

## Метод измерения амплитудно-частотной характеристики с использованием широкополосного сигнала

*В.Н. Таран<sup>1</sup>, Е.Ю. Кисловский<sup>2</sup>, И.К. Цыбрый<sup>2</sup>, Д.Е. Лилянин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Технологический институт (филиал) ДГТУ в г. Азове*

<sup>2</sup>*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В работе представлено описание метода измерения амплитудно-частотных характеристик с использованием случайного широкополосного сигнала в качестве тестового. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного метода, а также аппаратная реализация измерителя.

**Ключевые слова:** измеритель амплитудно-частотных характеристик, идентификация, уравнение Винера-Хопфа, дискретное преобразование Фурье.

### Введение

Контроль параметров элементов систем автоматического регулирования является одним из самых важных процессов в ходе работ по их настройке и проверке, поскольку именно на этом этапе можно выявить всевозможные производственные ошибки и дефекты, которые в дальнейшем могут быть причиной некорректного функционирования системы.

На практике, для получения необходимой информации целесообразно проводить измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) настраиваемого устройства. Существуют два подхода к проблеме экспериментального построения АЧХ. Согласно первому, характеристика строится на основе измеренных откликов системы, вызванных подачей на ее вход гармонического сигнала постоянной амплитуды и переменной частоты [1-3]. Для второго подхода характерно использование в качестве тестового воздействия широкополосного сигнала и последующего Фурье-преобразования отклика [1, 4].

Методики первой группы достаточно хорошо описаны и реализованы в большинстве ныне производимых моделей измерителей АЧХ. Приборы этого типа относительно просты в реализации и обладают высоким быстродействием. Вторая группа измерителей, ввиду дополнительных затрат

---

времени, связанных с получением переходной функции и Фурье-образа, не обеспечивает сопоставимого с ранее упомянутыми системами быстродействия, однако может быть более предпочтительной в случае наличия ограничений в исследуемом объекте на использование гармонических тестовых сигналов. Так для следящих систем [5] использование случайного стационарного сигнала менее пагубно для ресурса механических узлов и токоподводов, нежели синусоидальный или импульсный тестовые сигналы. Еще одна область применения – аппаратура, имеющая в своем составе систему автоматической регулировки усиления (АРУ), работа которой не позволит выявить разницу амплитуд при различных частотах гармонического сигнала, если время переключения частот превышает постоянную срабатывания АРУ.

### Описание метода

Рассматриваемая задача решается с использованием статистического метода идентификации. На систему с одним входом и выходом подается широкополосный сигнал  $x(t)$  и регистрируется отклик  $y(t)$ . Для определения весовой функции  $h(t)$  используется метод прямой весовой оптимизации, согласно которому модель системы может быть представлена в виде уравнения Винера-Хопфа 1-го рода:

$$K_{xy}(\tau) + \int_0^t h(t)K_x(t-\tau)d\tau = 0 \quad (1)$$

где  $K_{xy}(\tau)$  - корреляция входной  $x(t)$  и выходной  $y(t)$  функций,  $K_x(t-\tau)$  - автокорреляция функции  $x(t)$ .

Предполагается, что данные, полученные в ходе эксперимента будут дискретны, следовательно уравнение (1) примет матричный вид:

$$x = C^{-1} * b \quad (2)$$

где вектор  $b$  и матрица  $C$  содержат коэффициенты  $b_n = K_{xy}(n\Delta t)$  и  $C_{in} = K_x((i-n)\Delta t)$  соответственно, вектор  $x$  - значения весовой функции,  $i$  и  $n$  - номера элементов матриц.

Заключительным этапом в вычислении АЧХ является дискретное преобразование Фурье (ДПФ) полученного при решении уравнения (2) вектора  $x$ :

$$A(k) = \sum_{j=1}^N x(j) * \exp(-i * k * \Delta\omega * j * \Delta t) * \Delta t \quad (3)$$

где  $j$  - номер отсчета во временном диапазоне,  $k$  - номер отсчета в частотном диапазоне,  $\Delta\omega$  - шаг по частоте,  $\Delta t$  - шаг по времени.

