

## ПРИМЕНЕНИЕ СЛОЖНЫХ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ЗАЩИТАХ ЛЭП АБСОЛЮТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ

КУЛИКОВ А.Л., канд. техн. наук, ПЕТРУХИН А.А., инж.

Предлагается применение сложных модулированных сигналов в устройствах защит абсолютной селективности линий электропередачи для повышения точности измерений при одновременном уменьшении мощности излучения. Приведены структурная схема реализации устройства и математические расчеты, количественно показывающие преимущественное использование таких сигналов при решении задач электромагнитной совместимости релейной защиты.

*Ключевые слова:* способ передачи информации, дифференциально-фазная защита, ЛЧМ-импульс, дешифратор, время-частотная модуляция.

## APPLYING COMPLEX MODULATED SIGNALS IN ABSOLUTE SELECTIVITY PROTECTION OF POWER TRANSMISSION LINES

A.L. KULIKOV, Candidate of Engineering, A.A. PETRUKHIN, Engineer

The article considers applying complex modulated signals in protection devices of absolute selectivity at power transmission lines with the aim of increasing measurement precision and reducing radiation power. The structural scheme of the device is given as well as mathematic calculations which show advantages of modulated signals when solving problems of relay protection electromagnetic compatibility.

*Key words:* information transmission methods, phase comparison relay system, linear chirp, decoder, time-frequency modulation.

Обычно система защиты высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) состоит из основных и резервных защит. Основная защита является, как правило, защитой абсолютной селективности и требует канала связи для обмена информацией с разных концов ЛЭП. Канал связи может быть организован с использованием ВЧ-обработки, телефонных линий радио- и оптоволоконной связи. Основная защита абсолютной селективности часто называется в зарубежных источниках как «пилотная защита» (pilot relaying) [1].

Релейная часть пилотных защит содержит измерительный орган и схему принятия решения. Принцип работы реле базируется на измерениях направления, фазового угла, амплитуды тока, сопротивления и др. Решение на выдачу сигнала отключения на выключатель ЛЭП зависит от сопоставления информации на обоих концах линии.

В отличие от проводных защит абсолютной селективности, в беспроводных применяется, как правило, специальная модуляция сигналов для передачи информации с разных концов ЛЭП. Например, при организации ВЧ-связи по ЛЭП, из-за ограниченной полосы частот, требуется специальное коди-

рование для передачи направления тока, его фазового угла и других параметров, которые могут характеризовать повреждение. Если в проводных системах факт наличия повреждения ЛЭП отражается через физическое подключение (наличие или параметры тока в кабеле), то в беспроводных системах – через параметры высокочастотных сигналов.

Современные цифровые средства формирования и обработки высокочастотных сигналов позволяют использовать следующие виды модуляции [2]:

- амплитудная импульсная периодическая и непериодическая;
- импульсная модуляция с частотной манипуляцией в пределах импульсов;
- импульсная модуляция с фазовой манипуляцией в пределах импульсов;
- частотная модуляция и фазовая манипуляция близких к непрерывным (квазинепрерывным) сигналам;
- многочастотное излучение импульсных сигналов и, в частности, последовательное излучение импульсов на различающихся частотах;

- излучение, близкое к непрерывным немодулированным (в том числе и пачечным) сигналам;

- комбинации перечисленных видов модуляций.

Однако в каналах ВЧ-связи отечественных и зарубежных защит абсолютной селективности применяются модулированные сигналы, соответствующие принципам организации общей связи, без специализации к задачам релейной защиты [1, 3].

Ориентированный на решение задачи релейной защиты способ передачи информации между полукомплектами защит абсолютной селективности можно реализовать путем введения специального кодирования сигналов. При этом целесообразно использование указанных ранее видов модуляций.

В качестве варианта технического решения рассмотрим устройство для дифференциально-фазной защиты ЛЭП, содержащее два полуконспекта, каждый из которых состоит из двух приемников, синтезатора импульсов, формирователя кодов, передатчика, блока задания кодов, дешифратора блоков памяти, аналого-цифровых преобразователей и усилителей. Вычислительное устройство включает микропроцессор (или микроЭВМ), дополнительно формирующий управляющие сигналы (рис. 1).

