

## Применение PLC-технологий Yitran в системе управления блокировками безопасности распределительных устройств высокого напряжения<sup>1</sup>

БОРИСОВ Р.К., КОВАЛЕВ Д. И., КОКОРИН С.А., КОЧУРОВ О. М.

*Рассмотрено применение технологии передачи данных по цепям питания (PLC) для управления оперативными блокировками коммутационных аппаратов электрических станций и подстанций. В качестве каналообразующей аппаратуры используются встраиваемые модемы фирмы Yitran. Основное внимание уделяется условиям распространения PLC-сигнала в реальной сети питания. С помощью методов цифрового спектрального анализа проведено исследование характеристик PLC-сигнала, формируемого модемами. Установлено, что уровень варьируется от 10 мВ до 1,5 В и занимает диапазон частот от 20 до 80 кГц. Экспериментально определен порог чувствительности модема (-55 дБ) в условиях интенсивных помех. Предложена математическая модель на основе теории цепей с распределенными параметрами, отражающая свойства сетей питания в диапазоне частот, соответствующих спектру PLC-сигнала. По результатам моделирования сети протяженностью 1200 м сделан вывод о необходимости применения частотных загрядителей с индуктивностью 1 мГн, снижающих влияние емкостных нагрузок на распространение PLC-сигнала. Данные рекомендации в отношении топологии организации сети.*

**Ключевые слова:** электростанции, подстанции, распределительные устройства, управление, оперативная блокировка, связь, цепи питания

Важным средством предупреждения неправильных операций, производимых оперативным персоналом электрических станций и подстанций, является оснащение всех коммутационных аппаратов устройствами блокировки. На систему оперативных блокировок безопасности (ОББ) распределительного устройства возлагаются функции контро-

ля положения коммутационных аппаратов, а также автоматического запрета или разрешения переключений с помощью электромагнитных замков. Реализация этих функций связана с организацией разветвленной сети обмена контрольными и управляющими сигналами.

Современный подход к построению системы ОББ предполагает применение микропроцессорных контролеров, обменивающихся цифровыми пакетами данных, которые должны передаваться

<sup>1</sup> Работа выполнена в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

беспроводным способом. При этом альтернативой радиосвязи служит канал высокочастотной связи по цепям питания, так называемые технологии PLC (Power Line Communications). Данный вид связи может быть отнесен к беспроводным, поскольку он не требует прокладки дополнительных кабелей, а позволяет использовать существующую или вновь сооружаемую инфраструктуру сети питания. При этом передача сигналов осуществляется по направляющей системе в области низких частот (с точки зрения радиотехнической классификации частотных диапазонов). Это позволяет рассчитывать на большую по сравнению с радиоканалом дальность передачи данных без помощи ретрансляторов.

Среди PLC-технологий, представленных на российском рынке, пользуется известностью продукция фирмы Yitran [1]. В статье рассматривается применение PLC-модуля Yitran IT700-PIM [2] на основе интегральной микросхемы IT700 того же производителя. В работе предлагалось:

- измерение уровня выходного сигнала PLC-модуля;
- исследование спектральных характеристик PLC-сигнала;
- экспериментальное определение порога чувствительности модуля;
- определение влияния нагрузки на распространение PLC-сигнала;
- разработка математической модели PLC-канала;
- анализ топологии PLC-сети;
- выводы и рекомендации.

**Измерение уровня PLC-сигнала.** Уровень выходного сигнала PLC-модема программируется, т.е. задается условным кодом от 0 до 7. Измерение уровня выходного сигнала модема дает результаты, приведены в таблице.

Код управления выходным усилителем	Уровень выходного сигнала (действующее значение), мВ	Ослабление сигнала (по отношению к максимальному уровню), дБ
0	10	-43
1	21	-37
2	45	-30
3	93	-24
4	190	-18
5	380	-12
6	750	-6
7	1500	0

Из таблицы видно, что увеличение кода на единицу соответствует удвоению амплитуды сигнала.

**Спектральные характеристики PLC-сигнала.** Временное представление PLC-сигнала может быть использовано лишь в «чистом» канале связи. Реальная электромагнитная обстановка в PLC-сети характеризуется сравнительно высоким уровнем шумов и помех, что заставляет в дальнейшем опираться на спектральное представление сигнала.