### Апробация метода

Для экспериментальной проверки методики выберем в качестве объекта исследования электронное устройство - активный режекторный фильтр с  $f_p \approx 795$  Гц. Выбранный объект не требует дополнительных согласующих устройств при использовании периферийных устройств компьютера для задания входного тестового сигнала и удобен с точки зрения контроля параметров отдельных компонентов. Математическая модель (ММ) такого фильтра может быть представлена в виде передаточной функции:

$$W(p) = \frac{T_1 p^2 + 1}{T_2 p^2 + T_3 p + 1} \quad (4)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  - постоянные времени, определяемые параметрами схемы,  $p$  - оператор Лапласа.

Согласно методу в ходе эксперимента необходимо обеспечить синхронное измерение входного и выходного сигнала. В данном примере, как и в [6-8] в качестве тестового сигнала был выбран белый гауссовский шум (БГШ), а сбор экспериментальных данных осуществлялся с помощью двухканального цифрового осциллографа. Важно отметить, что при выборе

частоты дискретизации входного сигнала и количества выборок в секунду при измерении необходимо руководствоваться теоремой Котельникова. Полученные данные используются для формирования элементов матричного уравнения (2). Результат расчета импульсной характеристики представлен на «рис.1».

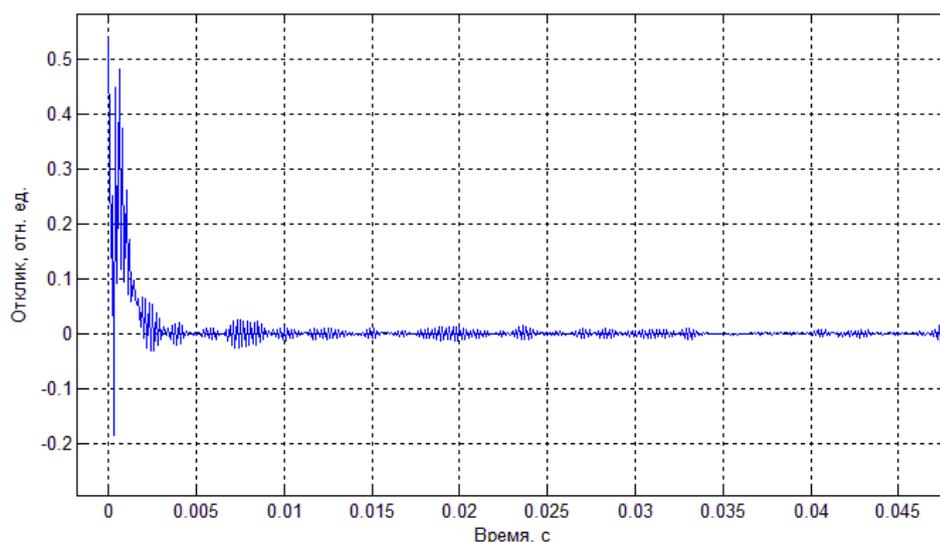


Рис. 1. – Импульсная характеристика режекторного фильтра

Следует отметить, что у метода есть особенность, связанная с тем, что импульсная характеристика, полученная в результате решения уравнения (2) имеет резонанс в области частот  $\omega = 2\pi 5 \cdot 10^3$  рад/с, обусловленный вычислительной неустойчивостью, что следует учитывать при анализе Фурье-образа. Для контроля полученной после ДПФ характеристики будем использовать АЧХ модели (4) и АЧХ измеренную с использованием синусоидального сигнала. На «рис.2» кривая синего цвета - АЧХ, полученная с использованием случайного сигнала, зеленая - ММ, красная - АЧХ, полученная с использованием гармонического сигнала.