Первые приемники принимают сигналы точного времени от одной из радиостанций (или сигналы GPS) и формируют на своих выходах реперный импульс (рис. 2, диаграмма 11), относительно которого синтезаторы формируют последовательности импульсов с частотой следования 100 Гц (рис. 2, диаграмма 12).

Импульсы частотой 100 Гц поступают на формирователи кодов  $N_1$  и  $N_2$ , пропорциональных интервалам  $T_1$  и  $T_2$  между положительными нуль-переходами напряжений в соответствующих точках ЛЭП (рис. 2) и нечетными импульсами, поступающими с выходов синтезаторов. Полученная в формирова-

телях информация об интервалах времени  $T_1$  и  $T_2$  в виде параллельных или числоимпульсных кодов, а также импульсы частотой 100 Гц с выходов синтезаторов поступают на входы дешифраторов, представляющих собой устройство для декодирования в общепринятом понимании.

Дешифраторы каждого из полуконспектов в соответствии с комбинацией сигналов на входах со своих выходов выдают управляющие сигналы либо на первый, либо на второй блоки памяти. Первый и второй блоки памяти предназначены для хранения кодов отсчетов широкополосных сигналов. Комбинация дешифратора и блока памяти позволяет реализовать специализированное запоминающее устройство, участвующее в формировании широкополосных сигналов.

В качестве примера реализации способа дифференциально-фазной защиты рассмотрим функционирование устройства с использованием широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульсов). При появлении на входе дешифратора нечетного синтезирующего импульса под воздействием управляющего сигнала с его выхода на первый блок памяти коды отсчетов ЛЧМ-импульсов поступают на первый цифроаналоговый преобразователь.

Далее через усилитель и передатчик сформированный ЛЧМ-импульс начинает излучаться в линию. Зависимость напряжения от времени для излучаемого ЛЧМ-импульса с прямоугольной огибающей описывается выражением

$$U_1(t) = U_m \cos(\omega_n t + \beta t^2/2), \quad t_n \leq t \leq t_k, \quad (1)$$

где  $t_k - t_n = T = 20$  мс – период колебаний напряжения сети;  $U_m$  – амплитуда ЛЧМ-импульса;  $\omega_n = 2\pi f_n$  – начальная частота;  $\beta = d\omega/dt$  – скорость изменения частоты.

