tau_1)\Theta(\tau_2)]d\tau_1d\tau_2. \quad (15)$$

Обозначив ковариационную функцию $M[\Theta(t)\Theta(\tau)] = K_\Theta(t, \tau)$, получим окончательное выражение погрешности:

$$\begin{aligned}
 M[\xi(t)^2] &= D_{\Theta}(t) - 2 \int_0^t K_{\Theta}(t, \tau) h(t - \tau) d\tau + \rightarrow \\
 &\rightarrow + \int_0^t \int_0^t h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) K_{\Theta}(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2.
 \end{aligned} \quad (16)$$

Для определения минимума (16) необходимо найти ее функциональную производную [19, 20]:

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\delta M[\xi(t)^2]}{\delta h(t - \tau)} \right|_{t - \tau = t_{\varepsilon}} &= -2K_{\Theta}(t, t - t_{\varepsilon}) + \rightarrow \\
 \rightarrow + \int_0^t h(t - \tau_1) K_{\Theta}(\tau_1, t - t_{\varepsilon}) d\tau_1 + \int_0^t h(t - \tau_2) K_{\Theta}(\tau_2, t - t_{\varepsilon}) d\tau_2.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Приравнявая (17) к нулю и с учетом эффективного времени корреляции T [14], после преобразования получим интегральное уравнение:

$$\int_{t-T}^t h(t - \tau) K_{\Theta}(\tau, t - t_{\varepsilon}) d\tau = K_{\Theta}(t, t - t_{\varepsilon}). \quad (18)$$

Решение (18), как и ранее, для корреляционной функции будем искать в виде линейной оболочки В-сплайнов [15, 16]:

$$h(\alpha) = \sum_{i=0}^I \Omega_i N_i(\alpha), \quad (19)$$

где I – количество В-сплайнов.

Определим носитель сплайнов $\Delta = \frac{T}{I}$.

Введем обозначения для матрицы a и вектора b :

$$a_{ij} = \int_{t-T}^t N_i(t - \tau) K_{\Theta}(\tau, t - j\Delta) d\tau, \quad i, j = 0, 1, \dots, I \quad (20)$$

$$b_j = K_{\Theta}(t, t - j\Delta). \quad (21)$$

После преобразования (19) с учетом (20) и (21) получим линейное уравнение $a\Omega = b$, из которого определяются неизвестные коэффициенты:

$$\Omega = a^{-1}b.$$

Результат решения для импульсной функции (19) представлен на рис. 7.



Рис. 7. Экспериментальная импульсная функция

При условии, когда математическое ожидание не равно нулю в схему добавляется дополнительно оператор вычитания математического ожидания (рис. 8).

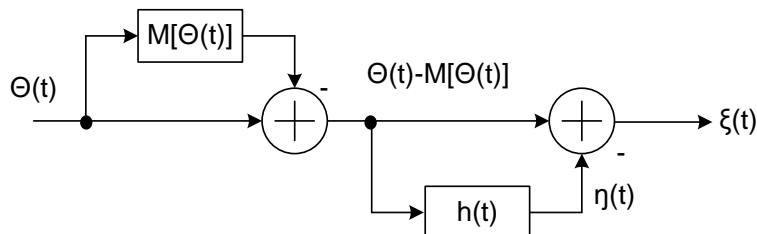


Рис. 8. Структурная схема компенсатора с дополнительным оператором

Анализ результатов. Анализируя (18) видно, что это интегральное уравнение имеет следующее тривиальное решение: если представить импульсную функцию функцией Дирака, тогда, используя фильтрующее свойство, получаем тождество, которое свидетельствует о том, что спектральная плотность идеального решения не ограничена. Поэтому такое решение на практике осуществить невозможно.

Однако в приближенной реализации широкополосная импульсная функция имеет характер близкий к игольчатому, что как раз и показано на рис. 7.

Заключение. Основываясь на теоретических и экспериментальных исследованиях, можно сделать вывод о возможности построения и целесообразности применения активной системы компенсации наводок в тех случаях, когда стандартные, хорошо апробированные методы борьбы с ними не приводят к ожидаемым результатам.

Предложенное устройство целесообразно включать в такие моменты, когда интенсивность наводок превышает допустимый предел.

