

Аналіз апроксимації згортки розподілів Вейбулла та сплайн-Вейбулла згорткою сплайн-експоненційних розподілів дає можливість зробити висновок про те, що запропонована технологія апроксимації згортки розподілів Вейбулла в класі сплайн-розподілів є зручною та універсальною, оскільки дозволяє побудову апроксимацій для будь-яких значень параметрів β .

Проведено порівняльний аналіз результатів імітаційного моделювання з результатами аналітичних апроксимацій на прикладі оцінки терміну активності системи СУБАК космічного апарата "Океан-О" та зроблено висновок про доцільність використання запропонованих апроксимаційних методів з метою аналізу надійності складних систем.

Література

1. Гнеденко Б. В. Математические методы теории надежности / Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. – М. : Наука, 1965. – 534 с.
2. Барлоу Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Советское радио, 1969. – 488 с.
3. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Наука, 1984. – 328 с.
4. Кокс Д. Р. Теория восстановления : пер. с англ. / Д. Р. Кокс, В. Л. Смит. – М. : Сов. радио, 1967. – 298 с.
5. Байхельт Ф. Надёжность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М. : Радио и связь, 1988. – 392 с.
6. Horst Rinne. The Weibull Distribution: A Handbook / Chapman & Hall/CRC, 2008. – 816 p.
7. Байбуз О. Г. Сплаины в надежности / О. Г. Байбуз, А. Ф. Приставка. – Д., 2003. – 256 с.
8. Smith L. On the renewal function for the Weibull distribution / L. Smith, M. R. Leadbetter // Technometrics. – 1963. – № 5 (3). – P. 393–396.
9. Евграфов М. А. Аналитические функции / Евграфов М. А. – М. : Наука, 1965. – 447 с.
10. Лоу А. М. Имитационное моделирование. Классика CS. / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 848 с. : ил.



УДК 656.25:621.318

С. А. Разгонов, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем и технологий Академии таможенной службы Украины
Е. И. Ящук, аспирант кафедры автоматизации, телемеханики и связи Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

НОВОЕ ЗАЩИТНОЕ СРЕДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ОТ ПОМЕХ

Наведено результати випробування розробленого перетворювача частоти ПЧ 50:50-300. Розроблено його математичну модель, досліджено основні характеристики. Установлено, що ПЧ 50:50-300 може використовуватись як захисний пристрій у системах залізничної автоматики та телемеханіки.

© С. А. Разгонов, Е. И. Ящук, 2012

Приведены результаты испытания разработанного преобразователя частоты ПЧ 50:50-300. Разработана его математическая модель, исследованы основные характеристики. Установлено, что ПЧ 50:50-300 может быть использован в качестве защитного устройства в системах железнодорожной автоматики и телемеханики.

The results of frequency shifter ПЧ 50:50-300 testing have been considered in article. The mathematic model of it has been made and its basic characteristics have been researched. It has been determined, that ПЧ 50:50-300 can be used as protector in railway systems of automation and telemechanics.

Ключевые слова. Преобразователь частоты, неколлинеарные магнитные поля, мощная импульсная помеха.

Введение. Импульсные перенапряжения, вызываемые молниевыми и грозовыми разрядами, наносят значительный ущерб средствам автоматики и связи [1] и, в конечном итоге, препятствуют деятельности железных дорог. На грозоопасных участках (Крым, Прикарпатье, центральная часть Украины) с высокой плотностью размещения электронного оборудования его повреждения от ударов молнии в летнее время могут приобретать массовый характер.

Опыт показывает, что повреждения устройств автоблокировки (АБ) в течение одного грозоактивного периода на одной дороге Украины вызвали 95 случаев поражений устройств мощными импульсными помехами, в 11 случаях произошли групповые выходы из строя элементов аппаратуры АБ и связи, связанные с цепями электропитания.

Существующие защитные средства не отвечают требованиям по тепловым параметрам.

