

150А. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Принадлежности: персональный компьютер; USB-осциллограф АКПП-4107; функциональный генератор WaveStation 2012; соединительные кабели.

В работе изучаются спектры периодических электрических сигналов различной формы (последовательности прямоугольных импульсов и цугов, а также амплитудно- и фазо-модулированных гармонических колебаний). Спектры этих сигналов наблюдаются с помощью спектроанализатора, входящего в состав USB-осциллографа и сравниваются с рассчитанными теоретически.

Экспериментальная установка.

Схема установки приведена на рис. 1.



Рис. 1

Функциональный генератор WaveStation 2012 позволяет сформировать два различных электрических сигнала, которые выводятся на два независимых канала – "CH1" и "CH2". Сигнал с канала "CH1" подается на вход "А", а сигнал с канала "CH2" – на вход "В" USB-осциллографа. Затем эти сигналы подаются на вход компьютера через USB-соединение. При работе USB-осциллографа в режиме осциллографа, на экране компьютера можно наблюдать каждый из сигналов в отдельности, а также их произведение. В режиме спектроанализатора можно наблюдать спектры этих сигналов.

При включении функционального генератора, на его экране отображается информация о параметрах электрического сигнала. На рис. 2 показаны области на экране генератора, в которых отображены следующие данные:

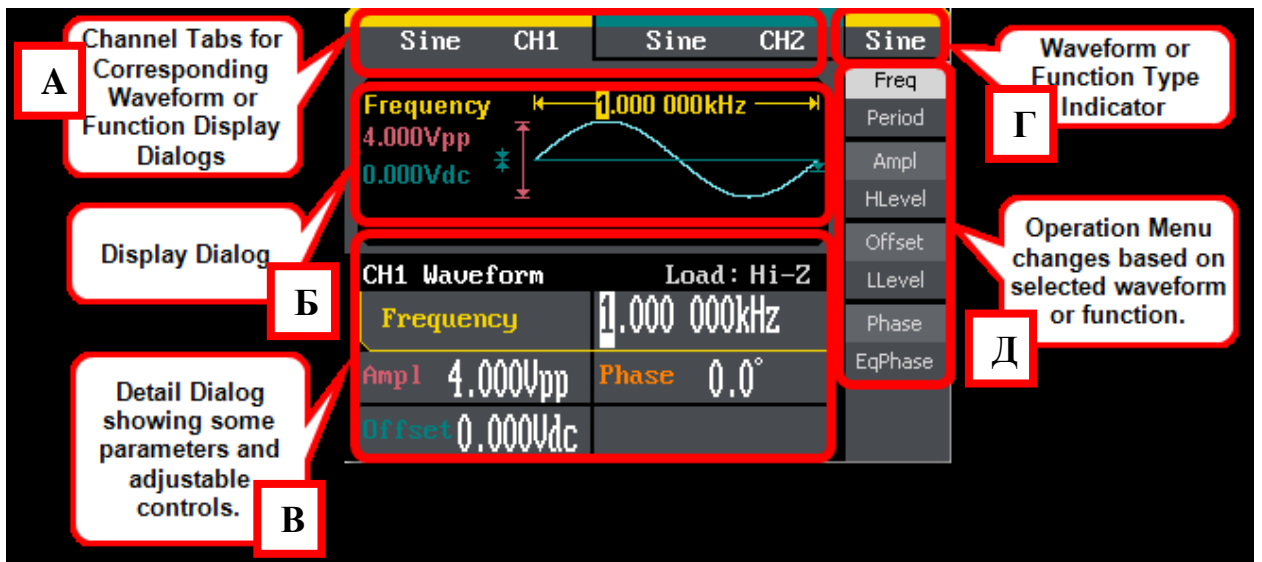


Рис. 2

А – форма или тип сигнала и номер выходного канала;

Б – форма и параметры выходного сигнала;

В – область установки параметров выходного сигнала;

Г – форма или тип сигнала;

Д – экранное меню для установки параметров сигнала.

Передняя панель функционального генератора показана на рис. 3.



Рис. 3

1 – кнопка включения; 2 – USB-разъем; 3 – экран; 4 – кнопки экранного

меню; 5 – кнопки выбора типа сигналов; 6 – цифровая панель; 7 – функци-

ональные кнопки; 8 – разъемы с кнопками включения (выключения) вы-

ходных сигналов 1-го и 2-го каналов; **9** – кнопки перемещения; **10** – подстроечный регулятор.


Общие принципы работы с генератором.





