

УДК 681.51.01

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Полищук В.И., Можяев В.Д., Гнетова Д.А., Крицкий М.В.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: polischuk_vi@mail.ru

В связи с все возрастающими требованиями к эффективности эксплуатации и надежности работы электрогенерирующего оборудования все большее значение приобретают меры по предупреждению и раннему обнаружению дефектов средствами технической диагностики. В то же время современные средства цифровой обработки информации дают возможность проектировать новые чувствительные устройства технической диагностики крупных синхронных генераторов, способные достоверно выявлять сложные дефекты на ранней стадии их развития, что оправдывает любые затраты на их разработку. В данной работе представлен материал по разработке фильтра, способного выделить полезную гармоническую составляющую с частотой f_v из однополярного сигнала ЭДС, которая составляет 1,5–3% от основного сигнала и подавить основную паразитную гармонику с частотой $2f_v$. Синтез фильтра с такими параметрами необходим при построении систем диагностики синхронных электрических машин, в которых полезной информацией о возникновении виткового замыкания в обмотке ротора является определенная гармоническая составляющая, выделяемая из однополярного сигнала ЭДС на выходе магнитометрического датчика, устанавливаемого в торцевой зоне машины и производящего измерения уровня несимметрии магнитного поля рассеяния. Цель работы: определить оптимальный цифровой фильтр, способный качественно выделить полезный сигнал и разработать методику настройки параметров проектируемого фильтра. Методы исследования: в процессе синтеза фильтра использовались методы цифровой обработки дискретного экспериментально снятого сигнала. Результаты. В результате сопоставительного анализа амплитудно-частотных характеристик фильтров Баттерворта, Чебышева I рода, Чебышева II рода и Кауэра, лучшим по качеству выделения требуемой гармонической при наименьшем порядке фильтра, определен фильтр Кауэра. Разработана методика и алгоритм настройки фильтра Кауэра, в котором за счет использования локальных неоднородностей амплитудно-частотной характеристики было обеспечено качественное выделение полезной гармонической.

Ключевые слова: синхронный генератор, диагностическая система, цифровой фильтр, синтез, гармоническая составляющая, полезный сигнал, полоса пропускания, эллиптический фильтр

ENHANCEMENT OF THE DIGITAL RECURSIVE FILTER SETUP FOR THE SYNCHRONOUS MACHINES DIAGNOSTIC SYSTEMS

Polischuk V.I., Mozhaev V.D., Gnetova D.A., Kritsky M.V.

The Samara State Technical University, Samara, e-mail: polischuk_vi@mail.ru

Because of the increasing requirements to efficiency of operation and reliability of the electrogenerating equipment work the increasing value is purchased by measures for the prevention and early damage detection by means of technical diagnostics. At the same time the modern means of digital information processing give the opportunity to make new sensitive devices of large synchronous generators technical diagnostics, capable to reveal difficult defects in the early stage of their appearance that justifies any costs for their development. The relevance of this paper is conditioned by the need of the filter synthesis which is capable to select the useful harmonic component with frequency f_v from EMF unipolar signal which is 1,5–3% of the main signal and to suppress the main parasitic harmonic with frequency $2f_v$. The filter synthesis with such parameters is necessary to make the synchronous machine diagnostic system which is based on ways of the synchronous machine rotor winding turn-to-turn short-circuits identification where the useful information about such damage type origination is the harmonic component, EMF allocated from the unipolar signal in magnetic intrusion detector output. It is located in the butt zone of machine and measure the stray magnetic field asymmetry level. Work objective: to define the optimum digital filter which is capable to allocate a friendly signal and to make the parameter setting technique of the designed filter. Investigative techniques: digital processing methods of the discrete experimentally removed signal were used in filter synthesis process. Results. As a result of the contrastive analysis of the Butterworth, I sort Chebyshev, II sort Chebyshev and elliptic filters frequency response function the best in quality of allocation demanded harmonic at the smallest filter order is defined the Cauer filter. The technique and setup algorithm of the Cauer filter is developed where using the local nonuniformity of frequency response function was provided transmission corridor of the allocated frequency f_v and the parasitic frequency $2f_v$ has been effectively suppressed.