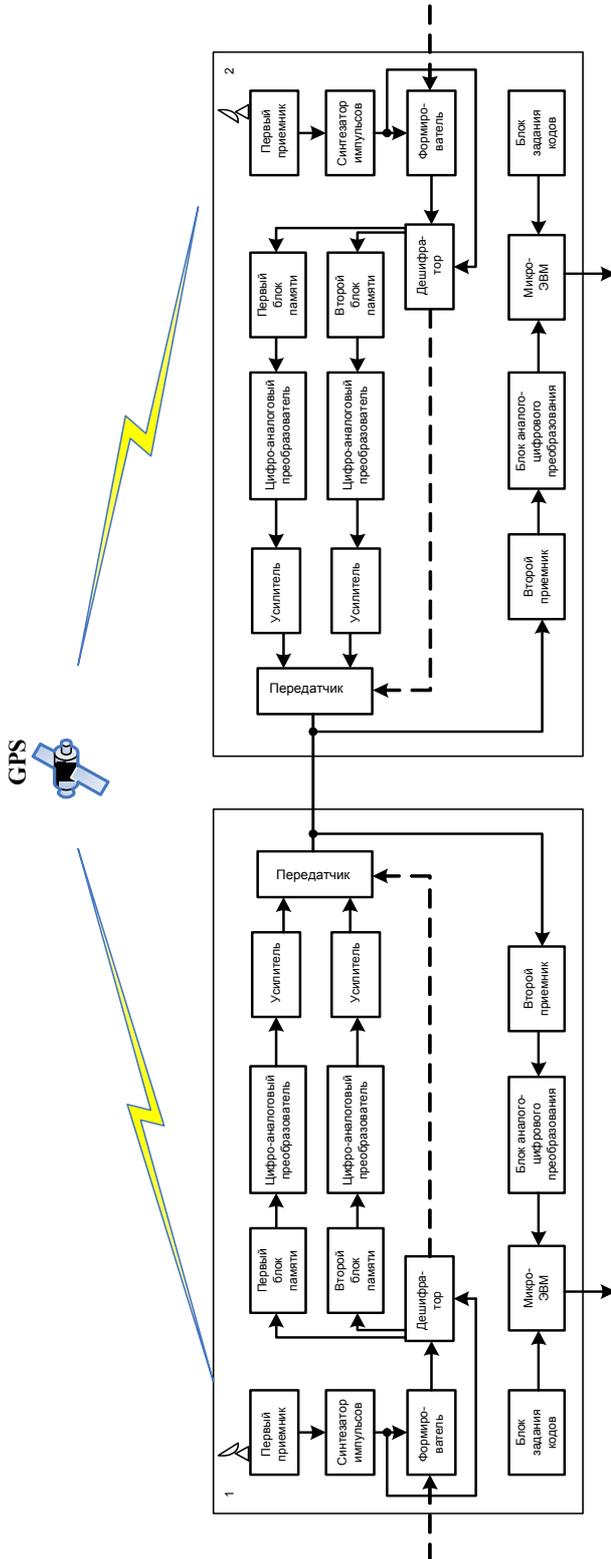


Рис. 1. Структурная схема дифференциально-фазной защиты с использованием ЛЧМ-сигналов