После включения кнопкой **1** питания генератора, одной из кнопок **5** выбирается один из типов сигналов. При этом кнопки **4** экранного меню используются для выбора и изменения параметров сигнала. Большая часть кнопок экранного меню регулирует два связанных между собой параметра (например: частота – период), которые отображаются в правой части экрана напротив соответствующей кнопки. При однократном нажатии такой кнопки активируется верхний параметр, при повторном нажатии – нижний. Активированный параметр отображается на подсвеченном фоне. Изменить один из параметров сигнала можно выделив его одной из кнопок **4**, после чего один из числовых разрядов этого параметра на экране становится выделенным. Кнопки перемещения **9** " \triangleleft ", " \triangleright " перемещают выделенный числовой разряд параметра, который можно изменить с помощью цифровой панели **6** или подстроечного регулятора **10**. После установки числового значения параметра, надо нажать соответствующую кнопку **4** для установки единицы измерения данного параметра.

Задание.



I Подготовка приборов к работе.




1. Проверьте соединение блоков экспериментальной установки, согласно рис. 1 (канал "CH1" соединен с разъемом "A", а канал "CH2" – с разъемом "B"). Включите компьютер и функциональный генератор.
2. Запустите программу "PicoScope 6" на рабочем столе компьютера. После запуска программы, в центре экрана компьютера появляется область, в которой можно наблюдать электрические сигналы, поступающие на USB-осциллограф, а также кнопки управления. Программа "PicoScope 6" может работать в режиме осциллографа и спектр анали-

затора. При запуске программы она переходит в режим осциллографа (нажата кнопка  – режим "Осциллограф").

3. Над разъемами генератора "CH1" и "CH2" нажмите обе кнопки **Output**.
4. Установите автоматический запуск развертки по сигналу с канала "A". Для этого внизу окна программы в меню "Триггер" выберите "Авто", затем в соседнем окошке выберите "A". Нажмите кнопку  – "Автоматическая настройка" и получите на экране устойчивое изображение сигнала, перемещая мышкой желтый квадратик маркера запуска (он определяет уровень запуска и расположение сигнала по горизонтальной оси). Масштабы по вертикальной и горизонтальной осям можно менять, выбирая соответствующие значения в двух окошках в верхней части экрана. Одно из них устанавливает диапазон входного сигнала (для канала "A" – справа от кнопки , значение по умолчанию "Авто"), другое – время, соответствующее одному делению горизонтальной оси. Отдельные области экрана можно увеличивать (уменьшать) с помощью кнопок  и .


II Исследование спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов.

5. На генераторе кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH1" и нажмите кнопку **Pulse** (импульсный сигнал). Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Ampl** : 1 Vpp (разность максимального и минимального значений сигнала 1 В); б) **Offset** : 0.5 Vdc (смещение сигнала на 0,5 В); в) **Freq** : 1 kHz (частота повторения импульсов $f_{\text{повт}} = 1$ кГц); г) **PulWidth** : 100 μ s (длительность импульса $\tau = 100$ мкс).
6. В окне программы нажмите кнопку  – режим "Спектр", затем кнопку  – "Параметры спектра", и в появившемся окне установите пара-

метры: а) "Масштаб": линейный; б) "Элементы разрешения спектра":
2048. В верхней части экрана установите удобный масштаб ($\approx \pm 2$ В) по
вертикальной оси (справа от кнопки ) , а по горизонтальной оси –
"48,83 кГц". Отдельные области спектра на экране можно увеличивать
(уменьшать) с помощью кнопок  и .

7. Проанализируйте, как меняется спектр ($\Delta\nu$ и $\delta\nu$ на рис. 6.3 Введения):
а) при увеличении τ вдвое при неизменной частоте $f_{\text{повт}} = 1$ кГц; б) при
увеличении $f_{\text{повт}}$ вдвое при неизменном $\tau = 100$ мкс. Опишите результа-
ты или зарисуйте в тетрадь качественную картину.

Внимание ! При изменении на генераторе $f_{\text{повт}}$, автоматически изменя-
ется τ , поэтому после изменения $f_{\text{повт}}$, надо установить прежнее значе-
ние τ .






8. Проведите измерения зависимости ширины спектра $\Delta\nu$ от длительности
импульса τ при увеличении τ от 40 до 200 мкс (6 – 8 значений при $f_{\text{повт}} =$
1 кГц).
9. Для $f_{\text{повт}} = 1$ кГц установите $\tau = 50$ мкс. В окне программы нажмите
кнопку  – "Выбор". Если левой кнопкой мышки щелкнуть на вер-
шине выбранной гармоники, то в отдельном окошке появляются значе-
ния ее амплитуды и частоты. Измерьте частоты и амплитуды спек-
тральных составляющих сигнала и запишите результаты в таблицу:



№ гармоники, частота, амплитуда.