Keywords: synchronous generator, diagnostic system, digital filter, synthesis, harmonic component, friendly signal, passband, elliptic filter

На сегодняшний день к электрогенерирующему оборудованию предъявляются всё более высокие требования по эксплуатационной надежности, при этом большое значение приобретают меры по предупреждению и раннему обнаружению дефек-

тов средствами технической диагностики. В тоже время современные средства цифровой обработки информации дают возможность проектировать новые чувствительные устройства технической диагностики крупных синхронных генераторов [1, 2, 5–8],

способные достоверно выявлять сложные дефекты на ранней стадии их развития, что оправдывает любые затраты на их разработку. В ряде устройств [3, 9, 10, 13] диагностики повреждений межвитковой изоляции обмотки ротора, требуется разработка специфического фильтра, которому необходимо качественно выделить гармоническую с частотой равной частоте вращения машины из однополярного сигнала на выходе магнитометрического датчика.

Целью данной работы является синтез оптимального цифрового фильтра, способного качественно выделить полезный сигнал, и разработка методики настройки параметров проектируемого фильтра.

Анализ кривой выпрямленного значения ЭДС показывает, что при витковом замыкании в обмотке явнополюсного ротора с числом пар полюсов $p = 1$ в выпрямленном сигнале, помимо постоянной и 100 Гц составляющей, появляется огибающая с частотой, равной частоте вращения машины (50 Гц) – рис. 1, б. Полезной информацией о наличии виткового замыкания является появление в выпрямленном сигнале частоты $f_v = f_1/p$, где f_1 – частота сети.

Способ построения диагностической системы [1, 2, 5–8] заключается в том, что измеренный электрический сигнал ЭДС с выхода магнитометрического датчика, установленного в торцевой зоне синхронной

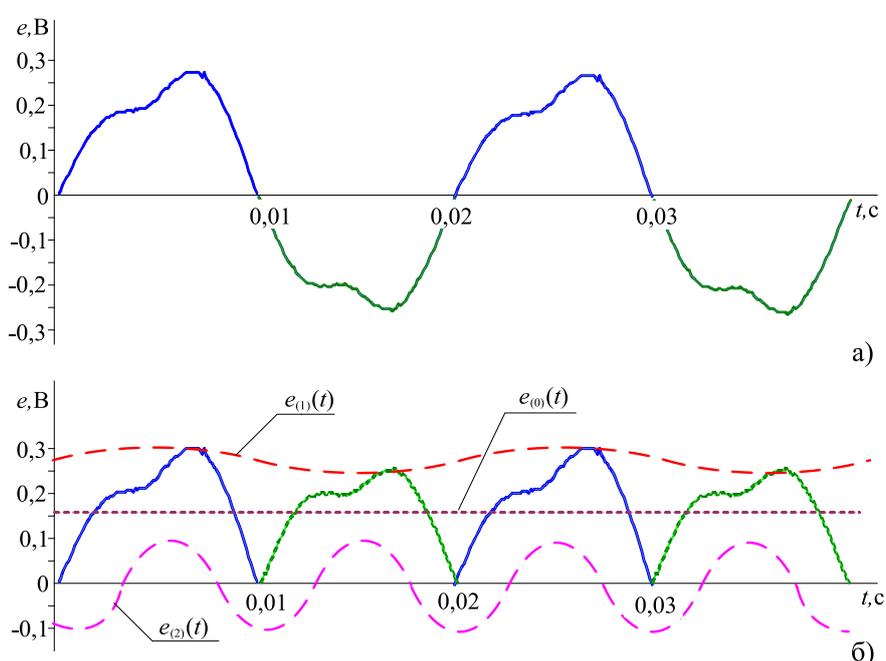


Рис. 1. Сигнал ЭДС на выходе магнитометрического датчика

Постановка задачи

Для реализации устройства диагностики синхронной электрической машины необходимо синтезировать фильтр, способный качественно выделить полезный гармонический сигнал с частотой $f_v = f_1/p$, где f_1 – частота сети, p – число пар полюсов. При этом основными паразитными компонентами сигнала выступают постоянная составляющая, гармоническая с частотой $2f_v$, а также посторонние шумы [4]. Разработать методику настройки фильтра.