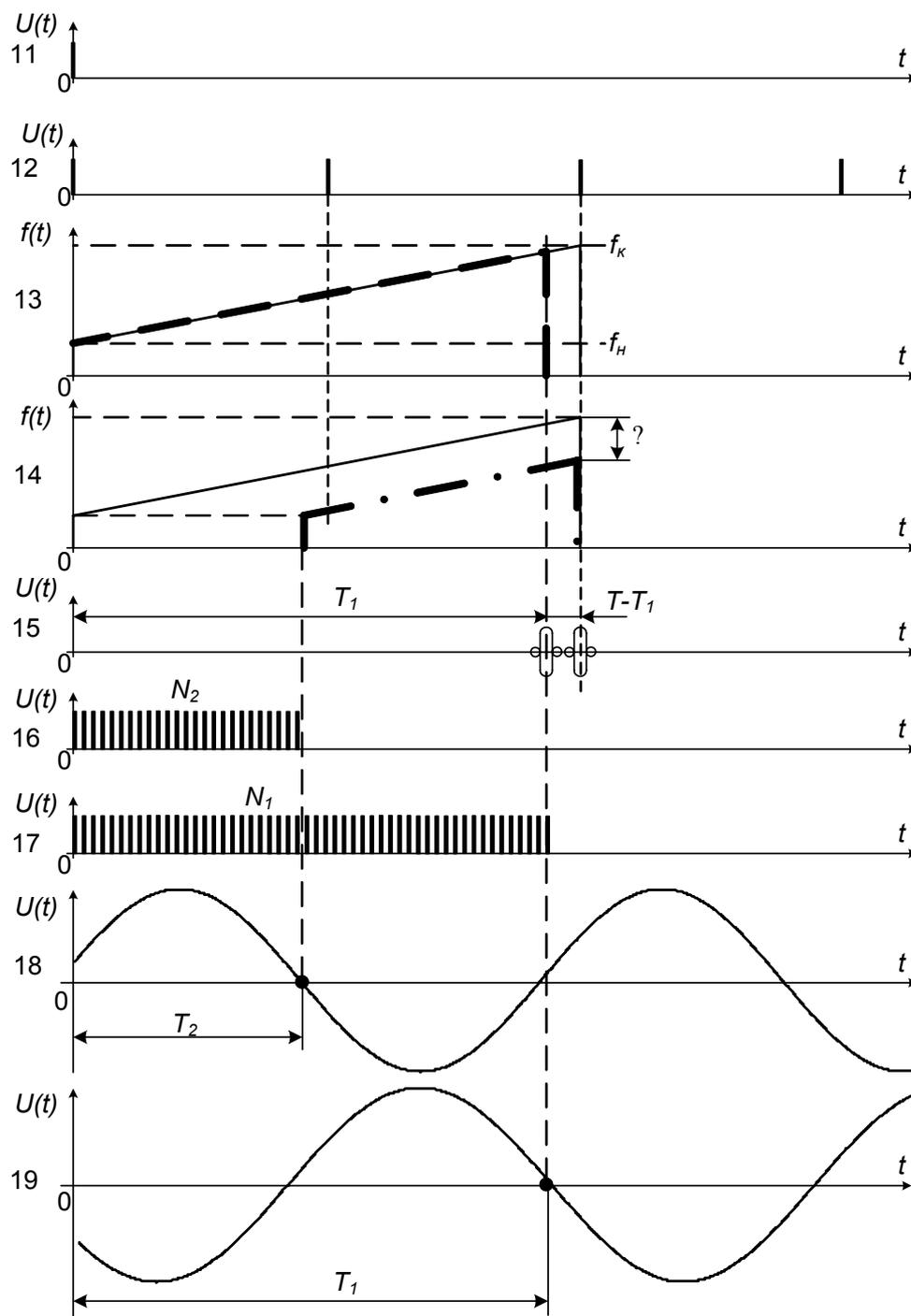


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие работу дифференциально-фазной защиты ЛЭП с использованием ЛЧМ-сигналов

Если положительный нуль-переход напряжения сети при работе полукомплекта произошел в период между нечетным и четным импульсами частотой 100 Гц (рис. 2), то дешифратор выдает управляющий сигнал на вход второго блока памяти для формирования задержанного ЛЧМ-импульса. Интервал задержки, например, соответствует длительности  $T_2$  и коду  $N_2$ , а напряжение задержанного ЛЧМ-импульса имеет вид

$$U_3(t) = U_m \cos(2\pi f_n(t-T_2) + \beta(t-T_2)^2/2). \quad (2)$$

Окончание формирования задержанного ЛЧМ-импульса  $U_3(t)$  соответствует окончанию формирования ЛЧМ-импульса  $U_1(t)$ , т.е. моменту времени  $t_k$ . Таким образом, для рассматриваемого случая передатчиком полукомплекта производится излучение незадержанного  $U_1(t)$  и задержанного  $U_3(t)$  ЛЧМ-импульсов.

Если положительный нуль-переход напряжения сети при работе полукомплекта произошел в период между четным и нечетным импульсами частотой 100 Гц (рис. 2), то дешифратор не выдает управляющий сигнал на вход второго блока памяти. Передатчик переводится в состояние, когда излучается только незадержанный ЛЧМ-импульс. При этом дешифратор находится в режиме ожидания окончания временного интервала, например  $T_1$ , соответствующего коду  $N_1$ , и при наступлении указанного времени выдает управляющий сигнал на первый блок памяти на прекращение выдачи кодов мгновенных отсчетов ЛЧМ-импульса. Формируемый ЛЧМ-импульс (рис. 2) соответствует выражению

$$U_2(t) = U_m \cos(2\pi f_n t + \beta t^2/2), \quad t_n \leq t \leq T_1, \quad (3)$$

и имеет длительность, не превышающую  $T = 20$  мс.

Таким образом, время наступления положительного нуль-перехода напряжения сети для рассмотренных случаев кодируется, соответственно, в задержке или в окончании формирования ЛЧМ-импульса.

ЛЧМ-импульсы с выходов передатчиков через второй приемник подвергаются аналого-цифровому преобразованию в соответствующем блоке и поступают в микроЭВМ. В микроЭВМ происходит вычисление угла сдвига

фаз  $\varphi$  между векторами напряжений в различных точках сети на основе время-частотной обработки ЛЧМ-импульсов [9].

Вычисленное значение угла сдвига фаз  $\varphi$  в микроЭВМ сравнивается с заданным значением уставки в блоке задания кода, и в случае превышения вырабатываются сигналы защиты ЛЭП, поступающие на входы органов аварийной автоматики.