Актуальность проблемы грозозащиты и электромагнитной совместимости систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и компьютеризированных сетей передачи данных вызвана в основном ускоренным освоением на железных дорогах современных достижений в области микроэлектронной и вычислительной техники, внедрением новых типов электровозов двух родов тока, простроенных на силовой электронике.

Анализ мирового опыта защиты технических средств показывает, что применяется многоэтапный комплексный подход к решению данной проблемы, включая улавливания энергии грозового разряда и его отвод в землю; защиту оборудования от импульсных перенапряжений во входящих силовых линиях; объединения всех заземлителей единой эквипотенциальной сетью; разработку новых разрядников со структурой “металл-окисел” и “кремний-окисел”; применения двух-трехступенчатой защиты линий связи и передачи данных от перенапряжений. Например, разрядники на базе “кремний-окисел” – лавинные диоды, способные подавлять всплески тока свыше $60 \cdot 10^3$ А.

Заметим, что согласно статистике отказов Главка ЦШ “Укрзалізниця”, существующие защитные средства (ЗС) устройств СЦБ не отвечают необходимым требованиям по тепловым характеристикам: множество разрядников, варисторов, выравнивателей и других в грозовых зонах на дорогах Украины (Прикарпатье, Крым, центральная часть Украины и т. п.) выходят из строя, сопровождаясь отказами аппаратуры.

Известны многоступенчатые защитные устройства (ЗУ) на базе сильноточных разрядников, ограничителей перенапряжений, трансформаторов и т. д. Некоторые защиты строятся на концепции равнозначной защищенности от импульсных помех всех входных каналов их поступления, начиная от путевого ящика и вводов электропитания автоблокировки [2, 3]. Такая концепция требует значительных технических и экономических затрат, ее реализация, на наш взгляд, приемлема, в первую очередь, для защиты входных силовых устройств, поскольку в других случаях применения такой защиты следует учитывать вероятностные нормативы поражения МИП защищаемого объекта, не считая трудностей его возможной реализации.

Исследования показывают, что при ударах молнии амплитуда тока и напряжения помех в кабелях к релейным шкафам и щитовым установкам систем СЦБ может достигать 8 кА, 4,5 кВ с фронтом импульса 2 мкс и длительностью 210 мкс. При этом энергия мощной импульсной помехи (Джоулев интеграл $\int i^2 t$ [2]) превышает 30 кДж (разрядник РВНШ-250 имеет интеграл – 2,5 кДж).

Постановка задачи. В связи с этим актуальной проблемой грозозащиты является совершенствование ЗС. Одним из решений проблемы является создание эффективного источника вторичного электропитания для индивидуальной защиты – параметрического генератора (ПГ), работающего в режиме повторения частоты. Такой генератор подавляет проникновение помех в аппаратуру, может использоваться для питания и защиты электронной техники, в частности, для тональных рельсовых цепей, внедрение которых на дорогах ускоренно расширяется.

Такая особенность объясняется следующими факторами: изображающая точка взаимодействующих магнитных потоков сердечников располагается на нелинейном участке кривой намагничивания, а в преобразователях частоты с неколлинеарными магнитными полями, кроме того, благодаря размещению обмоток под углом 90° принципиально исключается трансформация тока помех в нагрузку.

Результаты исследований. В Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна был разработан преобразователь частоты ПЧ50:50 для питания аппаратуры СЦБ, располагаемой, в частности, в релейных шкафах автоблокировки или на посту централизации.