Проведите аналогичные измерения для импульса с $\tau = 100$ мкс. По по-
лученным данным постройте картины спектров.

10. Постройте график $\Delta\nu(1/\tau)$ и по его наклону убедитесь в справедливости
соотношения неопределенностей.


III Исследование спектра периодической последовательности
цугов гармонических колебаний.

11. В окне программы нажмите  – режим "Осциллограф". На генераторе кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH2" и нажмите кнопку **Sine** (синусоидальный сигнал). Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Ampl** : 2 Vpp (двойная амплитуда сигнала 2 В); б) **Offset** : 0 Vdc (смещение сигнала отсутствует); в) **Freq** : 25 kHz (частота несущей $\nu_0 = 25$ кГц).
12. В окне программы включите канал "B", щелкнув в верхней части экрана справа от кнопки  и заменив значение "Выкл" на "Авто". Нажмите кнопку  – "Автоматическая настройка".
13. На генераторе кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH1" и нажмите кнопку **Pulse** (импульсный сигнал). Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Ampl** : 1 Vpp (разность максимального и минимального значений сигнала 1 В); б) **Offset** : 0.5 Vdc (смещение сигнала на 0,5 В); в) **Freq** : 1 kHz (частота повторения импульсов $f_{\text{повт}} = 1$ кГц); г) **PulWidth** : 100 μ s (длительность импульса $\tau = 100$ мкс).
14. В окне программы выберите в меню: "Сервис" → "Математические каналы", выделите пункт, соответствующий произведению "А*В" и нажмите "Ок". Выберите в меню: "Виды" → "Каналы", выделите пункт, соответствующий произведению "А*В", а с пунктов "А" и "В" выделение снимите. На экране должна быть видна периодическая последовательность цугов.
15. В окне программы нажмите  – режим "Спектр" и включите канал "B", щелкнув в верхней части экрана справа от кнопки  и заменив значение "Выкл" на "Авто". Выберите в меню: "Сервис" → "Математи-

ческие каналы", выделите пункт, соответствующий произведению "А*В" и нажмите "Ок". Выберите в меню: "Виды" → "Каналы", выделите пункт, соответствующий произведению "А*В", а с пунктов "А" и "В" выделение снимите. В верхней части экрана установите масштаб по вертикальной оси "Авто" (справа от кнопки ) , а по горизонтальной оси "48,83 кГц". С помощью кнопки  увеличьте по вертикали изображение спектра. При нажатии на эту кнопку, а затем на область в пределах спектра, появляется окно "Общий вид". Опустите в этом окне прямоугольную рамку вниз и установите удобную для наблюдения спектра ее высоту и ширину.

16. Проанализируйте, как изменяется вид спектра при увеличении длительности τ импульса вдвое от 100 до 200 мкс.
17. Установите длительность импульса $\tau = 100$ мкс. Кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH2". Проследите, как меняется картина спектра при изменении несущей частоты ν_0 ($\nu_0 = 10, 25$ и 40 кГц). Опишите результаты или зарисуйте в тетради качественную картину.
18. Установите частоту несущей $\nu_0 = 30$ кГц. Кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH1". Установите длительность импульса $\tau = 100$ мкс. Определите расстояние $\delta\nu$ между соседними спектральными компонентами для разных частот повторения импульсов $f_{\text{повт}}$. Проведите измерения для $f_{\text{повт}} = 0,5, 1, 2, 4$ и 5 кГц.


Внимание ! При изменении на генераторе $f_{\text{повт}}$, автоматически изменяется τ , поэтому после изменения $f_{\text{повт}}$, надо установить прежнее значение τ .




19. Установите $\tau = 100$ мкс и $f_{\text{повт}} = 1$ кГц. В окне программы нажмите кнопку  – "Выбор". Щелкая левой кнопкой мышки по вершинам гармоник спектра, определите их амплитуды и частоты. Результаты запишите в таблицу: **№ гармоники, частота, амплитуда**. Проведите

аналогичные измерения для импульса с $\tau = 100$ мкс и $f_{\text{повт}} = 2$ кГц. По полученным данным постройте картины спектров.

