

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТЕЙ СВЯЗИ

УДК 621.394.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ СЕТЯХ

Е. Е. Прозоровский, профессор Морской государственной академии им. адмирала Ф.Ф. Ушакова (Новороссийск), д.т.н.; eeprozorov@yandex.ru

Ключевые слова: высокочастотная связь, информационная сеть, протокол обмена данными, распределенная система сбора данных.

Введение. Одна из основных проблем передачи информации по силовым распределительным сетям связана с тем, что эти сети являются разветвленными. Причем наличие ответвлений приводит к очень большому затуханию сигнала. И как следствие — к невозможности возбуждения сигнала в каком-либо узле сети так, чтобы он был доступен во всех остальных точках системы связи.

В [1] рассматривается протокол, позволяющий объединить отдельные локальные сети объектов, расположенных в узлах информационной сети, в единую систему обмена данными. В соответствии с этим протоколом каждому из объектов информационной сети присваивается трехбайтный адрес. Функцию маршрутизаторов в системе связи выполняет сеть приемопередатчиков. На любом из объектов может быть установлен один или несколько приемопередатчиков.

Для пояснения ситуации, связанной с передачей информации в системе связи, на рис. 1 приведена структурная схема фрагмента системы. На ней указано содержание пакета данных на каждом из участков информационной сети при продвижении пакета в направлении от пункта управления (ПУ) к периферийному контрольному пункту КПЗ.

На 1, 2 и 3 позициях пакета расположен идентификатор блока данных, на 4, 5 и 6 — трехбайтный адрес приемопередатчика, находящегося непосредственно над объектом, служащим очередным передаточным звеном в процессе передачи данных. На следующих трех позициях указан адрес следующего приемопередатчика, участвующего в процессе передачи данных от ПУ к периферийному объекту. Заканчивается адресная часть пакета трехбайтным адресом (4.3.4) приемопередатчика, расположенного непосредственно на объекте, для которого был сформирован пакет данных. После адресной части следует область данных, которая завершается двухбайтным циклически избыточным кодом (CRC — Cyclic Redundancy Check) — SL, SH.

Постановка задачи. Данный вариант протокола достаточно эффективен, если на каждом из периферийных пунктов имеет место единственный контроллер для сбора данных на объекте. Ситуация существенно усложняется, если на периферийном объекте сбор данных происходит с помощью распределенной системы, в составе которой находятся несколько контроллеров различного назначения. Связано это с двумя факторами.

Во-первых, при продвижении информационного пакета в сторону адресата он в каждом из узлов информационной сети попадает в локальную сеть соответствующего объекта. Например, пакет, сформированный с помощью приемопередатчика с адресом 2.0.0, перемещается к приемопередатчику с адресом 2.1.4 по участку сети, организованному на основе

отрезка силового кабеля (СК) напряжением 0,4 кВ. Далее от приемопередатчика с адресом 2.1.4 к приемопередатчику с адресом 3.1.4 пакет поступает по участку локальной сети объекта КП1. Аналогичная ситуация имеет место при транспортировке пакета данных в обратном направлении.

Второй фактор обусловлен тем, что при организации распределенной системы сбора данных на объекте данные с контроллеров различного назначения поступают в объектовый контроллер по этой же локальной сети. В связи с тем, что в локальной сети объекта имеют место два различных информационных потока, вероятность возникновения конфликтной ситуации велика.

Варианты решения задачи. Есть несколько вариантов разрешения данной конфликтной ситуации. Один из них основан на построении на каждом из периферийных объектов двух локальных сетей. Одна из них предназначена для сбора данных на объекте, а вторая — для реализации протокола обмена данными в общей информационной сети. Такой вариант требует существенного усложнения приемопередатчика. Связано это с тем, что необходимо обеспечить возможность работы приемопередатчика по двум локальным сетям. А это, в свою очередь, приводит к необходимости изменения приемопередатчика на аппаратном уровне и к увеличению стоимости системы связи. Наличие второй локальной сети на объекте усложняет и систему телеметрии в целом.