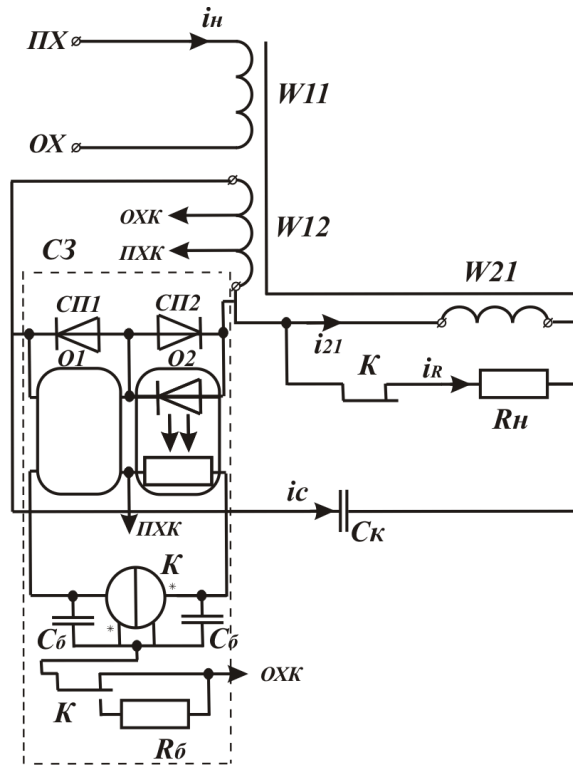


Рис. 1. Схема ПЧ 50:50-300 (пунктиром показана схема защиты)

Лаборатория испытания технических средств железнодорожной автоматики и телемеханики на электромагнитную совместимость Московского института железнодорожного транспорта (МИЖТ) по нашей просьбе провела испытания статического преобразователя ПЧ 50:50. При испытаниях на преобразователь по схеме “провод – провод” подавалось воздействие импульса напряжения амплитудой до 4 кВ длительностью до 100 мкс. При 3,5 кВ на входе ПЧ на его выходе измерялась помеха амплитудой 5–7 В. Таким образом, преобразователь частоты снижает амплитуду испытательного воздействия мощной импульсной помехи в 500 раз.

Нам представляется важным разработать математическую модель преобразователя, работающего в режиме повторения частоты ПЧ 50:50, и исследовать его основные характеристики. Согласно законам Кирхгофа (рис. 1) составлена система уравнений генератора:

$$\begin{aligned} i_c + i_R + i_2 &= 0, \\ i_1 W_{11} + i_2 W_{12} &= h_1 l, \\ i_2 W_{12} = h_2 l, i_2 &= \frac{h_2}{W_{12}} l, \\ i_c &= CSW_{12} \frac{d^2 b_1}{dt^2} + CSW_{21} \frac{d^2 b_2}{dt^2}, \\ i_R &= \frac{SW_{21}}{R_H} \frac{db_2}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

где h_1, h_2 – напряженности поля на участке магнитопровода l сечением S (остальные обозначения ясны из схемы замещения).

После несложных преобразований системы уравнений (1) для резонансного контура можно представить нелинейным дифференциальным уравнением 2 порядка:

$$\frac{d^2}{dt^2} (b_2 + k_{oc} b_1) + \frac{d}{dt} \frac{1}{RC} b_2 + \frac{1}{CSW_{21}} i_2 = 0, \quad (2)$$

где $k_{oc} = \frac{W_{12}}{W_{21}}$ – коэффициент обратной связи;

R_H – сопротивление нагрузки.

При составлении (1) пренебрегаем потерями на гистерезис и активными сопротивлениями обмоток. Аппроксимируем кривую намагничивания $b(h)$ магнитопровода уравнением:

$$h = ash\beta b, \quad (3)$$

где α, β – коэффициенты аппроксимации ($\alpha=2,41$ А/м, $\beta=4,1 \frac{1}{Tl}$, сталь марки 2412 холоднокатаная изотропная).