Применение компенсатора предположительно позволит снизить средний уровень наводимых негативных влияний и повысить общую защищенность кабельных систем электросвязи, а так же безопасность перевозочного процесса железных дорог России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tsaliovich A.* Cable Shielding of Electromagnetic Compatibility. – Chapman & Hall, 1995. – 469 p.
2. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1989. – 135 с.
3. *Шаманов В.И.* Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 300 с.
4. *Кульбикаян Х.Ш., Шандыбин А.В.* Модель взаимодействия тяговой сети и линий связи // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 7. – С. 10-12.
5. *Костюков И.А.* Общие вопросы обеспечения электромагнитной совместимости силовых кабельных линий, их пропускная способность и способы конструктивного исполнения экранов // Электротехника і Електромеханіка. – 2013. – № 04. – С. 65-68.
6. *Каминская Т.П., Недорезов В.Г.* Новые разработки. Самовосстанавливающиеся предохранители на фазовом переходе // Электронная промышленность. – 2008. – № 4. – С. 57-61.
7. *Pishgahzadeh B., Soleymani S., Faghihi F.* New active type of SFCL during unbalanced faults allocated in incoming and outgoing feeders of distribution networks // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – June 2015. – № 2 (23 vol. 7). – P. 77-83.

8. Кульбикаян Х.Ш., Кульбикаян Б.Х., Зайцева Л.А., Шандыбин А.В. Разработка методики расчета опасных и мешающих влияний электротяги постоянного и переменного тока на аппаратуру проводной связи. Отчет о научно-исследовательской работе (№86/1501 от 01.02.08 г.). – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2009. – 121 с.
9. Гаврилюк В.И., Щека В.И., Мелешко В.В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 05 (59). – С. 07-15.
10. Назаров О.Н., Никифорова Н.Б., Петровичев А.П. Параметры тока электроподвижного состава постоянного и переменного тока, оказывающие мешающее влияние на линии связи. Информационный отчет (к договору №3338/08/1501 между ОАО ВНИИЖТ и ВНИИАС МПС России). – М.: ОАО ВНИИЖТ, 2008. – 43 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660049. Программа для реализации алгоритма оценки плотности вероятности и функции распределения по критерию минимума функционала качества / А.В. Шандыбин, В.Н. Таран, Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян. – 21.09.2015 г.
12. *Dunn, Patrick F.* Measurement and Data Analysis for Engineering and Science. – 2nd ed. – CRC Press, 2010. – 504 p.
13. *Papoulis, Athanasios.* Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. – New York: McGraw-Hill, 1991. – 666 p.
14. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи: Учебник для вузов / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.
15. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
16. *Höllig, Klaus.* Finite Element Methods with B-Splines. – SIAM, 2003. – 156 p.
17. Гудкова Н.В., Жебрун Е.А. Прецизионное устройство подавления периодических помех в речевых сигналах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 5 (154). – С. 66-71.
18. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга вторая. – М.: Изд-во «Советское радио», 1968. – 504 с.
19. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 752 с.
20. *Courant R., Hilbert D.* Methods of Mathematical Physics. Vol. 1. – Wiley Classics Edition, 1989. – 560 p.

REFERENCES

1. *Tsaliovich A.* Cable Shielding of Electromagnetic Compatibility. Chapman & Hall, 1995, 469 p.
2. Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka [The rules of protection devices wired communication and wired broadcasting from the influence of traction network of electrified Railways AC]. Moscow: Transport, 1989, 135 p.
3. *Shamanov V.I.* Elektromagnitnaya sovместimost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Electromagnetic compatibility of systems of railway automatics and telemechanics]. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2013, 300 p.
4. *Kul'bikayan Kh.Sh., Shandybin A.V.* Model' vzaimodeystviya tyagovoy seti i liniy svyazi [The interaction model of traction network and communication lines], *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation Communication Informatics], 2012, No. 7, pp. 10-12.
5. *Kostyukov I.A.* Obshchie voprosy obespecheniya elektromagnitnoy sovместimosti silovyykh kabel'nykh liniy, ikh propusknaya sposobnost' i sposoby konstruktivnogo ispolneniya ekranov [General issues of electromagnetic compatibility of cable power transmission lines, their capacity and methods of design of screens], *Elektrotekhnika i Elektromekhanika* [Electrical Engineering & Electromechanics], 2013, No. 04, pp. 65-68.
6. *Kaminskaya T.P., Nedorezov V.G.* Novye razrabotki. Samovosstanavlivayushchiesya predokhraniteli na fazovom perekhode [New developments. Resettable fuse protection on the phase transition], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Engineering], 2008, No. 4, pp. 57-61.