Второй вариант разрешения конфликтной ситуации заключается в следующем. Накопленный к настоящему времени большой объем экспериментальных данных приводит к выводу о том, что между различными приемопередатчиками, расположенными на одном и том же объекте, возможна надежная связь с помощью высокочастотного (ВЧ) сит-

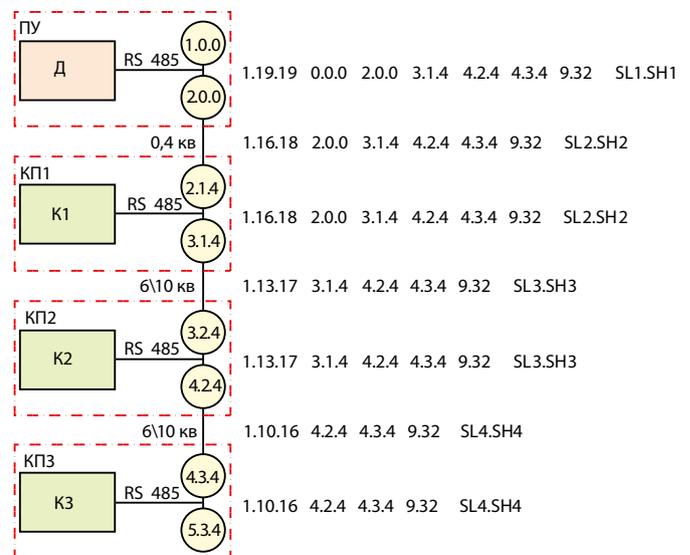


Рис. 1

нала. Поэтому между любой парой приемопередатчиков, находящихся на любом из периферийных объектов, можно осуществить связь подобно тому, как она реализуется и между приемопередатчиками, расположенными в различных узлах информационной сети. Этот вариант позволяет не вводить на каждом из периферийных объектов вторую локальную сеть.

Однако при этом следует изменить используемый в системе протокол обмена данными, поскольку велика вероятность того, что сигнал от приемопередатчика с адресом 3.1.4 будет одновременно принят двумя приемопередатчиками с адресами 3.2.4 и 4.2.4. В этом случае оба приемопередатчика одновременно сформируют ВЧ-сигналы для дальнейшего продвижения пакета данных в сторону периферийного объекта. Но как показано на рис. 1, содержание пакетов, формируемых приемопередатчиками с адресами 3.2.4 и 4.2.4, различно. Суммирование двух различных ВЧ-сигналов может привести к разрушению данных. Поэтому следует изменить алгоритм работы приемопередатчика таким образом, чтобы оба они формировали одинаковые пакеты данных. При этом сигнал на входе отрезка СК, расположенного между объектами КП2 и КП3, будет результатом суммирования сигналов от двух приемопередатчиков с адресами 3.2.4 и 4.2.4, что, в свою очередь, способствует увеличению пропускной способности канала связи. Но для этого необходимо выполнение еще одного условия: оба указанных передатчика должны возбуждать синфазные сигналы во входной цепи приемника с адресом 4.3.4.

Для определения условий синфазного сложения сигналов на рис. 2 приведена функциональная схема фрагмента системы связи, в состав которого входят два отрезка СК. Данная схема справедлива для ВЧ составляющих токов и напряжений при условии возбуждения сигнала в отрезке СК со стороны его токопроводящей оболочки [2]. Сигнал во входной цепи приемника с адресом 4.3.4 возбуждается током I_{14} . Комплексная амплитуда составляющей тока I_{14} , обусловленная сигналом передатчика с адресом 4.2.4, вычисляется по формуле:

$$I_{14}^{(2)} = K_{I2} I_{13}^{(2)}, \quad (1)$$

где K_{I2} — передаточная функция по току отрезка СК Л2; $I_{13}^{(2)}$ — комплексная амплитуда составляющей тока I_{13} , определяемая сигналом передатчика с адресом 4.2.4.