20. Постройте график $\delta v(f_{\text{повт}})$. Найдите угловой коэффициент полученной зависимости и сравните с теоретическим значением.
21. Сравните построенные спектры (пп. 9, 20):
 - а) прямоугольных импульсов при одинаковых периодах и разных длительностях импульса τ ,
 - б) цугов при одинаковых τ и разных $f_{\text{повт}}$;
 - в) цугов и прямоугольных импульсов при одинаковых значениях τ и $f_{\text{повт}}$.

IV Исследование спектра гармонических сигналов, модулированных по амплитуде.

22. В окне программы нажмите  – режим "Осциллограф". Выберите в меню: "Виды" → "Каналы", выделите пункт, соответствующий производству "А*В" и пункт "А".
23. На генераторе кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH2" и нажмите кнопку **Sine** (синусоидальный сигнал). Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Ampl** : 1 Vpp (двойная амплитуда сигнала 1 В); б) **Offset** : 0 Vdc (смещение сигнала отсутствует); в) **Freq** : 25 kHz (частота несущей $\nu_0 = 25$ кГц).
24. Кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH1" и нажмите кнопку **Sine**. Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Offset** : 1 Vdc (смещение сигнала на 1 В); б) **Freq** : 1 kHz (частота модуляции $f_{\text{мод}} = 1$ кГц); в) **Ampl** : 0.2 Vpp (двойная амплитуда сигнала 0,2 В). Перемещая мышкой желтый квадратик маркера запуска (вблизи значения $\cong 1$ В по вертикальной оси), получите на экране устойчивое изображение сигнала.

25. В окне программы нажмите  – режим "Спектр". В верхней части экрана установите масштаб по вертикальной оси "Авто" (справа от кнопки ) , а по горизонтальной оси "48,83 кГц". Нажмите кнопку  – "Выбор".
26. Меняя двойную амплитуду сигнала канала "СН1" от 0,2 до 2 В (возьмите 5 – 6 значений), измеряйте для каждого значения максимальную A_{\max} и минимальную A_{\min} амплитуды сигналов модулированного колебания (переключаясь на вкладку "Осциллограф") и амплитуды спектральных компонент (переключаясь на вкладку "Спектр"). Амплитуды можно определить, если нажать левой кнопкой мышки на выбранную точку экрана. Амплитуда равна значению в появляющемся окошке, соответствующему произведению "А*В". Рассчитайте соответствующие значения глубины модуляции m по формуле 6.13 Введения.
27. При 100% глубине модуляции ($A_{\min} = 0$) посмотрите, как меняется спектр при увеличении частоты модуляции $f_{\text{мод}}$.
28. Постройте график отношения $A_{\text{бок}}/A_{\text{осн}}$ в зависимости от m . Определите угловой коэффициент наклона графика и сравните с рассчитанным с помощью формулы (6.14).

У Исследование спектра гармонических сигналов,
модулированных по частоте (дополнительное задание).

При частотной модуляции мгновенная частота колебания равна:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta \omega_m \cdot \sin \Omega t, \quad (1)$$

где $\Delta \omega_m = 2\pi \Delta f_m$ – амплитуда отклонения частоты (девиация частоты),
 $\Omega = 2\pi F$ – модулирующая частота. Фаза частотно-модулированного колебания:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t - \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \cos \Omega t. \quad (2)$$

Величина $\beta = \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} = \frac{\Delta f_m}{F}$ называется индексом частотной модуляции. Частотно-модулированное колебание имеет вид:

$$f(t) = A_0 \cos \varphi(t) = A_0 \cos[\omega_0 t - \beta \cos \Omega t]. \quad (3)$$

Рассмотрим частный случай, когда $\beta \ll 1$. Из (3) имеем:

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 \cos \omega_0 t \cdot \cos(\beta \cos \Omega t) + A_0 \sin \omega_0 t \cdot \sin(\beta \cos \Omega t) \cong \\ &\cong A_0 \cos \omega_0 t + A_0 \beta \sin \omega_0 t \cdot \cos \Omega t \cong \\ &\cong A_0 \cos \omega_0 t + \frac{A_0 \beta}{2} \cos \left[(\omega_0 - \Omega)t - \frac{\pi}{2} \right] + \frac{A_0 \beta}{2} \cos \left[(\omega_0 + \Omega)t - \frac{\pi}{2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, спектр частотно-модулированного колебания при $\beta \ll 1$ состоит из колебания с основной частотой ω_0 и амплитудой A_0 и двух боковых компонент с частотами $(\omega_0 \pm \Omega)$ и амплитудами $A_0 \beta / 2$. Данный спектр отличается от спектра амплитудно-модулированного колебания (II, 14) тем, что боковые компоненты спектра сдвинуты по фазе на 90° . Сложение несущего колебания и боковых составляющих при амплитудной и частотной модуляции (при $\beta \ll 1$) показано на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при $\beta \ll 1$ амплитуда частотно-модулированного колебания практически не меняется. При увеличении β спектр частотно-модулированного колебания становится более сложным, и в общем случае надо учитывать, что он содержит кроме колебания с частотой ω_0 бесконечное число боковых частот $(\omega_0 \pm k\Omega)$, где $k = 1, 2, 3, \dots$