Способ диагностики базируется на анализе сигнала ЭДС с выхода магнитометрического датчика, установленного в торцевой зоне синхронной электрической машины рис. 1, а.

электрической машины, преобразуют в однополярный, из которого затем выделяют гармоническую с частотой $f_v = f_1/p$. Если она превысит установленную величину, то это воспринимают как сигнал о наличии виткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины.

Очевидно, что основным элементом устройства диагностики выступает фильтр, способный с минимальными потерями выделить полезный сигнал с частотой f_v , например, для системы диагностики синхронной машины с частотой вращения 3000 об/мин это будет частота равная 50 Гц. Фильтр должен максимально подавить частоту $2f_v$, для данного типа машины это частота 100 Гц. Особенностью работы данного фильтра является сверхмалое расстояние между частотой

тами f_v и $2f_v$, составляющее всего одну октаву, поэтому в данном случае нецелесообразно использование стандартной методики его настройки. Поскольку паразитной частотой является всего одна гармоническая $2f_v$, то при синтезе фильтра ставилось не использовать комбинацию фильтров высоких и низких частот для формирования полосно-пропускающего фильтра, а использовать характерные локальные неоднородности амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) цифрового рекурсивного фильтра. Тип фильтра определялся из анализа АХЧ наиболее известных фильтров: Баттерворта, Чебышева I рода, Чебышева II рода и Кауэра.

На рис. 2 представлены АЧХ анализируемых цифровых фильтров. Использование фильтра Баттерворта (линия 2 (синяя)), является одним из худших вариантов. Он значительно подавляет полезную гармоническую составляющую $\Delta A_b(f_v)$ и слабо подавляет «паразитную» гармоническую составляющую с частотой $2f_v - \Delta A_b(2f_v)$. Фильтр Чебышева I рода (линия 1 (зеленая)), минимально подавляет сигнал с частотой $f_v \Delta A_{ч.1}(f_v)$, но при этом подавляет слабее фильтра Баттерворта паразитную гармоническую с частотой $2f_v \Delta A_{ч.1}(2f_v)$. Фильтр Чебышева II рода (линия 3 (оранжевая)) отлично подавляет гармонику с частотой $2f_v \Delta A_{ч.2}(2f_v)$, однако он имеет самый высокий уровень ослабления полезного сигнала с частотой $f_v \Delta A_{ч.2}(f_v)$. Как видно из рис. 1, АЧХ эллиптического фильтра (линия 4 (красная)) является наилучшей по критерию пропускания и подавления.

Как видно из анализа АХЧ эллиптического фильтра (рис. 3), для поставленной задачи целесообразно использовать при настройке фильтра локальные неоднородности АХЧ.

Передаточная функция эллиптического фильтра имеет два варианта записи [14, 15]. Для четного порядка фильтра

$$T(s) = \prod_{i=1}^{n/2} \frac{A_i(s^2 + a_i)}{s^2 + b_i + c_i},$$

для нечетного порядка фильтра

$$T(s) = \frac{A_0}{s + c_0} \prod_{i=1}^{(n-1)/2} \frac{A_i(s^2 + a_i)}{s^2 + b_i \cdot s + c_i},$$

где $A_i = K_i \cdot c_i / a_i$; K_i – коэффициент усиления; a_i, b_i, c_i, c_0 – табличные значения параметров эллиптического фильтра, приведенные в [10].

АЧХ эллиптического фильтра низких частот имеет пульсации, как в полосе пропускания, так и в полосе подавления (рис. 3).

При настройке параметров эллиптического фильтра по стандартной методике [14, 15] принято использование следующих обозначений:

– неравномерность передачи в полосе пропускания (PRW), дБ, равна

$$PRW = -20 \log_{10} A_1, \quad (1)$$

где A_1 – нижняя граница предельно допустимой неравномерности АЧХ в полосе пропускания.

– минимальное затухание в полосе подавления (MSL), дБ, равно

$$MSL = -20 \log_{10} A_2, \quad (2)$$

где A_2 – верхняя граница предельно допустимой неравномерности АЧХ в полосе подавления.