Современные средства цифрового осциллографирования позволяют составить представление о спектральных свойствах сигнала. Однако при исследовании случайных сигналов проявляются ограничения возможностей по обработке сигналов. На рис. 1 показан пример спектра, полученный с помощью цифрового осциллографа. Видно, что спектр существенно «изрезан», что затрудняет точное определение с его помощью каких-либо числовых характеристик.

Лучших результатов можно добиться с помощью цифровой обработки временного представления сигнала, выполненного в среде MATLAB. Такой подход дает возможность получить спектральную плотность мощности сигнала методом периодограммы Уэлча [3].

Метод основан на делении последовательности дискретных отсчетов исследуемого сигнала на несколько перекрывающихся интервалов. Обычно используется 50%-е перекрытие. Чем короче интервалы, тем более выражено сглаживание. Для каждого  $i$ -го интервала рассчитывается односторонняя периодограмма:

$$S^{(i)}(\omega) = \frac{2}{f_s} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} \hat{a}_k u_k w_k e^{-j\omega k T_s} \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} \hat{a}_k |w_k|^2}, \quad (1)$$

где  $f_s$  – частота дискретизации;  $w_k$  – весовая (оконая) функция.

Окончательный результат получается при усреднении периодограмм для всех интервалов:

$$S(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S^{(i)}(\omega). \quad (2)$$

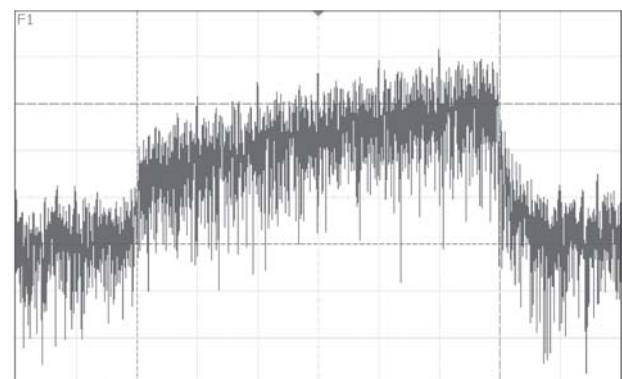


Рис. 1. Амплитудный спектр PLC-сигнала

Рекомендованные параметры: объем выборки  $N = 2^{17} = 131072$  дискретных отсчета;  $M = 63$  число интервалов (4096 отсчетов в каждом интервале); наложение интервалов – 50%; весовая функция – окно Хэмминга [4]:

$$w(k) = \begin{cases} 0,54 - 0,46 \cos \frac{2\pi k}{N-1}, & 0 \leq k \leq N-1; \\ 0 & \text{при про их } k. \end{cases} \quad (3)$$

Периодограмма Уэлча, полученная для PLC-сигнала, показана на рис. 2. Спектр занимает полосу от 20 до 80 килоггерц; при этом нарастает практически линейно в пределах 20 дБ/Гц. Неравномерность спектра служит для компенсации неравномерности частотной характеристики канала связи.

**Порог чувствительности модуля.** Имитация PLC-канала в лабораторных условиях осуществляется при соединении двух модемов через пассивный четырехполюсник с известным затуханием 25 дБ (на частоте 20 кГц). Поэтапное снижение уровня выходного сигнала (в соответствии с таблицей, приведенной ранее) позволяет установить порог чувствительности модема. Качество сигнала при этом характеризуется с помощью встроенных средств самодиагностики модема. Эксперимент показывает, что резкий спад характеристики качества сигнала соответствует уровню 45 мВ. При этом предельно допустимое затухание

$$A_{\text{доп}} = A_{\text{им}} A_{\text{вых}},$$

где  $A_{\text{им}} = 25$  дБ – затухание имитатора сети;  $A_{\text{вых}} = 30$  дБ – затухание выходного аттенюатора модема по отношению к максимальному уровню (см. таблицу).

В результате получаем

$$A_{\text{доп}} = 25 + 30 = 55 \text{ дБ.}$$

**Затухание, вносимое нагрузкой.** Нагрузкой сети питания, которая является средой распространения PLC-сигнала, являются контроллеры коммутационных аппаратов. Известные параметры четырехполюсника-имитатора PLC-канала, наличие макета контроллера, а также рассмотренная методика

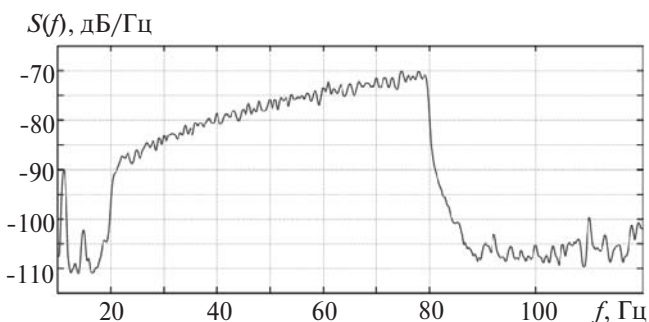


Рис. 2. Периодограмма PLC-сигнала

спектрального анализа позволяет экспериментально определить затухание, вносимое нагрузкой. На интересующей частоте 20 кГц входной импеданс нагрузки имеет преимущественно емкостный характер и соответствует 5,6 мкФ.