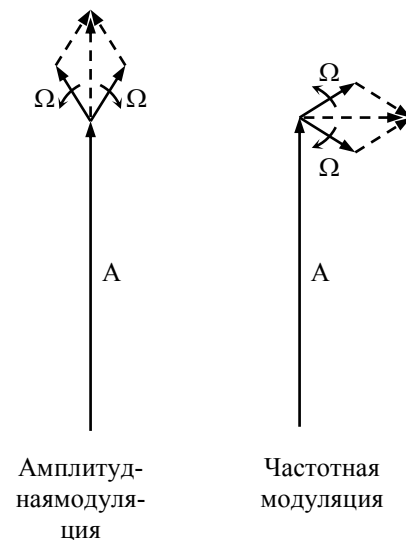







Рис. 4

Амплитуда колебания на основной частоте равна $A_0 J_0(\beta)$, а на боковых частотах $A_0 J_k(\beta)$, где $J_k(\beta)$ – функции Бесселя 1-го рода. На практике ширину спектра можно считать ограниченной, т.к. функции $J_k(\beta)$ при $k > \beta$ имеют

малое значение. В предельном случае $\beta \gg 1$, ширина спектра примерно равна $2\Delta f_m$.

Дополнительное задание.

29. В окне программы нажмите  – режим "Осциллограф". Выберите в меню: "Виды" → "Каналы", оставьте выделение пункта "А", а с пункта "А*В" выделение снимите.
30. На генераторе кнопкой **CH1/2** выберите вкладку для канала "CH1" и нажмите кнопку **Sine** (синусоидальный сигнал). Кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите: а) **Ampl** : 1 Vpp (двойная амплитуда сигнала 1 В); б) **Offset** : 0 Vdc (смещение сигнала отсутствует); в) **Freq** : 25 kHz (частота несущей $\nu_0 = 25$ кГц). Нажмите кнопку **Mod** и опять кнопками **4** экранного меню (рис. 3) установите параметры для модулирующей функции: а) **Type** : FM (частотная модуляция; для выбора данного параметра необходимо нажать на соответствующую кнопку несколько раз); б) **Shape** : Sine (синусоидальный закон изменения частоты); в) **FM Freq** : 1 kHz ($F = 1$ кГц); г) **FM Dev** : 100 Hz ($\Delta f_m = 100$ Гц).
31. В окне программы нажмите кнопку  – "Автоматическая настройка" и наблюдайте частотно-модулированное колебание на экране. Нажмите кнопку  – режим "Спектр". Выберите в меню: "Виды" → "Каналы", выделите пункт "А", а с пункта "А*В" выделение снимите. В верхней части экрана установите масштаб по вертикальной оси "Авто" (справа от кнопки ), а по горизонтальной оси "48,83 кГц". Нажмите кнопку  – "Выбор".
32. Меняя на генераторе девиацию частоты Δf_m от 100 до 1000 Гц, измерьте амплитуду A_0 компоненты на основной частоте ν_0 и амплитуды $A_{\pm 1}$ на частотах $(\nu_0 \pm F)$. При больших значениях Δf_m , измерьте также амплитуды $A_{\pm 2}$ компонент на частотах $(\nu_0 \pm 2F)$. Амплитуды можно опреде-

лить в появляющемся окошке, если нажать левой кнопкой мышки на выбранную точку экрана. Обратите внимание, что при увеличении Δf_m , число боковых спектральных компонент увеличивается.

33. Если продолжать увеличивать Δf_m , спектр становится еще более сложным. Пронаблюдайте, как меняется спектр при увеличении Δf_m от 1 до 10 кГц.
34. Рассчитайте для каждого значения Δf_m индекс модуляции β и постройте график отношения $A_{\pm 1}/A_0$ в зависимости от β . Проведите предельную прямую, соответствующую случаю $\beta \ll 1$, определите угловой коэффициент наклона этой прямой и сравните с рассчитанным с помощью формулы (4). Из графика определите диапазон значений β , для которых экспериментальная зависимость отличается от предельной прямой менее чем на 10%.