

УДК 681.51.01

## СИНТЕЗ ФИЛЬТРА МИНИМАЛЬНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

С.А. Утанан, В.И. Полищук

Томский политехнический университет

E-mail: polischukvi@tpu.ru

Математически обоснована взаимосвязь между амплитудой и спектральным составом полезного сигнала и уровнем помех в диагностической системе синхронного генератора. Разработан метод синтеза фильтра минимального порядка, обеспечивающего наилучшее соотношение сигнал/шум.

### Ключевые слова:

Синхронный генератор, диагностический сигнал, спектральный состав, оптимальная фильтрация.

### Key words:

Synchronous generator, diagnostic signal, spectral composition, optimum filtering.

### Введение

Системы функциональной диагностики электрооборудования электроэнергетических систем решают задачи распознавания повреждений на ранней стадии их развития с целью предупреждения персонала о своевременной разгрузке электрооборудования, выводе его в ремонт. В ряде способов определения виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора (СГ) требуется выделить полезный сигнал с датчика магнитного поля рассеяния, пропорциональный степени нарушения симметрии магнитного поля рассеяния, от полюсов машины [1, 2]. При этом фильтрация полезного сигнала осложняется его малой величиной (1,5...3 % от основной гармоники), наличием большого количества шумов (высшими гармоническими, импульсными шумами и т. д.). Целью статьи является изложение результатов разработки методики синтеза фильтра минимального порядка для выделения полезного сигнала устройства функциональной диагностики виткового замыкания в обмотке ротора СГ.

### Постановка задачи

Требуется разработать оптимальный фильтр, способный надёжно выделить полезный сигнал устойчивой несимметрии полуволн ЭДС промышленной частоты на выходе датчика магнитного поля рассеяния. Оптимальным принимается тип фильтра, который при равной степени выделения полезного сигнала имеет меньший порядок. Несимметрия полуволн проявляется в снижении амплитуды одной из  $2p$  полуволн, где  $p$  – число пар полюсов СГ. На рис. 1 представлен идеальный сигнал с датчика магнитного поля рассеяния при наличии повреждения для СГ с  $p=1$ . При этом уровень  $\Delta e$  составляет 1,5 % и выше по отношению к основному сигналу.

### Способ выделения полезного сигнала

Для выделения полезного сигнала, пропорционального  $\Delta e$ , ЭДС на выходе датчика преобразовывалась в однополярный сигнал. Разложение в ряд

Фурье (рис. 2, а) показывает, что в таком сигнале выявляются: составляющая  $f_1$  – субгармоническая равная частоте вращения ротора СГ ( $f_1=f_s/p$ , где  $f_s$  – частота сети), постоянная составляющая  $f_3$ , гармоническая составляющая удвоенной промышленной частоты  $2f_s$  и частоты, кратные ей [3].

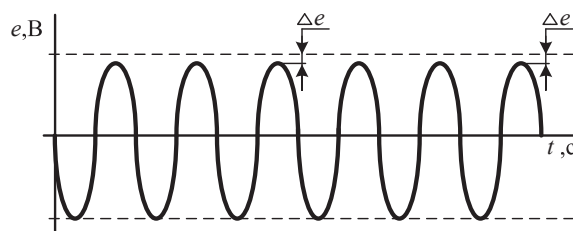


Рис. 1. Вид сигнала с датчика при наличии повреждения в СГ

На рис. 2, б, приведены зависимости уровня амплитуд гармоник от степени несимметрии входного сигнала. Как видно из рис. 2, б, с увеличением несимметрии  $\Delta e$  пропорционально увеличивается амплитуда гармоники  $f_1$ , остальные компоненты однополярного сигнала убывают. Следовательно, полезным информативным сигналом о наличии и величине несимметрии ЭДС на выходе датчика может служить амплитуда гармоники  $f_1$ .

### Полученные результаты

Очевидно, что для устройства необходим полосовой фильтр (ПФ), который подавляет постоянную составляющую и гармоническую составляющую удвоенной промышленной частоты, а  $f_1$  пропускает и усиливает. В процессе синтеза ПФ в соответствии с поставленной задачей необходимо получить наименьший порядок ПФ при заданном уровне подавления  $R_s$ . Методика синтеза ПФ приводится на примере трех наиболее распространённых типов фильтров: Баттерворта, Чебышева и эллиптического.