Рассмотрим более подробно особенности время-частотной обработки ЛЧМ-импульсов. При этом ЛЧМ-импульсы (задержанные и незадержанные) подвергаются полной демодуляции с характеристиками, соответствующими незадержанному ЛЧМ-импульсу  $U_1(t)$ . Дополнительно реализуются процедуры цифрового спектрального анализа [4], например, на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) или быстрого преобразования Фурье (БПФ). Размерность процедур спектрального анализа (ДПФ, БПФ) определяется параметрами ЛЧМ-импульсов и требованиями точности определения угла сдвига фаз  $\varphi$ .

В силу идентичности характеристик задержанного и незадержанного ЛЧМ-импульсов (рис. 2) после демодуляции задержанного  $U_3(t)$  ЛЧМ-импульса образуется цифровой аналог низкочастотной составляющей напряжения

$$U_n(t) = U' \cos(\beta T_2 t + \omega_n T_2 - \beta t^2/2) = U' \cos(\Omega t + \psi(T_2)), \quad (4)$$

где  $\Omega = 2\pi f = \beta T_2$  – разность частот (рис. 2);  $\psi(T_2) = (\omega_n T_2 - \beta t^2/2)$  – набег фазы.

Из выражения (4) следует, что разностная частота  $\Omega = \beta T_2$  однозначно определяется временем задержки и соответствует моменту положительного нуль-перехода для измерений между нечетным и четным импульсами частотой 100 Гц. Таким образом, процесс демодулирования преобразует информацию, заключенную в интервале  $T_2$ , в информацию, выраженную в частоте цифрового аналога низкочастотной составляющей напряжения  $U_n(t)$ . Разностная частота  $\Omega$  определяется соотношением отсчетов ДПФ (БПФ), соответствующих задержанному и не-

задержанному ЛЧМ-импульсам (например, отсчетов амплитудно-частотного спектра).

В результате демодуляции ЛЧМ-импульса  $U_2(t)$  (выражение (3)) образуется цифровой аналог сжатого импульса, соответствующего по параметрам сжатому незадержанному импульсу  $U_1(t)$ , но отличающийся временем образования (рис. 2). Таким образом, для незадержанного импульса информация о временном интервале  $T_1$  положительного нуля-перехода содержится в моменте появления сжатого импульса или во временной разнице появления сжатых незадержанных ЛЧМ-импульсов (рис. 2).

После определения интервалов  $T_2$  и  $T_1$  на основе частотных и временных измерений микроЭВМ производит расчет угла сдвига фаз:

$$j = \frac{2\pi \times (T_1 - T_2)}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  – значение периода колебаний напряжения сети.

Следует отметить, что при время-частотной цифровой обработке ЛЧМ-импульсов учитываются задержки сигналов в каналах (линиях) связи, нелинейности их трактов, задержки в блоках устройства и элементах вычислительной техники.

Наряду с рассмотренным смешанным вариантом, когда положительные нуля-переходы происходят при разных сочетаниях нечетных и четных импульсов частотой 100 Гц, возможны несмешанные варианты. При этих вариантах информация о временных интервалах  $T_1$  и  $T_2$  выявляется либо только на основе частотных измерений разностных частот ( $\Omega_1, \Omega_2$ ) для задержанных ЛЧМ-импульсов (рис. 3), либо только на основе временных измерений появления сжатых незадержанных ЛЧМ-импульсов (рис. 4).

В заключение заметим, что работа рассматриваемого устройства может быть реализована с использованием и других сложных сигналов, например, фазо- или частотно-манипулированных (модулированных). В этом случае информация об интервалах  $T_1$  и  $T_2$  (кодах  $N_1$  и  $N_2$ ) кодируется в параметрах соответственно фазовой или частотной манипуляции (модуляции).

Поскольку измерения разности фаз непосредственно связаны с измерением временных интервалов, то точность реализации дифференциально-фазной защиты в условиях шумов и помех можно характеризовать точностью временных измерений.

Точность измерения временных интервалов с использованием различных сигналов в условиях шума [2] определяется выражением среднеквадратической ошибки (стандартного отклонения):

$$\sigma_\tau = \frac{1}{q \times \Pi_\Omega},$$

где  $q$  – отношение сигнал/шум;  $\Pi_\Omega$  – эффективная полоса сигнала.