Выражение, устанавливающее связь между передаточной функцией K_{I2} и параметрами отрезка СК, приведено в [3]. Оно получено из соотношений между комплексными амплитудами токов и напряжений в любом сечении отрезка СК [4]. На основе этих же соотношений может быть уста-

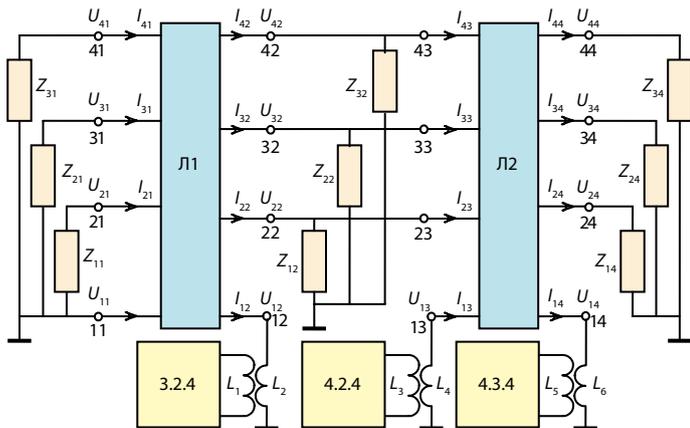


Рис. 2

новлена связь между комплексной амплитудой составляющей тока $I_{14}^{(1)}$, обусловленной сигналом передатчика с адресом 3.2.4, и током I_{12} .

Следует отметить, что решение данной задачи приводит к громоздким выкладкам. Его можно значительно упростить, если пренебречь влиянием проводимости земли на передаточную функцию цепи. В [3] показано, что пренебрежение влиянием земли приводит к погрешности вычислений в пределах 15%. Система телеграфных уравнений, моделирующая процесс распространения колебаний в СК, в этом случае может быть представлена в виде [4]:

$$\begin{cases} -\frac{dU_1}{dx} = Z_1 I_1 + 3Z_{12} I_2; \\ -\frac{dU_2}{dx} = Z_{21} I_1 + (Z_2 + 2Z_{23}) I_2; \\ -\frac{dI_1}{dx} = 3y_{12}(U_1 - U_2); \\ \frac{dI_2}{dx} = y_{12}(U_1 - U_2), \end{cases} \quad (2)$$

где U_1 — комплексная амплитуда напряжения токопроводящей оболочки СК в произвольном сечении x ; U_2 — комплексная амплитуда напряжения токоведущего проводника СК; I_1 — комплексная амплитуда тока токопроводящей оболочки СК в произвольном сечении x ; I_2 — комплексная амплитуда тока одного из токоведущих проводников СК в том же сечении; Z_1, Z_2 — собственные сопротивления токопроводящей оболочки и токоведущего проводника СК на единицу длины; $Z_{12} = Z_{21}$ — взаимные сопротивления проводов, обусловленные наличием взаимной индуктивности между ними; Z_{23} — взаимное сопротивление между двумя токоведущими проводниками СК на единицу длины; y_{12} — погонная взаимная проводимость между оболочкой и одним из токоведущих проводников СК.

Непосредственно из (2) следует, что значения комплексных амплитуд составляющих токов на входах первого и второго отрезков СК, обусловленных сигналом передатчика с адресом 3.2.4, связаны между собой следующим образом:

$$I_{22}^{(1)} = -I_{12}^{(1)}/3 \text{ и } I_{13}^{(1)} = -3I_{23}^{(1)}.$$

С учетом этого (при симметричной нагрузке) комплексная амплитуда составляющей напряжения $U_H = U_{22} = U_{32} = U_{42}$ может быть выражена через комплексную амплитуду составляющей тока I_{12} (составляющих, обусловленных сигналом первого передатчика) в виде:

$$U_H^{(1)} = -\frac{I_{12}^{(1)} Z_H Z_{\text{вх}2}}{3 Z_H + Z_{\text{вх}2}}, \quad (3)$$

где $Z_H = Z_{12} = Z_{22} = Z_{32}$ — комплексное сопротивление нагрузки, подключенное к выходу первого отрезка СК; $Z_{\text{вх}2}$ — входное сопротивление второго отрезка СК Л2.