Первоначально необходимо определить соотношение амплитуд полезного сигнала к шуму, компонентами которого являются высокочастотные гармонические и постоянная составляющая. ПФ подавит постоянную и гармоническую составляющую

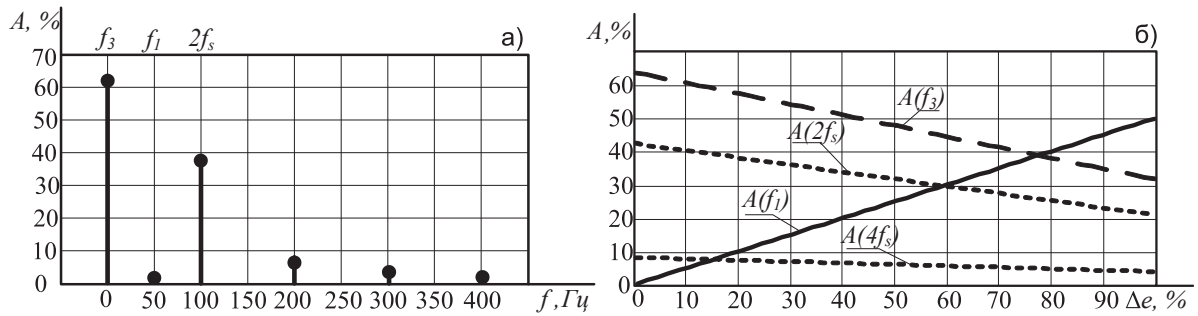


Рис. 2. Спектр частот однополярного сигнала с наличием 1,5 % несимметрии полувольт для СГ с  $p=1$

шую удвоенной промышленной частоты, а полезную выделить и усилит.

ПФ выполнен в виде последовательно соединённых фильтра высоких частот (ФВЧ), для подавления постоянной составляющей сигнала, и фильтра низких частот (ФНЧ), подавляющего гармонические  $2f_s$  и выше.

Поскольку при синтезе ПФ не предъявляются особые требования к динамике процессов в системе, то в данном случае особых требований к порядку ФВЧ не предъявляется.

Анализ полученного спектра частот рис. 2, а, показывает, что величина  $A(2f_s)$  значительно больше других высокочастотных составляющих, следовательно, при качественном подавлении  $2f_s$  более высокочастотные гармоники гарантированно будут подавлены.

Для определения уровня подавления  $R_s$  гармоники  $A(2f_s)$  необходимо знать соотношение полезный сигнал/шум  $A(f_i)/A(2f_s)$ , при этом  $R_s$  будет равен:

$$R_s = 20 \log \frac{A(2f_s)}{A(f_i)}$$

На рис. 3 приведена зависимость необходимого уровня подавления от степени несимметрии. Как видно из рис. 3, для минимально возможной несимметрии полувольт  $\Delta e=1,5\%$  необходимый уровень подавления  $R_s$  должен составить не менее 60 дБ.

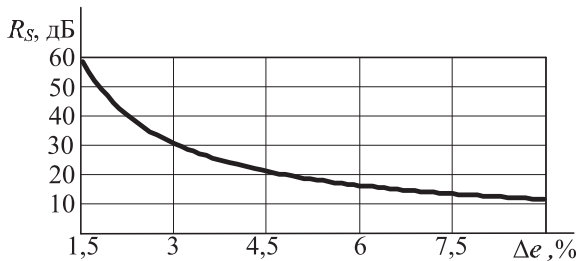


Рис. 3. Величина подавления от степени несимметрии

Для построения ФНЧ с уровнем подавления  $R_s=60$  дБ по формулам (1), (2) и (3) были определены порядки фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического фильтра, а на рис. 4 показана зависимость необходимого порядка фильтров от степени несимметрии при заданном уровне подавления [4].

Порядок ФНЧ по аппроксимации Баттерворта:

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

порядок ФНЧ по аппроксимации Чебышева:

$$N_{ch} = \frac{\operatorname{arch} \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right)}{\operatorname{arch} \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} \right)}; \quad (2)$$

порядок ФНЧ по аппроксимации Кауэра:

$$N_k = \frac{K' \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K \left( \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}{K \left( \frac{\sqrt{10^{0,1R_p}} - 1}{\sqrt{10^{0,1R_s}} - 1} \right) K' \left( \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)}; \quad (3)$$

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 сигнала в полосе подавления;  $\omega_0$  – частота пропускания;  $\omega_1$  – частота подавления;  $\operatorname{arch}$  – гиперболический арккосинус;  $K$  – полный эллиптический интеграл;  $K'$  – комплементарный эллиптический интеграл.