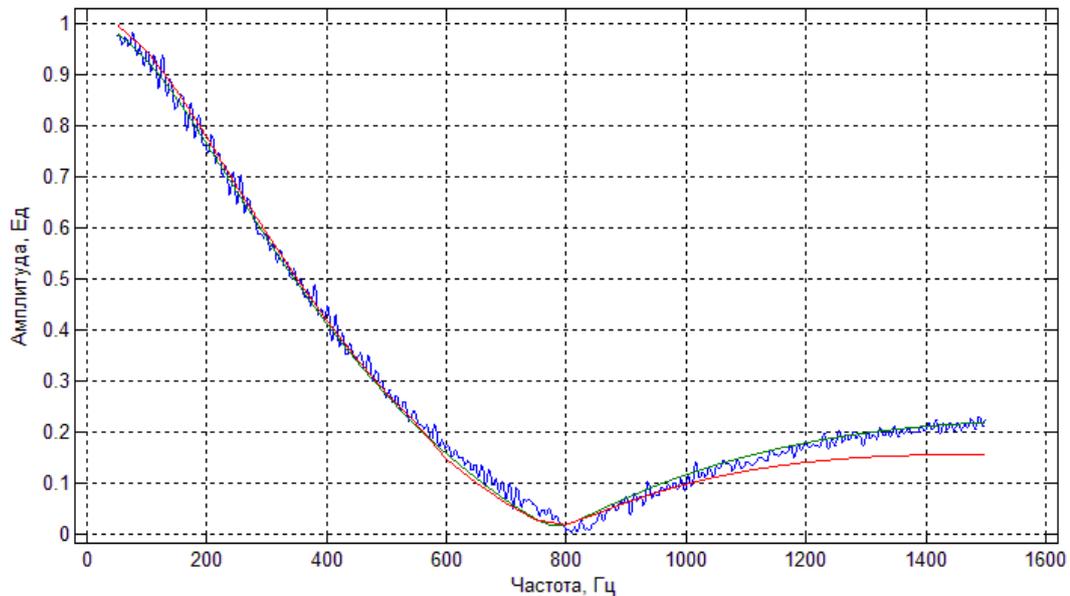


Рис. 2. – Амплитудно-частотные характеристики

Оценка погрешности метода будет основана на двух значениях: среднеквадратической ошибке (СКО) и ошибке в измерении резонансной частоты. Указанные критерии получим используя выражения:

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - A_i)^2} \quad (5)$$

$$E_p = \frac{f_{p\_эм} - f_{p\_рсч}}{f_{p\_эм}} 100 \quad (6)$$

где  $X_i$  - эталонное значение (ММ и результат измерения АЧХ с входным гармоническим сигналом),  $A_i$  - расчетное значение,  $N$  - количество отсчетов,  $f_{p\_эм}$ ,  $f_{p\_рсч}$  - эталонная и расчетная резонансные частоты.

Невязка результатов расчета с ММ и АЧХ полученной с помощью гармонического сигнала, по СКО составила  $E_{MM} = 0,0148$  ед.,  $E_{гарм} = 0.0272$  ед., а по значению резонансной частоты составила  $E_{p\_MM} = 2\%$  и  $E_{p\_гарм} = 1,1\%$ .

### Аппаратное исполнение измерителя АЧХ

Измеритель АЧХ может быть реализован согласно структурной схеме приведенной на «рис.3».

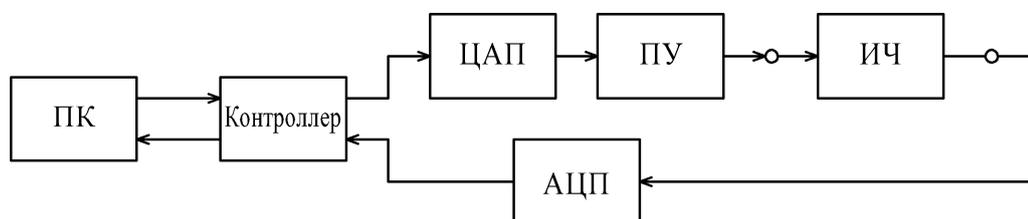


Рис. 3. – Структурная схема измерителя АЧХ

Персональный компьютер (ПК) со специализированным программным обеспечением в составе измерителя обеспечивает задание характеристик испытания, расчета АЧХ и представления результатов. Для сопряжения ПК и плат аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей необходим контроллер. Кроме того следует предусмотреть преобразующее устройство (ПУ) при необходимости согласования ЦАП и исследуемого четырехполюсника (ИЧ).