Введем отношение значений сигнал/шум  $q$  при заданной фиксированной точности  $\sigma_\tau$  измерения временных интервалов для различных импульсов:  $q_1$  – немодулированного,  $q_2$  – ЛЧМ-импульса:

$$K = \frac{q_1}{q_2} \left| \sigma_\tau \right|. \quad (6)$$

Для простоты рассуждений считаем, что измерения временных интервалов производится на фоне «белого» шума с постоянной спектральной плотностью ( $N(f) = N_0 = \text{const}$ ), что физически оправданно [6].

Для немодулированных импульсов среднеквадратическая ошибка измерений временных интервалов определяется длительностью импульса  $t_u$  [2]:

$$\sigma_{\tau 1} = \frac{1}{q_1 \times \Pi_{\Omega 1}}, \quad \Pi_{\Omega} = \frac{1}{t_u}, \quad q_1 = \frac{t_u}{\sigma_{\tau 1}}. \quad (7)$$

При использовании сложных сигналов, например, импульса с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и прямоугольной огибающей, среднеквадратическая ошибка измерения временных интервалов составляет [2]

$$\sigma_{\tau 2} = \frac{\sqrt{3}}{q_2 \times \Pi_{\Omega 2} \times \pi}, \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{\sqrt{3}}{\sigma_{\tau 2} \times \Pi_{\Omega 2} \times \pi}, \quad (9)$$

где  $\Pi_{\Omega 2} = f_k - f_n$  – ширина спектра, (девиация частоты) ЛЧМ-импульса с прямоугольной огибающей.