**Модель PLC-канала.** PLC-канал следует рассматривать как электрическую цепь с распределенными параметрами (длинную линию), содержащую многочисленные нагрузки, сопротивление которых в интересующем диапазоне частот имеет емкостный характер. Выражения, описывающие первичные параметры длинной линии, можно записать, опираясь на специализированные источники [5, 6] и сведения, известные из теоретической электротехники [7].

Внутреннее сопротивление 1 м линии круглого сечения

$$R_{\text{внт}} = \frac{k}{2\rho g_0} \operatorname{Re} \frac{j^{3/2} J_0(j^{3/2} kr_0)}{J_1(j^{3/2} kr_0)}, \quad (4)$$

где  $k = \sqrt{\omega \mu g}$  – коэффициент потерь в металле;  $\omega$  – круговая частота тока;  $g$  – удельная проводимость;  $r_0$  – радиус провода;  $J_0, J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно [8].

В расчет следует ввести поправку, учитывающую потери в экране и окружающих металлических массах:  $R = 1,5 R_{\text{внт}}$ .

Внутренняя индуктивность 1 м

$$L_{\text{внт}} = \frac{k}{2\rho g_0 \omega} \operatorname{Im} \frac{j^{3/2} J_0(j^{3/2} kr_0)}{J_1(j^{3/2} kr_0)}. \quad (5)$$

Выражения записаны для одного провода. Вычисляя параметры двухпроводной линии, результат необходимо удвоить.

Внешняя индуктивность достаточно длинной двухпроводной линии круглого сечения

$$L_{\text{внш}} = \frac{\mu_0}{\rho} \ln \frac{a-r_0}{r_0} = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{a-r_0}{r_0}, \quad (6)$$

где  $a$  – расстояние между проводниками (магнитная проницаемость окружающей среды принимается равной  $\mu_0$ ).

Индуктивность единицы длины двухпроводной кабельной

$$L = L_{\text{внш}} + L_{\text{внт}}. \quad (7)$$

Емкость двухпроводной линии

$$C = \frac{\rho \epsilon_a}{\ln \frac{a-r_0}{r_0}} = \frac{\epsilon \cdot 10^{-9}}{36 \ln \frac{a-r_0}{r_0}}. \quad (8)$$

Гальваническая проводимость кабельных линий пренебрежимо мала, поэтому можно считать, что проводимость утечки обусловлена лишь диэлектрическими потерями

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (9)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции.

При подстановке в приведенные выражения параметров кабеля типа ВВГЭнг-2' 2,5 получаем (для частоты 20 кГц):  $R = 25,36$  мОм/м;  $L = 528,2$  нГн/м;  $C = 151,7$  пФ/м;  $G = 571,9$  нСм/м.

Вторичные параметры длинных линий [9]: волновое сопротивление  $Z$  и коэффициент распространения  $\gamma$  выражаются через первичные параметры следующим образом:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}; \quad \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta. \quad (10)$$

Входное сопротивление длинной линии, нагруженной на комплексное сопротивление  $Z_H$ ,

$$Z_{\text{вх}} = Z \frac{Z_H + Z \operatorname{th} \gamma l}{Z_H \operatorname{th} \gamma l + Z}, \quad (11)$$

где  $l$  – длина линии.

Комплексный коэффициент передачи длинной линии, нагруженной на комплексное сопротивление  $Z_H$ ,

$$K = \frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l + \frac{Z}{Z_H} \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (12)$$

Приведенные выражения позволяют провести расчет для модели PLC-канала. В качестве типовой модели PLC-сети открытого распределительного устройства принята топология «шина», состоящая из тридцати участков кабеля, имеющих среднюю длину  $l = 40$  м. Таким образом, общая протяженность PLC-сети составляет 1,2 км.