### Заключение

Помимо уже заявленного преимущества, связанного с типом используемого тестового сигнала, в случае отсутствия высоких требований у исследуемой системы к погрешностям измерения, предложенная методика и ее аппаратная реализация позволит "просканировать" большой частотный диапазон за меньшее время, чем при снятии АЧХ по точкам. Кроме того, время расчета можно сократить за счет применения более эффективных методик получения Фурье-образа [9-11]. Функционал аппаратно-программного комплекса может быть расширен расчетом дополнительных частотных характеристик, решением задач идентификации, что позволит рассматривать его, как аппаратуру для комплексного исследования систем.

## Литература

1. Дьяконов В.П. Построитель АЧХ - осциллограф или анализатор спектра? // Компоненты и технологии. 2010. №12. С. 159-168.
  2. Патент РФ № 2121757, МПК<sup>6</sup> H04B 3/46. Устройство для измерения амплитудно-частотной характеристики трактов N-канального супергетеродинного радиоприемного комплекса / Косарев В.М., Задорожный В.В. - Оpubл. 10.11.1998. Бюл. №31.
  3. Карев А.Н. Способы построения измерителей АЧХ // Инновационная наука. 2016. №12-2. С. 58-60.
  4. Патент РФ №2054684, МПК<sup>6</sup> G01R 23/16. Способ измерения амплитудно-частотных характеристик / Слюсар В.И. - Оpubл. 20.02.1996. Бюл. №5.
  5. Матвеев В.В., Кисловский Е.Ю., Мильченко Д.Н., Распопов В.Я., Телухин С.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. №7. С. 437-442.
  6. Mitsis G.D., The Volterra-Wiener approach in neuronal modeling // 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. Boston, Massachusetts USA, 2011. pp 5912–5915.
  7. Кисловский Е.Ю., Мильченко Д.Н., Матвеев В.В., Лихошерст В.В., Погорелов М.Г. Идентификация параметров системы сопровождения на базе индикаторного гиросtabilизатора с МЭМС-гироскопом в контуре стабилизации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №8. С. 165-172.
  8. Таран В.Н., Кисловский Е.Ю. Применение корреляционного метода в идентификации электромеханической системы стабилизации видеокамеры // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5043](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5043)
-

9. Richardson L.F., Eddy W.F. Algorithm 991: the sliding 2D window discrete Fourier transform // ACM Transactions on Mathematical Software. vol.45. 2019. URL: doi.org/10.1145/3264426.

10. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

11. Береснев А.Л., Будко А.Ю. Повышение эффективности теплоэнергетических установок методом контроля сгорания топлива по сигналу ионного тока // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973.

### References

1. Dyakonov V.P. Komponenty i tehnologii. 2010. №12. pp. 159-168.
2. Patent RU No 2121757, МПК<sup>6</sup> H04B 3/46. Ustrojstvo dlja izmerenija amplitudno-chastotnoj harakteristiki traktov N-kanal'nogo supergeterodinnogo radiopriemnogo kompleksa [Device for measuring the amplitude-frequency characteristic of the paths of the N-channel superheterodyne radio receiving complex] Kosarev V.M., Zadorozhnyj V.V. Public. 10.11.1998. Biyl. No31.
3. Karev A.N. Innovacionnaja nauka. 2016. №12-2. pp. 58-60.
4. Patent RU No 2054684, МПК<sup>6</sup> G01R 23/16. Sposob izmerenija amplitudno-chastotnyh harakteristik [The method of measuring the amplitude-frequency characteristics] Sljusar V.I. Public. 20.02.1996. Biyl. № 5.
5. Matveev V.V., Kislovskiy E.Yu., Mil'chenko D.N., Raspopov V.Ja., Teluhin S.V., Pogorelov M.G., Lihosherst V.V. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2019. №7. pp. 437-442.
6. Mitsis G.D., 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. Boston, Massachusetts USA, 2011. Pp. 5912-5915.
7. Kislovskiy E.Yu., Mil'chenko D.N., Matveev V.V., Lihosherst V.V., Pogorelov M.G. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki. 2019. №8. pp. 165-172.



8. Taran V.N., Kislovskiy E.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5043](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5043).

9. Richardson L.F., Eddy W.F. ACM Transactions on Mathematical Software. vol.45. 2019.URL: [doi.org/10.1145/3264426](https://doi.org/10.1145/3264426).

10. Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov [Digital signal processing]. Spb.: Piter, 2002. 608 p.

11. Beresnev A.L., Budko A.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1973).