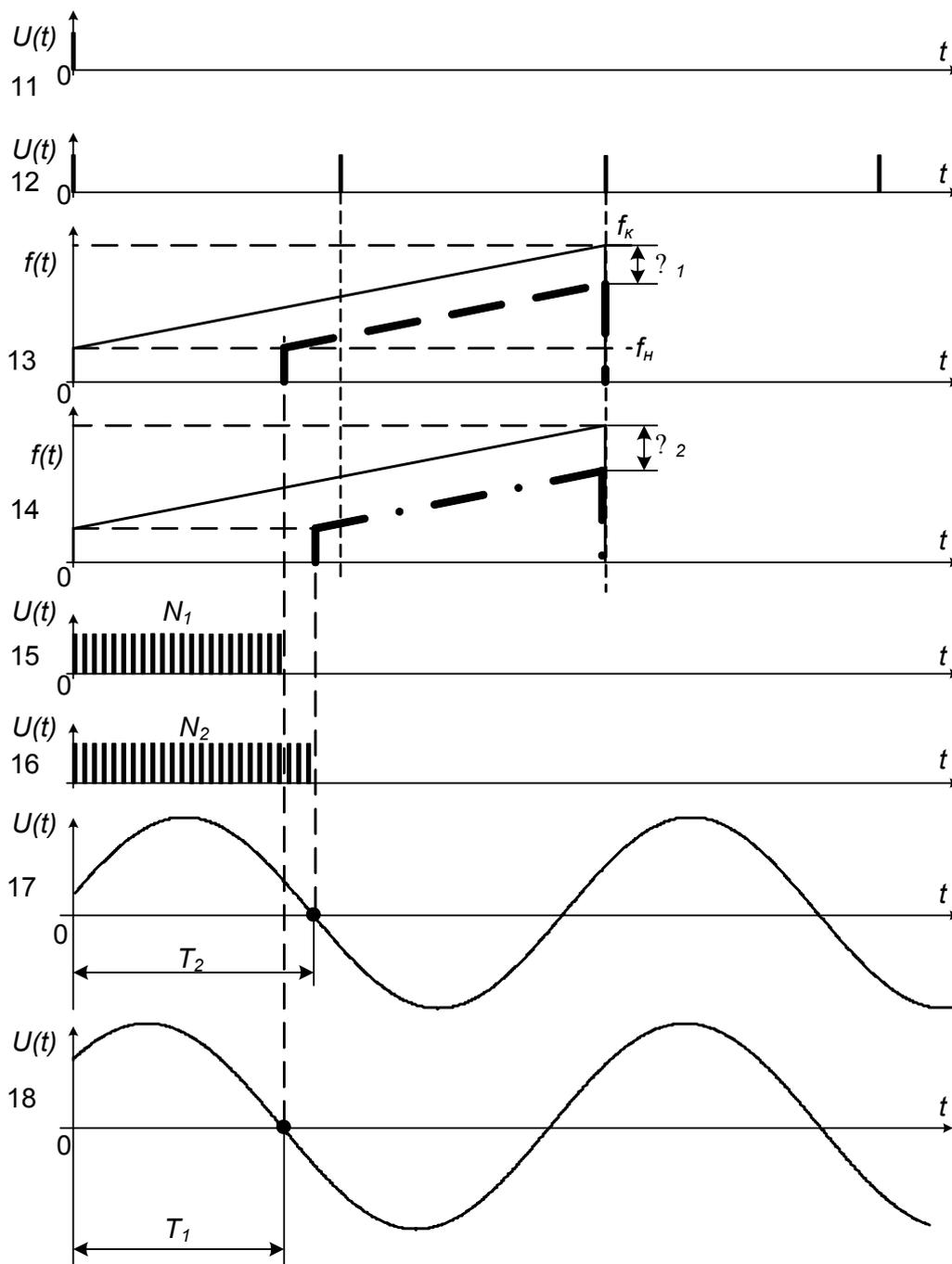


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие работу устройства защиты для задержанных ЛЧМ-импульсов