Как было показано ранее, входной импеданс нагрузок был определен экспериментально и соответствует емкости 5,6 мкФ. Организация PLC-сети предполагает включение частотных заградителей, препятствующих шунтированию высокочастотного сигнала. Моделирование проводилось для нескольких индуктивных заградителей.

Результаты моделирования приведены на рис. 3,а. Горизонтальная линия на графике показывает уровень предельно допустимого затухания. С учетом того что реальная интенсивность помех в PLC-канале может значительно превышать интенсивность помех в лабораторных условиях, предельно допустимый уровень принят с запасом в 20 дБ.

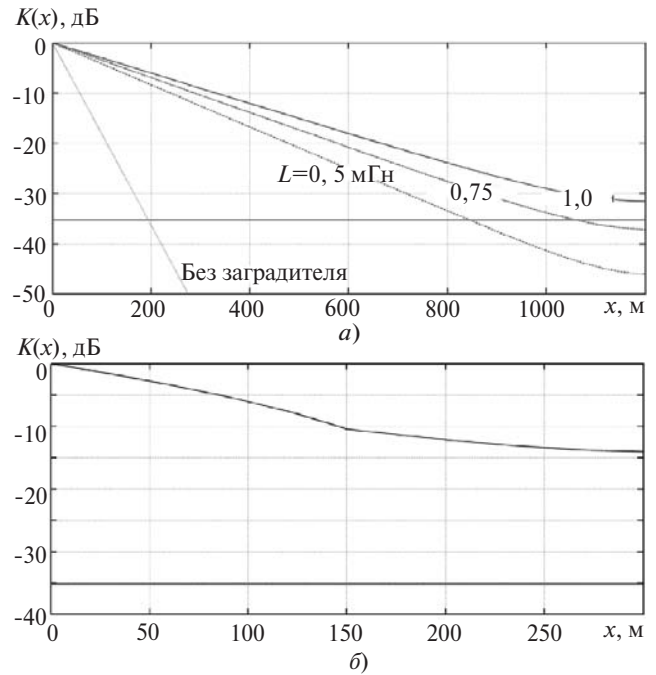


Рис. 3. Затухание сигнала в PLC-канале: а – топология «шина»; б – «звезда»

**Анализ топологии.** В случае рассмотренной топологии «шина» сеть не имеет ответвлений. При этом протяженность канала связи велика и, как следствие, велико затухание сигнала. Для сравнения проведем моделирование сети, имеющей топологию «звезда». На рис. 3,б приведен график распределения амплитуд сигнала вдоль линии, состоящей из трех участков, подключенных «звездой» к концу четвертого. Топология изменена при сохранении общей протяженности канала связи. Индуктивность заградителей задана равной 0,75 мГн. Благодаря изменению топологии сети затухание сигнала существенно снижается.

**Выводы.** Возможности PLC-модуля Yitran IT700-Р1М допускают его применение для организации сети передачи данных в системе управления ОББ. Компьютерное моделирование выявило существенное влияние нагрузок на условия распространения высокочастотного сигнала. Для обеспечения работоспособности сети передачи данных необходимо предотвратить шунтирование сигнала с помощью частотных заградителей. Рекомендуется включение каждой нагрузки через индуктивность  $L_{\text{згр}} = 1$  мГн. В случае вновь сооружаемой инфраструктуры питания (одновременно служащей PLC-сетью) следует отдавать предпочтение топологии «звезда», избегая неразветвленных протяженных участков.

Моделирование PLC-сети подтвердило возможность применения данного вида связи. Модель учитывает наиболее неблагоприятные условия: принята топология «шина», допустимое затухание выбрано с существенным запасом, возможностью ретрансляции пакетов пренебрегается. Эти допущения по-



зволяют гарантировать надежную работу сети управления блокировками на основе PLC-модемов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каршенбойм И. Модемы для передачи данных по сети электропитания компании Yitran. — Компоненты и технологии, 2008, № 7, с. 110–116.
2. IT700-DS-001-R1.2. IT700 Powerline Communication Modem Advanced Information. Product Brief. — Yitran Communications Ltd, 2008, 14 p.
3. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990, 547 с.
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978, 848 с.
5. Гроднев И.И. Кабели связи, 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976, 272 с.
6. Гумеля А.Н., Шварцман В.О. Электрические характеристики кабельных и воздушных линий связи. — М.: Связь, 1966, 208 с.
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, т. 2. — СПб: Питер, 2003, 377 с.
8. Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. — М.: Наука, 1979, 830 с.
9. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. — М.: Энергоатомиздат, 1990, 248 с.