7. Pishgahzadeh B., Soleymani S., Faghihi F. New active type of SFCL during unbalanced faults allocated in incoming and outgoing feeders of distribution networks, *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*, June 2015, No. 2 (23 vol. 7), pp. 77-83.
8. Kul'bikayan Kh.Sh., Kul'bikayan B.Kh., Zaytseva L.A., Shandybin A.V. Razrabotka metodiki rascheta opasnykh i meshayushchikh vliyaniy elektrotyagi postoyannogo i peremennogo toka na apparaturu provodnoy svyazi. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote (№86/1501 ot 01.02.08 g.) [Development of methods of calculation of the dangerous and disturbing influences of the electric drive train, AC and DC on the equipment wired. Report on scientific research (No. 86/1501 here 01.02.08)]. Rostov-on-Don: RGUPS, 2009, 121 p.
9. Gavrilyuk V.I., Shcheka V.I., Meleshko V.V. Ispytaniya novykh tipov podvizhnogo sostava na elektromagnitnyuyu sovместimost' s ustroystvami signalizatsii i svyazi [Testing of new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signalling and communication], *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transport* [Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk national University of railway transport], 2015, No. 05 (59), pp. 07-15.
10. Nazarov O.N., Nikiforova N.B., Petrovichev A.P. Parametry toka elektropodvizhnogo sostava postoyannogo i peremennogo toka, okazyvayushchie meshayushchee vliyanie na linii svyazi. Informatsionnyy otchet (k dogovoru №3338/08/1501 mezhdru OAO VNIIZhT i VNIAS MPS Rossii) [Parameters of DC electric rolling stock AC and DC, providing a disturbing effect on the communication line. Information report (contract No. 3338/08/1501 between JSC VNIIZHT and VNIAS Ministry of Railways of Russia)]. Moscow: OAO VNIIZhT, 2008, 43 p.
11. Shandybin A.V., Taran V.N., Kul'bikayan Kh.Sh., Kul'bikayan B.Kh. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2015660049. Programma dlya realizatsii algoritma otsenki plotnosti veroyatnosti i funktsii ras-predeleniya po kriteriyu minimuma funktsionala kachestva [The certificate of state registration of computer programs No. 2015660049. The program implementing the algorithm of estimating the probability density function and the distribution of the criterion of minimum of the quality functional], 21.09.2015.
12. Dunn, Patrick F. Measurement and Data Analysis for Engineering and Science. 2nd ed. CRC Press, 2010, 504 p.
13. Papoulis, Athanasios. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. New York: McGraw-Hill, 1991, 666 p.
14. Zyuko A.G., Klovskiy D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. Teoriya elektricheskoy svyazi: Uchebnik dlya vuzov [Theory of telecommunications: the Textbook for high schools], Ed. by D.D. Klovskogo. Moscow: Radio i svyaz', 1998, 432 p.
15. Rodzhers D., Adams Dzh. Matematicheskie osnovy mashinnoy grafiki [Athematical foundations of computer graphics], Translation from English. Moscow: Mir, 2001, 604 p.
16. Höllig, Klaus. Finite Element Methods with B-Splines. SIAM, 2003, 156 p.
17. Gudkova N.V., Zhebrun E.A. Pretsizionnoe ustroystvo podavleniya periodicheskikh pomekh v rechevykh signalakh [Precise device of periodic interference suppression in speech signals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 5 (154), pp. 66-71.
18. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Kniga vtoraya [Theoretical basis of statistical radio engineering. Book two]. Moscow: Izd-vo «Sovetskoe radio», 1968, 504 p.
19. Kantorovich L.V., Akilov G.P. Funktsional'nyy analiz [Functional analysis]. 3rd ed. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984, 752 p.
20. Courant R., Hilbert D. Methods of Mathematical Physics. Vol. 1. Wiley Classics Edition, 1989, 560 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Шандыбин Алексей Викторович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»; e-mail: shav850@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; тел.: 88632594054; кафедра связи на железнодорожном транспорте; старший преподаватель.

Shandybin Aleksey Viktorovich – Rostov State Transport University; e-mail: shav850@mail.ru; 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632594054; the department of communication on the railway transport; senior lecturer.