Приведем (2) с учетом (3) путем умножения всех членов на β и введения обозначений $t = \frac{\tau}{\omega}$, $\delta = \frac{1}{R_H C \omega}$, $\frac{1}{k} = \frac{W_{21}^2 S C \omega^2}{\alpha \beta l}$ к безразмерному виду:

$$\frac{d^2}{d\tau^2} (\beta b_2 + k_{oc} \beta b_1) - \frac{d}{d\tau} \beta b_2 \delta - \frac{1}{k} sh\beta b_2 = 0. \quad (4)$$

Нелинейное дифференциальное уравнение (4) позволяет рассчитать основные амплитудно-фазовые характеристики, в частности, определить амплитуды первой гармоники индукций входной и выходной обмоток. Заметим, что ПГ, работающие в режиме повторения частоты, мало исследованы [3, 4], и для аналитического получения их требуемых характеристик необходимо выполнить сложные аналитические преобразования (4).

Для отыскания решения (4) использовался асимптотический метод Крылова–Боголюбова, позволяющий получить упомянутые характеристики.

При разработке и оптимизации конструкции и схем ПГ важно оценить значение амплитуд первой гармоники индукций на границах неустойчивости решения (4). Поэтому подробнее остановимся на поиске условий неустойчивости (4) в процессе возникновения генерации частоты 50 Гц.

Будем считать, что при отсутствии колебаний индукции $b_1 \approx b_2$, что позволяет ввести малое возмущение $\Delta b = b_2 - b_1$, а также используя известный метод [5], сведем дифференциальное уравнение для приращений к линейному уравнению с переменными во времени коэффициентами:

$$\frac{d^2 \Delta b}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d\Delta b}{d\tau} + \frac{1}{k} sh\beta b = 0. \quad (5)$$

Далее подстановкой $\Delta b = \eta \cdot e^{-\delta\tau}$, исключающей первую производную, уравнение (5) приведем к достаточно хорошо исследованному уравнению Хилла [5, 6]:

$$\ddot{\eta} + (-\delta + \frac{1}{k} sh\beta b)\eta = 0. \quad (6)$$

Согласно [5], уравнение границ области неустойчивости решения (6) по первому приближению имеет вид:

$$(\Psi_0 - n^2)^2 + 2(\Psi_0 + n^2) \cdot \delta^2 + \delta^4 = \Psi_n^2, \quad (7)$$

где n – номер области неустойчивости.

Нас интересует процесс возникновения колебаний частотой ω – второй области неустойчивости $n = 2$, $\Psi_n = \Psi_2$.

Определим амплитуду основной гармоники индукции накачки, принимая закон изменения индукции $b_1 = B_m \sin \tau$ и разлагая коэффициент $\frac{1}{k} ch\beta b$ в ряд Фурье. Тогда (6) запишется в виде:

$$\frac{d^2 \eta}{d\tau^2} + \frac{2}{k} (-jJ_1(jX_m) \sin \tau - J_3(jX_m) \times \sin 3\tau \dots) \eta = 0, \quad (8)$$

где $-jJ_1(jX_m) \sin \tau - J_3(jX_m) \times \sin 3\tau \dots$ – функции Бесселя от чисто мнимого аргумента 1, 3 порядка, $X_m = \beta \cdot B_{1m}$.

Отбросив во втором слагаемом (8) составляющие с частотами выше третьей и, считая $\delta = 0$ (режим холостого хода), $\Psi_0 = 0$, из (7) получим уравнение границы области неустойчивости:

$$-jJ_1(j\beta B_{1m}) = 2k. \quad (9)$$

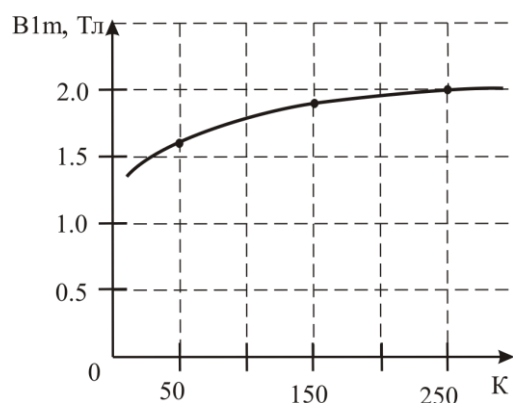


Рис. 2. Зависимость индукции накачки от коэффициента k

Уравнение (9) решается графически. Задавая значение расчетного коэффициента k , определяем соответствующую ему величину индукции B_{1m} (рис. 2).