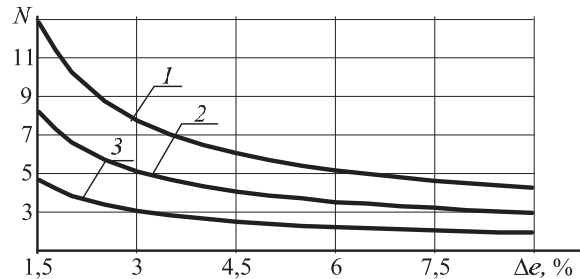


Рис. 4. Зависимость порядка фильтров от степени несимметрии при заданном уровне подавления (1 – по Баттерворту, 2 – по Чебышеву, 3 – по Кауэру)

Как видно из рис. 4, наименьшим порядком для минимально возможной несимметрии  $\Delta e$  обладает эллиптический фильтр.

Учитывая вышеизложенное, для системы диагностики синхронного генератора при заданной степени несимметрии ЭДС на выходе датчика  $\Delta e=1,5\%$  был разработан эллиптический ПФ минимального порядка. Порядок ПФ при этом составил  $N_k=5$ , уровень подавления  $R_s=60$  дБ, уровень искажения сигнала в полосе пропускания  $R_p=0,5$  дБ. Фильтр состоит из ФВЧ и ФНЧ звена, которые можно представить в виде передаточной функции:

$$H(s) = \frac{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0 s^0}{b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s^1 + b_0 s^0},$$

где  $H(s)$  – передаточная функция;  $s$  – комплексная переменная;  $a_i, b_i$  – коэффициенты полинома передаточной функции. Значения этих коэффициентов для вышеуказанного примера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты ПФ

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
ФНЧ	$7,994 \cdot 10^{11}$	0	$3,168 \cdot 10^6$	0	2,62	0
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	$7,988 \cdot 10^{11}$	$9,204 \cdot 10^9$	$4,652 \cdot 10^7$	$2,08 \cdot 10^5$	376,5	1
ФВЧ	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	0	$3,101 \cdot 10^5$	0	$3,852 \cdot 10^4$	0	1
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
	$1,168 \cdot 10^{13}$	$4,457 \cdot 10^{10}$	$2,497 \cdot 10^8$	$5,66 \cdot 10^4$	$1,136 \cdot 10^3$	1

На рис. 5 для данного примера приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) разработанного ПФ, с выделяемой частотой  $f_i=50$  Гц, которая показывает, что уровень подавления шума на частоте  $2f_s=100$  Гц составил не менее 60 дБ, и это полностью удовлетворяет предъявленным к ПФ требованиям.

Проверка работы ПФ проводилась на основе экспериментальных данных, полученных с установки на базе синхронного генератора ГАБ-4-Т/230. В режиме холостого хода на вход ПФ подавался сигнал с датчика магнитного поля рассеяния, преобразованный в однополярный сигнал  $V_{вх}$  (рис. 6, а).

На участке I синусоидальный сигнал симметричен, а на участке II было произведено витковое замыкание 2 % витков обмотки ротора, что привело к появлению несимметрии сигнала. На выходе ПФ наблюдался усиленный в 60 раз полезный сигнал  $V_{вых}$ . Как видно из рис. 6, б, ПФ качественно выделил полезный сигнал, пропорциональный величине несимметрии полувольт.

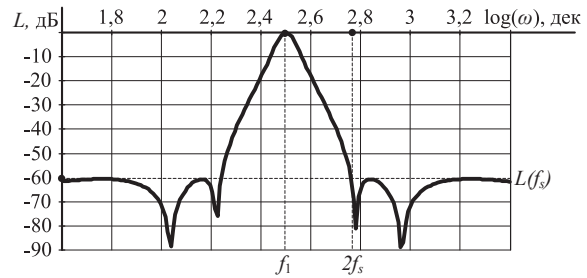


Рис. 5. ЛАЧХ ПФ

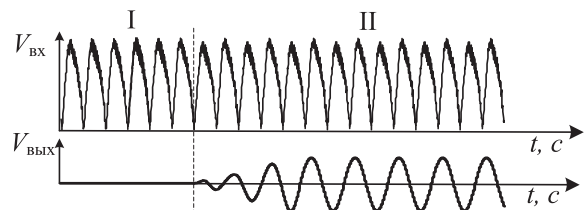


Рис. 6. Фильтрация экспериментального сигнала (I – симметричный сигнал, II – сигнал с несимметрией  $\Delta e=2\%$ )

**Выводы**

1. Обоснована зависимость между величиной несимметрии и параметрами полосового фильтра.
2. Получены зависимости, позволяющие разработать полосовой фильтр минимального порядка, удовлетворяющий требованиям разрабатываемой системы диагностики.
3. Экспериментально доказано, что разработанный фильтр обеспечивает качественное выделение полезного сигнала.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
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. – Т. 321. – № 4. – С. 57–61.

3. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1992. – 192 с.
4. Роуз Дж.Д. Теория электрических фильтров. – М.: Сов. радио, 1980. – 240 с.

Поступила 24.10.2012 г.