[26.06.14]

Авторы: **Борисов Руслан Константинович** окончил электроэнергетический факультет Москов-

ского энергетического института (МЭИ — ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ» — НИУ «МЭИ») в 1971 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

**Ковалев Дмитрий Игоревич** окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ» в 2007 г. Аспирант кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

**Кокорин Сергей Анатольевич** окончил приборостроительный факультет Владимирского политехнического института в 1980 г. В 1988 г. защитил в Московском приборостроительном институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование экстраполяционных методов определения статических магнитных характеристик электротехнических сталея». Научный сотрудник ООО «НПФ ЭЛ-НАП».

**Кочуров Олег Михайлович** окончил факультет информатики и прикладной математики Владимирского государственного университета в 2002 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование программно-аппаратных средств для передачи цифровых сигналов по электрическим распределительным сетям» во Владимирском государственном университете. Инженер кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 12, pp. 18–23.*

## Application of the PLC technologies developed by Yitran for the safety interlock control system used in high-voltage switchgears

R.K. BORISOV, D.I. KOVALEV, S.A. KOKORIN and O.M. KOCHUROV

*Application of the technology of data transmission via power line circuits (PLC) for controlling the operative interlocks of switching apparatuses at power plants and electrical substations is considered. Built-in modems produced by Yitran are used as channel forming equipment. The main attention is paid to PLC signal propagation conditions in a real power supply network. The characteristics of the PLC signal produced by the modems are investigated using the digital spectral analysis methods. It is found that the PLC signal level varies from 10 mV to 1.5 V and occupies a frequency band from 20 to 80 kHz. The modem sensitivity threshold under the conditions of intense interference is determined by experiment (-55 dB). A mathematical model reflecting the properties of power supply networks in the frequency band corresponding to the PLC signal spectrum and constructed using the theory of circuits with distributed parameters is proposed. A 1200-m-long network was modeled, and a conclusion is drawn based on the modeling results that there is a need to install power line traps with an inductance of 1 mH, which reduce the influence of capacitive loads on the propagation of the PLC signal. Recommendation for shaping the network topology are given.*

Key words: *power plants, substations, switchgears, control, operative interlock, communication, power supply circuits*

#### REFERENCES

1. Karshenboim I. *Komponenty i tekhnologii* (Components and Technologies), 2008, No. 7, pp. 110–116.
2. IT700-DS-001-R1.2. IT700 Power line Communication Modem Advanced Information. Product Brief. — Yitran Communications Ltd, 2008, p. 14.

3. Marpl S.L. *Tsifrovoyi spektral'nyi analiz i ego prilozheniya* (Digital spectral analysis and its applications). Moscow. Publ. «Mir», 1978, 848 p.

4. Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* (Theory and application of digital signal processing). Moscow. Publ. «Mir», 1978, 848 p.

5. **Grodnev I.I.** *Kabeli svyazi* (Communication cables). Moscow. Publ. «Energiya», 1976, 272 p.
6. **Gumelya A.N., Shvartsman V.O.** *Elektricheskiye kharakteristiki kabel'nykh i vozduzhnykh liniy svyazi* (Electrical characteristics of cable and overhead communication lines). Moscow. Publ. «Svyaz», 1966, 208 p.
7. **Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki*. T. 2 (Theoretical foundation of electrical engineering). St. Petersburg. Publ. «Piter», 2003, 377 p.
8. **Abramovits M., Stigan I.** *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam* (Handbook of mathematical function). Moscow. Publ. «Nauka», 1979, 830 p.
9. **Kaganov Z.G.** *Elektricheskiye tsepi s raspredelelennymi parametrami I tsepye skhemy* (Electric circuits with distributed parameters and ladder circuits). Moscow. Publ. «Energoatomizdat», 1990, 248 p.

*Authors: Borisov Ruslan Konstantinovich (Moscow, Russia) – Cand Techn Sci. He is a Leading Scientific Researcher of National Research University «Moscow Power Engineering Institut» (NRU «MPEI».*

*Kovalev Dmitrii Igorevich (Moscow, Russia) – Ph. D. Student of the NRU «MPEI».*

*Kokorin Sergei Anatol'yevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci. He is a Research Assistant of the LLC «Scientific and Production Company ELNAP».*

*Kochurov Oleg Mikhailovich (Moscow, Russia) – Engineer in the Department of the NRU «MPEI».*