Опытный образец ПЧ 50:50-300 имеет следующие параметры: $S = 20,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $k = 140$, $l_{cp} = 0,34 \text{ м}$, $W_{21} = 310$, $C = 25 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ}$.

Теперь определим амплитуду стационарных колебаний контура частотой 50 Гц при тех допущениях, которые были сделаны выше. Известно [3, 5], что амплитуда индукции выходных колебаний определяется при равенстве средней за период T частоты колебательного контура и резонансной частоты, то есть $\omega_{cp} \approx \omega$.

Выразим среднюю собственную частоту контура через магнитные параметры и параметры системы

$$\omega_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dt}{\sqrt{L(t)C}}, \quad (10)$$

где $L(t)$ – мгновенное значение индуктивности, зависящее от всех намагничивающих сил (1).

Мгновенная свободная частота с учетом (3) выражается формулой:

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{l_{cp}}{\mu S W_{21}^2 C}}, \quad (11)$$

где $\frac{1}{\mu} = \alpha \beta c h \beta b$, $\omega(t) = 290 \frac{1}{c}$ (в образце ПГ).

Будем считать, что $B_1 = 0$, а индукцию контура запишем в виде $b = B_{2m} \cos \tau$ и подставим в (11). При разложении $ch\beta b$ в ряд Фурье учтем только два первых слагаемых $\frac{1}{\mu} = \alpha \beta J_0(B_{2m}) + 2\alpha \beta J_2(j\beta B_{2m}) \cos 2\omega t$.

В результате формула (10) с учетом (11) и разложения в ряд $ch\beta b$ приобретает вид:

$$\omega_{cp} = \frac{1}{T} \times \int_0^T \frac{dt}{\sqrt{\frac{l_{cp}}{\mu SW^2_{21} C} (J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m}))}} \quad (12)$$

Интеграл (12) сводится к эллиптическому и для средней собственной частоты записывается в виде:

$$\omega_{cp} = \sqrt{\frac{\alpha \beta l_{cp}}{SW^2_{21} C} (J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m}))} \times \frac{2}{\pi} E, \quad (13)$$

где E – полный эллиптический интеграл второго рода с модулем $r^2 = \frac{4J_2(j\beta B_{2m})}{(J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m}))}$ [6].

В формуле (13) учтено, что функция Бесселя второго порядка от мнимого аргумента отрицательная.

Подставим (13) в (10) и поделим обе части формулы на Ω , тогда получим уравнения для определения βB_{2m} :

$$[J_0(j\beta B_{2m}) + 2J_2(j\beta B_{2m})] \left(\frac{2E}{\pi} \right)^2 = k. \quad (14)$$

При реальных расчетах значения аргумента $\beta B_{2m} \geq 4,8$, тогда модуль эллиптического интеграла оказывается больше единицы (1,05...1,24) из-за ограниченного учета числа членов при разложении (11). Отсюда можно предположить, что точные значения модуля близки к единице, и принять $E = 1$.

Решая (14) также графически и зная конструктивный коэффициент $k \approx 125...165$, находим индукцию контурной обмотки, использованную для выбора параметров ПГ (~1.8 Тл).

Рассмотрим опытную внешнюю характеристику образца генератора с обратной связью (рис. 3). Видно, что характеристика довольно жесткая, выходное напряжение с ростом нагрузки весьма стабильное. Здесь, очевидно, сказывается факт передачи части энергии со входа на выход через обмотку обратной связи. Коэффициент стабилизации напряжения достигает 80, коэффициент гармоник составляет менее 6 %, КПД превышает 0,8 при $\cos\varphi \approx 0,76$. Столь высокие энергетические показатели ПГ достигнуты на стали 2412, изготовленной Новолипецким металлургическим комбинатом России.

