

УДК 681.51.01

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ФИЛЬТРА МИНИМАЛЬНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

Васильева Ю.З., Елгина Г.А.

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
Томск, e-mail: yzv1@tpu.ru

Показаны результаты по разработке полосового фильтра минимального порядка с характеристиками, удовлетворяющими требованиям диагностической системы турбогенератора. Определены параметры выходного сигнала и уровень полезного сигнала с измерительного датчика прибора. Обоснована зависимость между величиной полезного сигнала на выходе датчика и порядком разрабатываемого полосового фильтра. Разработан метод синтеза фильтра минимального порядка, обеспечивающего наилучшее соотношение сигнал/шум. Обоснована зависимость уровня и частоты полезного сигнала и помех диагностической системы синхронного генератора. Приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разработанного полосового фильтра, которая показывает, что уровень подавления шума на требуемой частоте составил не менее 60 дБ, что полностью удовлетворяет предъявленным к полосовому фильтру требованиям. Экспериментально доказана корректная работа полосового фильтра минимального порядка, обеспечивающего качественное выделение полезного сигнала в составе диагностической системы.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, диагностический сигнал, спектральный состав, оптимальная фильтрация

## METHOD OF MINIMUM ORDER FILTER DESIGNING FOR TURBOGENERATOR DIAGNOSTIC SYSTEM

Vasilyeva Y.Z., Elgina G.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: yzv1@tpu.ru

The article introduces the development results of a minimum order bandpass filter with specifications satisfying the requirements of the turbogenerator diagnostic system. The parameters of the output signal and the desired signal level from the sensor device is determined. The relation between a value of the useful signal at the sensor output and developing the bandpass filter order is substantiated. The synthesis method of minimum order filter with the best signal/noise ratio is developed. The author has substantiated level dependence of the useful signal frequency and diagnostic system interference of the synchronous generator. A logarithmic amplitude-frequency characteristic of the bandpass filter fully satisfies the bandpass filter requirements. Experiments proved the correct operation of a minimum order bandpass filter ensuring the useful signal quality selection as part of the diagnostic system.

**Keywords:** synchronous generator, diagnostic signal, spectral composition, an optimum filtering

В рамках разработки функциональной системы диагностики витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора (СГ) требуется выделить полезный сигнал с датчика магнитного поля рассеяния, пропорциональный величине повреждения [2–5]. Способ, лежащий в основе разрабатываемой системы диагностики, основан на выделении из синусоидального сигнала ЭДС на выходе датчика информационного сигнала путем преобразования ЭДС в однополярный сигнал, из которого отфильтровывается субгармоническая равная частоте вращения ротора СГ ( $f_1 = f_s/p$ , где  $f_s$  – частота сети;  $p$  – количество пар полюсов СГ). Сложность задачи заключается в малой величине полезного сигнала – 1,5...3% от основной гармоники – и наличии большого количества шумов – высших гармонических, импульсных шумов и т.д.

**Целью статьи** является изложение методики синтеза цифрового фильтра минимального порядка, необходимого для выделения полезного сигнала системы

функциональной диагностики виткового замыкания в обмотке ротора СГ.

### Постановка задачи

Требуется синтезировать оптимальный полосовой фильтр, способный надёжно выделить информационную субгармоническую с частотой  $f_1 = f_s/p$ .

### Синтез фильтра

Для устройства диагностики требуется низкочастотный полосовой фильтр (ПФ), который эффективно подавляет постоянную составляющую и гармонические удвоенной  $f_1$  и выше частоты, а  $f_1$  пропускает и усиливает. При этом в соответствии с требованиями необходимо получить наименьший порядок ПФ при заданном уровне подавления.

ПФ выполнен в виде последовательно соединённых фильтра высоких частот (ФВЧ), задача которого состоит в подавлении постоянной составляющей сигнала, и фильтра низких частот (ФНЧ), подавляющего гармонические удвоенной  $f_1$  и выше частоты.

Исходя из специфики работы ПФ, в данном случае каких-либо особых требований к порядку ФВЧ не предъявляется.

Оптимизация ПФ производилась путем сравнения порядка ФНЧ фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического при заданном уровне подавления.

На первом этапе определяется соотношение амплитуд –  $A$  полезного к общему уровню сигнала, что позволяет вычислить необходимый уровень подавления  $R_s$ :

$$R_s = 20 \log \frac{A(2)f_s}{A(f_1)}. \quad (1)$$

Из [2, 5] ясно, что минимально необходимый уровень выделяемого сигнала  $\Delta e = 1,5\%$  от общего уровня. На рис. 1 приведена зависимость необходимого уровня подавления от уровня полезного сигнала. Для минимально возможного  $\Delta e = 1,5\%$  необходим уровень подавления  $R_s = 60$  дБ.