Соответствующим образом может быть установлено соотношение между комплексными амплитудами тока I_{13} и напряжения U_H :

$$I_{13}^{(1)} = -3I_{23}^{(1)} = -3\frac{U_H^{(1)}}{Z_{\text{вх}2}}. \quad (4)$$

С учетом (1), (3) и (4), комплексная амплитуда тока I_{14} , обусловленного действием сигналов от первого и второго передатчиков, может быть записана в виде:

$$I_{14} = K_{I2}(I_{13}^{(1)} + I_{13}^{(2)}) = K_{I2} \left\{ \frac{Z_H}{Z_H + Z_{\text{вх}2}} I_{12}^{(1)} + I_{13}^{(2)} \right\}. \quad (5)$$

Для установления связи между входным сопротивлением отрезка СК $Z_{\text{вх}2}$ с параметрами этого отрезка необходимо решить систему уравнений (2) относительно неизвестных I_2 и разности потенциалов ($U_1 - U_2$) на входе отрезка СК. Результат этого решения может быть представлен в виде:

$$Z_{\text{вх}2} = \frac{U_2 - U_1}{I_2} = \frac{Z_{\text{н.вх}} \operatorname{ch}(\gamma l_2) + Z_{\text{в}} \operatorname{sh}(\gamma l_2)}{Z_{\text{н.вх}} \operatorname{sh}(\gamma l_2) + Z_{\text{в}} \operatorname{ch}(\gamma l_2)} Z_{\text{в}},$$

где $Z_{\text{н.вх}} = Z_{14} = Z_{24} = Z_{34}$ — комплексное сопротивление нагрузки, подключенной к выходу второго отрезка СК; l_2 — длина отрезка СКЛ2.

По своей структуре полученное выражение не отличается от известной формулы для определения входного сопротивления отрезка однородной длинной линии [5]. Однако в данном случае связь между комплексным коэффициентом распространения γ и волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ с параметрами трехфазного СК иная, чем это имеет место для однородной длинной линии, т. е.:

$$\gamma = \sqrt{y_{12}(3Z_1 + Z_2 + 2Z_{23} - 6Z_{12})};$$

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{3Z_1 + Z_2 + 2Z_{23} - 6Z_{12}}{y_{12}}}.$$

Тем не менее, характер зависимости $Z_{\text{вх}2}$ от электрической длины отрезка СК тот же, что и для отрезка длинной линии. В частности, если не учитывать потери в цепи, нетрудно убедиться, что входное сопротивление имеет чисто реактивный характер. Мнимая составляющая входного сопротивления может принимать любое значение в пределах от $-\infty$ до ∞ . Что касается сопротивления $Z_{\text{н}}$, то оно обусловлено, в первую очередь, совокупностью входных сопротивлений ответвлений, подключенных к рассматриваемому узлу сети. Поэтому сопротивление $Z_{\text{н}}$ также имеет чисто реактивный характер.

Следовательно, коэффициент при $I_{12}^{(1)}$ в (5) является действительным числом с положительным или отрицательным знаком. Если знак этого коэффициента положительный, то совместная работа двух передатчиков приведет к увеличению сигнала на входе приемника с адресом 4.3.4. Если этот знак отрицательный, то амплитуда результирующего сигнала оказывается меньше чем при работе одного из передатчиков. Однако и в этом случае можно добиться положительного эффекта от совместного действия двух передатчиков. Для этого достаточно поменять местами выводы катушки L_1 , подключенные к выходным зажимам передатчика с адресом 3.2.4.