Недостатком ПЧ 50:50, работающем в режиме повторения частоты, является проникновение по каналу обратной связи в нагрузку импульсной помехи, что недопустимо.

На рис. 1 пунктиром представлена схема защиты нагрузки генератора от импульсной помехи. Схема содержит сопрессоры $СП1$, $СП2$, резистивные оптроны $О1$, $О2$ и контрольное реле $К$. Заметим, что динамические характеристики сильноточных сопрессоров по времени срабатывания (НС) почти на два – три порядка меньше, чем оптронов, диодов и транзисторов. Это позволяет с помощью $СП1$, $СП2$ закортить МИП раньше, чем помеха попадет в схему защиты и нагрузку. Параметры, вольтамперная характеристика сопрессоров выбрана с учетом рассеяния энергии помехи, а напряжение их срабатывания не должно превышать уровень стационарного напряжения на обмотке обратной связи более чем на 15 %.

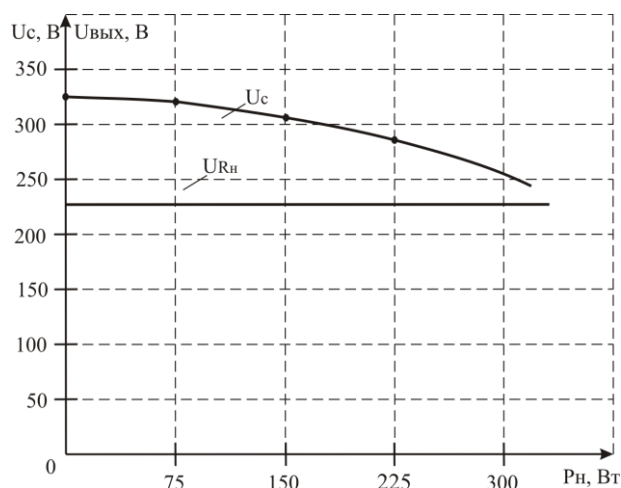


Рис. 3. Внешняя характеристика ПЧ 50:50-300

Выводы. Испытания показали, что возможные повреждения элементов схемы защиты контролируются реле K , отключающим нагрузку при любых отказах, то есть схема отвечает требованиям первого класса надежности.

Установлено, что максимальная амплитуда МИП ≈ 800 В, а при включении схемы защиты – 100 В (порог срабатывания сопрессоров).

Нами разработан генератор на неколлинеарных магнитных полях, работающий в режиме повторения частоты. Их схемы не содержат электрической связи “вход – выход” и отвечают требованиям к устройству [6], практически полностью подавляющего помехи. Такой генератор частоты 1:1, отвечающий требованиям защиты от МИП, может применяться для питания тональных рельсовых цепей и проходит опытные испытания. Его работа и характеристики будут освещены в технической литературе позднее.

В заключение отметим, что проблема защиты электронной аппаратуры СЦБ, размещенной в релейных шкафах, от помех, по нашему мнению, успешно решается на базе индивидуальной последней ступени защиты – параметрических генераторов частоты на неколлинеарных магнитных полях.

Литература

1. Талыков А. А. Фазочувствительные рельсовые цепи 25 Гц / А. А. Талыков, А. П. Разгенов. – М. : Транспорт, 1972. – 96 с.
2. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / Костроминов А. М. – М. : Транспорт, 1997. – 192 с.
3. Задерей Г. П. Параметрический трансформатор с ортогональными полями / Г. П. Задерей, В. И. Пунтус // Электронная техника. – 1972. – № 2.
4. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М. : Физматгиз, 1963.
5. Тихиро Хаяси. Нелинейные колебания в физических системах / Тихиро Хаяси. – М. : Мир, 1968. – 300 с.
6. Сухоруков С. А. Вводно-защитные устройства для микропроцессорной автоблокировки / С. А. Сухоруков // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 15–18.