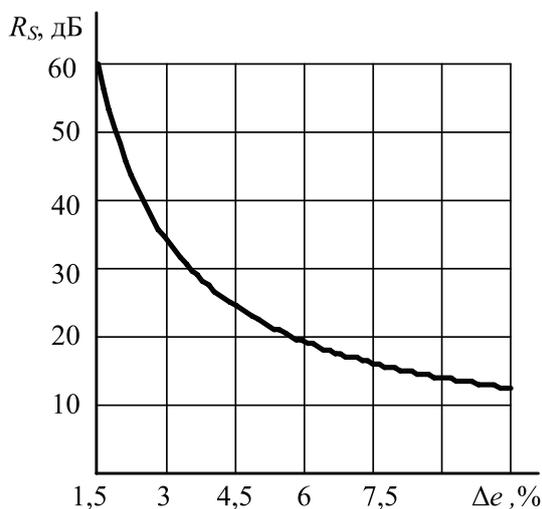


Рис. 1. Величина подавления от уровня полезного сигнала

Взяв за основу фильтры Баттерворта, Чебышева и эллиптический фильтр, по формулам (2), (3) и (4) определили порядок фильтров с уровнем подавления  $R_s = 60$  дБ. На рис. 2 приведена зависимость необходимого порядка фильтров от уровня полезного сигнала  $\Delta e$  при заданном уровне подавления [1, 6].

Порядок ФНЧ по аппроксимации Баттерворта:

$$N_b = \frac{\log \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right)}{\log \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} \right)}. \quad (2)$$

Порядок ФНЧ по аппроксимации Чебышева:

$$N_{ch} = \frac{\operatorname{arch} \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right)}{\operatorname{arch} \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} \right)}. \quad (3)$$

Порядок ФНЧ по аппроксимации Кауэра:

$$N_k = \frac{K' \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K \left( \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}{K \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K' \left( \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}, \quad (4)$$

где  $N_b$ ,  $N_{ch}$ ,  $N_k$  – порядок фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического фильтра;  $R_p$  – уровень искажения сигнала в полосе пропускания;  $R_s$  – уровень подавления шума;  $\omega_0$  – частота пропускания;  $\omega_1$  – частота подавления;  $\operatorname{arch}$  – гиперболический арккосинус;  $K$  – полный эллиптический интеграл;  $K'$  – комплементарный эллиптический интеграл.

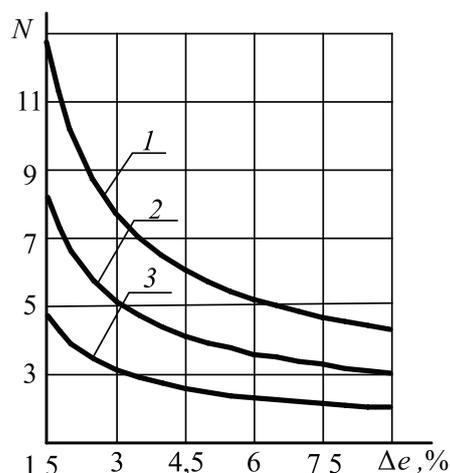


Рис. 2. Зависимость порядка фильтров от уровня полезного сигнала  $\Delta e$  при заданном уровне подавления: 1 – по Баттерворту; 2 – по Чебышеву; 3 – по Кауэру

Исходя из требования наименьшего порядка для минимально возможного  $\Delta e$ , в качестве оптимального определен эллиптический фильтр.

Для системы диагностики СГ, при заданной величине полезного сигнала на выходе датчика  $\Delta e = 1,5\%$  был разработан эллиптический ПФ, при этом его порядок составил  $N_k = 5$ , уровень подавления  $R_s = 60$  дБ, уровень искажения сигнала в полосе пропускания  $R_p = 0,5$  дБ.

В частном случае в качестве примера строился ПФ, состоящий из ФВЧ и ФНЧ звена для  $f_1 = 50$  Гц. На рис. 3 приведена ЛАЧХ разработанного фильтра. Как видно

из рис. 3, уровень подавления шума на частоте  $2f_s = 100$  Гц составил не менее 60 дБ, что полностью удовлетворило требованиям, предъявляемым к ПФ.