– ширина переходной области TW , которая в нашем случае составляет

$$TW = 2f_v - f_v \quad (3)$$

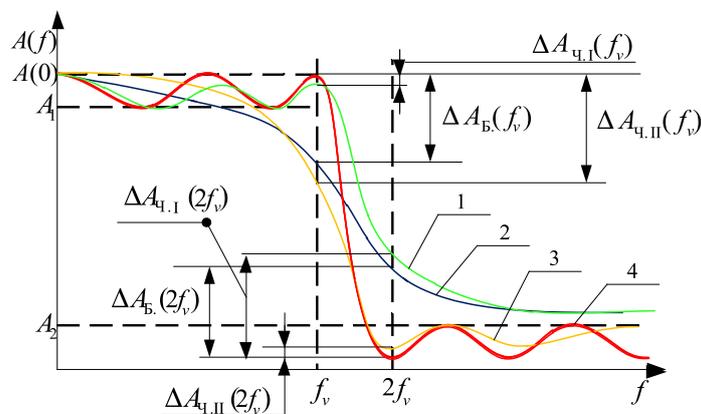


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики рекурсивных фильтров: 1 – АЧХ фильтра Чебышева I рода; 2 – АЧХ фильтра Баттерворта; 3 – АЧХ фильтра Чебышева II рода; 4 – АЧХ эллиптического фильтра

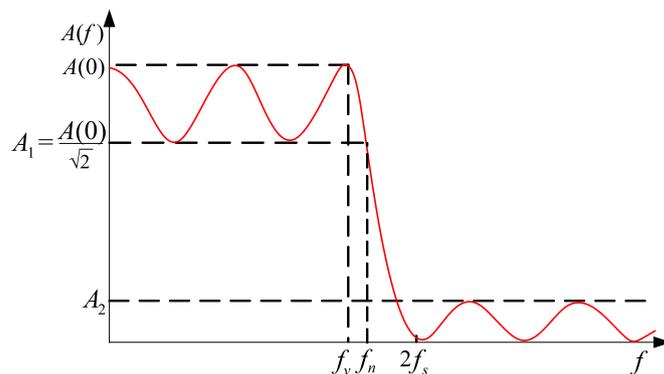


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика эллиптического фильтра низких частот

Для заданных значений PRW и MSL повышение порядка приводит к увеличению числа пульсации в полосах пропускания и подавления и уменьшению TW .

Согласно [14] передаточная функция эллиптического фильтра по форме идентична передаточной функции фильтра Чебышева [15]. Постоянные параметры a_i, b_i, c_i, c_0 , которые отличаются от параметров инверсного фильтра Чебышева, вычисляются крайне сложно, поскольку процесс вычисления требует знания эллиптических Якоби [14]. Потому следует использовать стандартные настройки эллиптического фильтра при фиксированных значениях PRW . В [14] приведены таблицы коэффициентов a_i, b_i, c_i, c_0 , соответствующие различным величинам неравномерности передачи в полосе пропускания $PRW = 0,1$ дБ; $0,5$ дБ; 1 дБ; 2 дБ; 3 дБ.

Если выбрать $PRW = 3$ дБ и нанести на ось ординат АЧХ соответствующее ей значение A_1 , то на оси частот получим величину f_n – граничную частоту полосы пропускания эллиптического ФНЧ (рис. 3).

Учитывая все вышесказанное, настройку фильтра предлагается производить таким образом, чтобы максимальный коэффициент передачи соответствовал частоте $f_v = 50$ Гц. Также для настройки фильтра воспользуемся еще одной его особенностью – в полосе подавления имеются точки минимума. Поэтому вторым критерием настройки фильтра предлагается настройка на минимальный коэффициент усиления в полосе подавления частоты $2f_v = 100$ Гц (рис. 3).

Настройка фильтра производится в следующем порядке:

1. Определить значение коэффициента a_i как отношение основной несущей частоты к частоте f_v :

$$a_i = \left(\frac{2f_v}{f_v} \right)^2.$$

2. Производим уточнение коэффициента a_i по таблице [10] и из таблицы определяем остальные коэффициенты фильтра.

3. Определяем граничную частоту полосы пропускания f_n такой, которая будет обеспечивать совпадение f_v с частотой ближайшего максимума полосы пропускания f_{max} .