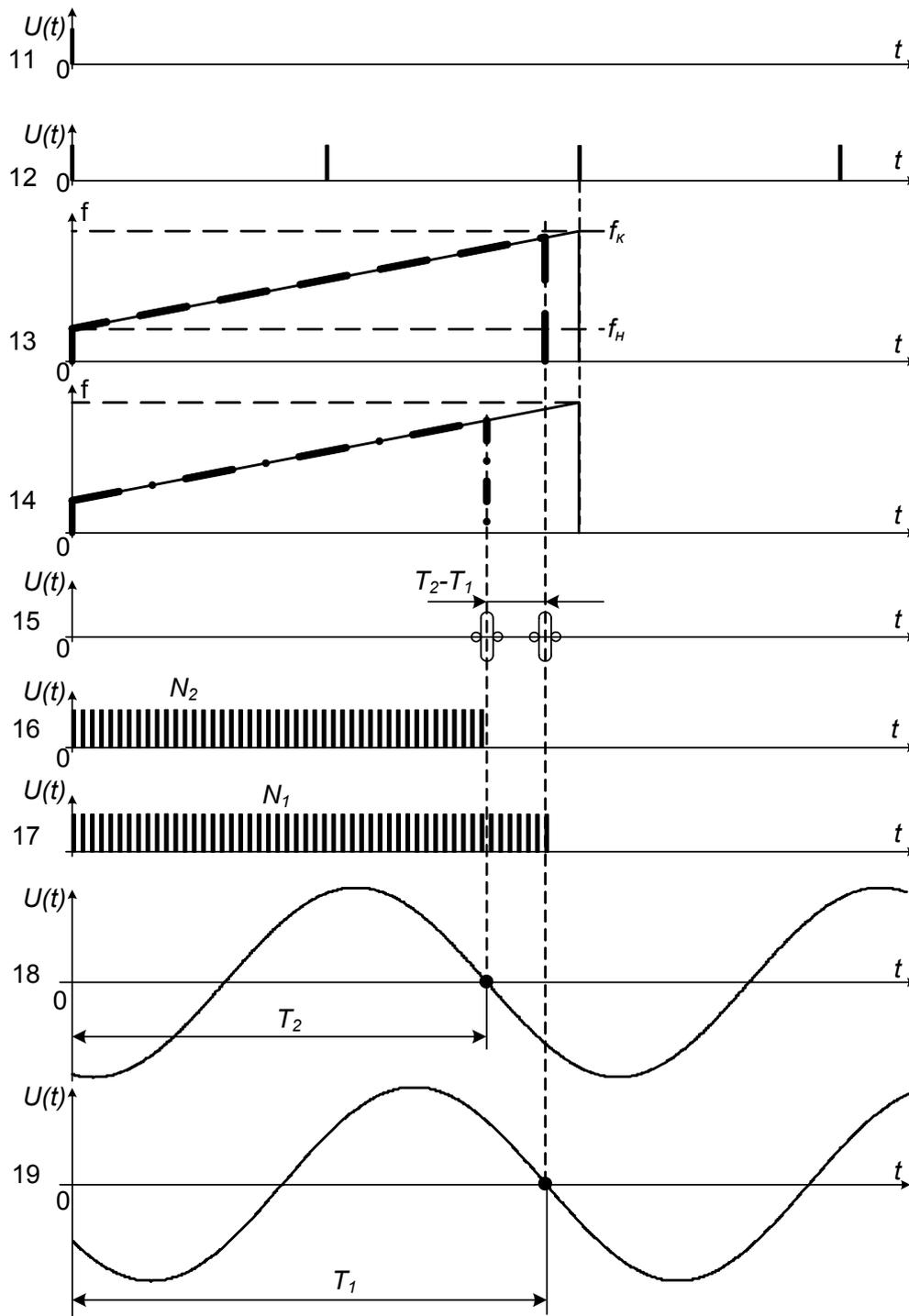


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие работу устройства защиты для сжатых незадержанных ЛЧМ-импульсов

Таким образом, выражение (6) приобретает вид

$$K = \frac{q_1}{q_2} = \frac{t_u \times \sigma_{\tau 2} \times \Pi_{\Omega 2} \times \pi}{\sigma_{\tau 1} \times \sqrt{3}}. \quad (10)$$

При фиксированном  $\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2}$  имеем

$$K = \frac{t_u \times \Pi_{\Omega 2} \times \pi}{\sqrt{3}} = \frac{B \times \pi}{\sqrt{3}} \approx 1,81 B, \quad (11)$$

где  $B$  – база сигнала.

В трактах высокочастотной обработки ЛЭП возможна передача сигналов в пределах полосы  $\Pi_{\Omega 2} = f_k - f_n = 10^6$  Гц = 1МГц [6].

Исходя из принципов работы предлагаемого устройства, длительность ЛЧМ-импульса не может быть меньше  $t_u = 10^{-2}$  с = 10 мс, следовательно, база сигнала  $B$  может достигать значений

$$B = t_u \Pi_{\Omega 2} = 10^{-2} \cdot 10^6 = 10^4, \quad (12)$$

а значение коэффициента, соответственно, –

$$K = 1,81 B = 1,81 \cdot 10^4. \quad (13)$$

Полученный результат расчетов показывает, что при заданной точности измерения временных интервалов (значений фазовых углов) предлагаемое устройство производит надежные оценки при меньших более чем в 10000 раз отношениях сигнал/шум. Учитывая, что

$$q = \sqrt{\frac{2E_u}{N_0}}, \quad (14)$$

где  $E_u$  – энергия импульса, в рассматриваемом устройстве может быть обеспечена точность, одинаковая, с точностью при исполь-

зовании немодулированного излучения при сигнале с меньшей в 100 раз амплитудой. Или наоборот, при одинаковой амплитуде сигнала обеспечивается, соответственно, более высокая точность измерений в условиях шумов и помех.

Таким образом, применение сложных сигналов с время-частотной модуляцией, обеспечивающих высокую разрешающую способность, точность временных измерений и возможность использования эффективных методов обработки при воздействии шумов и помех, является перспективным направлением совершенствования защит абсолютной селективности. Анализ энергетических характеристик таких сигналов показывает преимущественное их использование при решении задач электромагнитной совместимости релейной защиты.

#### Список литературы

1. Elmore W.A. Pilot protective relaying. Marcel Dekker Inc. – New York, 2000.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007.
3. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
4. Патент РФ №2307437 МПК H02H3/28: Способ дифференциально-фазной защиты линии электропередачи / А.Л. Куликов, Д.В. Николаенко; Опубл. 27.09.2007, бюллетень №27.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его применения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1982.

Куликов Александр Леонидович,  
филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС,  
кандидат технических наук, директор,  
e-mail: info@nrmes.elektra.ru

Петрухин Андрей Алексеевич,  
филиал ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС,  
главный специалист, руководитель группы,  
e-mail: petruhin@nrmes.elektra.ru