Наличие потерь приводит к тому, что коэффициент при $I_{12}^{(1)}$ является некоторым комплексным числом. Поэтому начальные фазы первой и второй составляющих тока I_{14} при гармоническом внешнем воздействии могут отличаться на произвольную величину. Если они различаются по абсолютной величине меньше чем на 90° , то амплитуда результирующего сигнала от действия двух передатчиков больше, чем от любого из передатчиков, работающего отдельно. В противном случае необходимо переключение выводов катушки L_1 (или выводов катушки L_3 , подключенных к выходным зажимам передатчика с адресом 4.2.4) для получения положительного эффекта от совместного действия двух передатчиков. Принятие решения о необходимости подобного переключения возможно на этапе пуско-наладочных работ, производимых на объекте.

Заключение. Рассмотренный вариант повышения эффективности ВЧ связи за счет модификации протокола обмена данными позволяет решить задачу бесконфликтной одновременной работы двух информационных сетей. Одна из них (на локальном уровне каждого из объектов телеметрической системы) позволяет осуществлять сбор данных на объекте. Вторая информационная сеть обеспечивает возможность передачи данных от ПУ к периферийному контроллеру и обратно. Для реализации этого необходимо незначительное изменение программного обеспечения контроллера приемопередатчика. Изменение структуры сети и модификация аппаратной части приемопередатчика при этом не требуются.

Необходимо добавить, что в эксплуатируемой в настоящее время системе телемеханики «НТС-7000» [6] скорость передачи данных по локальной сети объекта составляет 4800 бод, а скорость по внешней сети — около 20 Кбод. Поэтому рассмотренный вариант модификации сетевого протокола позволяет увеличить среднюю скорость передачи данных в системе примерно на 40%.

Следует отметить, что синфазное сложение колебаний возможно не только от двух, но и от большего числа передатчиков, расположенных на объекте. Изменение начальной фазы сигнала, формируемого каждым из передатчиков, может быть и на программном уровне. При этом значение начальной фазы устанавливается таким, чтобы предусмотреть синфазное сложение сигналов в нужном направлении распространения. Это позволит увеличить мощность сигнала в канале связи, обеспечить большую помехоустойчивость сформированного сигнала и, тем самым, увеличить предельную длину участка регенерации.

Таким образом, использование рассмотренных вариантов повышения эффективности ВЧ-связи при передаче данных в распределительных силовых сетях позволяет не менее чем в два раза увеличить пропускную способность канала связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прозоровский Е. Е.** Организация протокола обмена данными в системе связи на базе распределительных силовых сетей // Материалы междунар. науч. конф. «Информационные технологии в современном мире». — Ч. 5. — Таганрог: ТРТУ, 2006. — С. 66—72.
2. Патент РФ 2221333, Кл. Н 04 В 3/54 с приоритетом от 18.12.1998. Устройство передачи информации. **Прозоровский Е. Е.** — Оpubл. 10.01.2004. Бюл. 1.
3. **Прозоровский Е. Е.** Оценка влияния земли на передаточную функцию по току отрезка высоковольтного силового кабеля // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. — Техн. науки. — 2006. — Спецвыпуск. — С. 42—45.
4. **Прозоровский Е. Е.** Моделирование процесса распространения высокочастотного сигнала по высоковольтному силовому кабелю // Электросвязь. — 2008. — № 1. — С. 42—43.
5. **Попов В. П.** Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. «Радиотехника». — М.: Высш. шк., 1985. — 496 с.
6. **Фирсов М. И., Овчинников А. Г.** Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированной системы управления технологическими процессами в городских электрических сетях на примере МРУП «Щелковские электрические сети» Московской области. Руководящие материалы по проектированию распределительных электрических сетей. — М.: ОАО РАО «ЕЭС России», ОАО «РОСЭП». Вып. 4. — 2003. — С. 59—70.