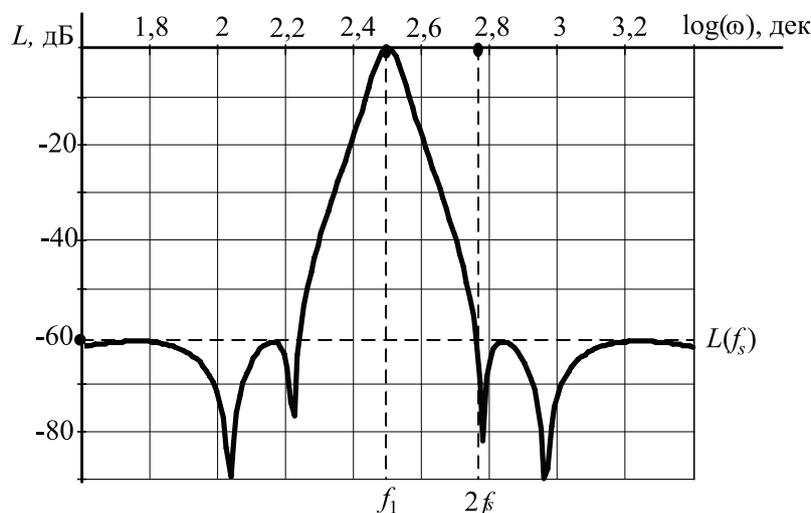


Рис. 3. ЛАЧХ ПФ

Экспериментальная проверка ПФ проводилась на базе системы диагностики от виткового замыкания обмотки ротора лабораторного синхронного генератора ГАБ-4-Т/230. В качестве источника информации использовался индукционный датчик магнитного поля рассеяния. Сигнал с датчика преобразовывался в однополярный (выпрямлялся) и проходил через разработанный ПФ. В ходе эксперимента проводилось

физическое замыкание 2% витков обмотки ротора. На рис. 4 приведены результаты этого эксперимента. На участке I выпрямленный синусоидальный сигнал симметричен, а на участке II симметрия нарушена вследствие виткового замыкания 2% витков обмотки ротора. При замыкании обмотки на выходе ПФ ( $V_{\text{вых}}$ ) наблюдался усиленный в 60 раз полезный сигнал  $V_{\text{вых}}$ . ПФ качественно выделил полезный.

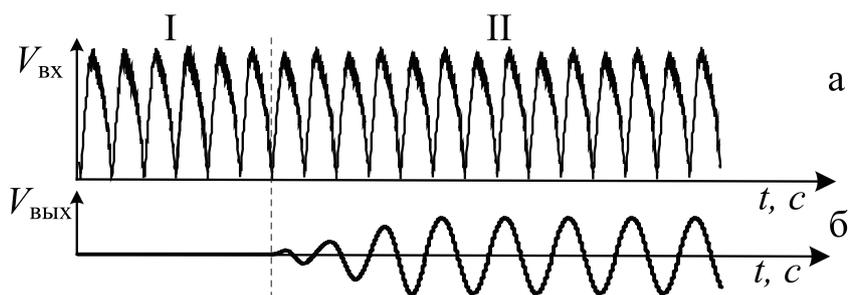


Рис. 4. Фильтрация экспериментального сигнала: I – симметричный сигнал, II – сигнал с несимметрией  $\Delta\epsilon = 2\%$

**Выводы**

1. В процессе синтеза полосового фильтра получены зависимости, позволяющие строить цифровой фильтр минимального порядка, удовлетворяющий

требованиям по уровню подавления неинформативных гармоник.

2. В ходе экспериментальной проверки доказана эффективность работы разработанного фильтра минимального.

### Список литературы

1. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1992. – 192 с.
2. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 4. – С. 57–61.
3. Полищук В.И., Новожилов А.Н. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1 заявл. 29.09.2008; опуб. 15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.
4. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Воликова М.П. Устройство защиты обмотки ротора синхронного генератора от двойных на землю и витковых замыканий // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 54–59.
5. Полищук В.И., Новожилов А.Н., Горюнов В.Н. Способ защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях // Электричество. – 2010. – № 8. – С. 64–67.
6. Роуз. Дж.Д. Теория электрических фильтров. – М.: Сов. радио, 1980. – 240 с.

### References

1. Gutnikov V.S. Filtraciya izmeritelnyh signalov [Filtration of measuring signals]. L.: Energoatomizdat, 1992. 192p.
2. Polishchuk V.I. Postroenie zashchity ot vitkovogo замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния [Construction of protection interturn fault in the winding of synchronous generator rotor based on inductive sensor magnetic

stray field]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 57–61.

3. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N. Ustrojstvo zashchity синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора [Protection device of synchronous electric machine against turn-to-turn and double earth fault in the rotor winding] // Patent no. 22450 (KZ). Official bulletin. Prom . Property. 2010, no. 4.

4. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N., Volikova M.P. Ustrojstvo zashchity обмотки ротора синхронного генератора от двойных на землю и витковых замыканий [Protection device of synchronous generator winding rotor of the double earth fault and interturn. Elektrichestvo]. 2012 no. 6. pp. 54–59.

5. Polishchuk V.I., Novozhilov A.N., Gorjunov V.N. Spособ zashchity обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях [Method of protecting rotor winding synchronous generator circuits on of interturn two inductive transmitters]. Elektrichestvo. 2010 no. 8. pp. 64–67.

6. Rhodes J.D. Teoriya elektricheskikh filtrov [Theory of Electrical Filters]. M.: Sov. radio, 1980. 240 p.

### Рецензенты:

Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор кафедры ЭПП ЭНИН, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 18.11.2014.