4. Производим уточнение частоты, соответствующей максимальному коэффициенту усиления:

$$f_{max} = f_v \sqrt{\frac{2c_1(a_1 - c_1) - a_1 b_1^2}{2(a_1 - c_1) + b_1}}.$$

5. Строим амплитудно-частотную характеристику.

Блок-схема алгоритма расчета эллиптического фильтра представлена на рис. 4.

По вышеприведенной методике произведем расчет эллиптического фильтра при работе генератора на сеть с частотой 50 Гц:

1. Определим, каким должен быть коэффициент a_i по формуле

$$a_i = \left(\frac{2f_v}{f_v} \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 50}{50} \right)^2 = 4.$$

2. Минимальный порядок эллиптического фильтра, который имеет коэффициент a_i является третий. Принимаем эллиптический фильтр третьего порядка со следующими параметрами:

$$a_1 = 3,611302; b_1 = 0,253951; c_1 = 0,873882; c_0 = 0,0335021.$$

3. Принимаем граничную частоту полосы пропускания $f_n = 56$ Гц, которая будет обеспечивать совпадение $f_v = 50$ Гц с частотой ближайшего максимума полосы пропускания $f_{max} = f_v$.

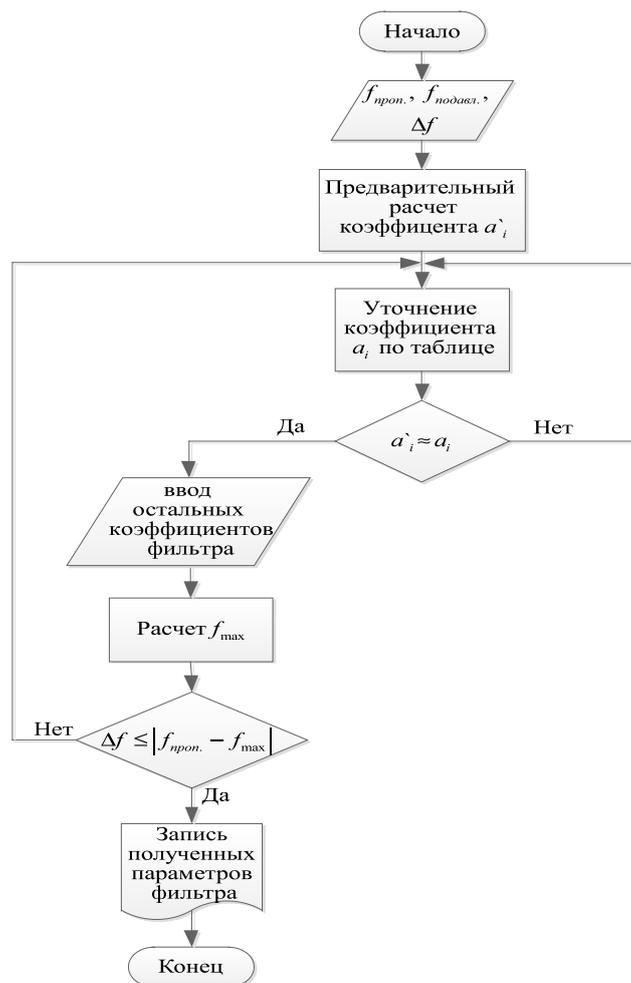


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета эллиптического фильтра

4. Произведем расчет частоты, соответствующей максимальному коэффициенту усиления:

$$f_{\max} = 50 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,873882 \cdot (3,611302 - 0,873882) - 3,611302 \cdot 0,253951^2}{2 \cdot (3,611302 - 0,873882) + 0,253951}} = 49,915.$$

Для настройки устройства был смоделирован тестовый сигнал, состоящий из пяти частей: низкий нормальный сигнал (полуволны симметричны), полуволны отличаются на 1,5%, участок роста полуволн (имитация переходного процесса), высокий сигнал с разницей амплитуд полуволн в 1,5%, высокий нормальный сигнал. Устройство диагностики достоверно срабатывало при разнице полуволн в 1,5% и выше, что говорит о качественном выделении фильтром полезной гармонической и способности устройства диагностики выявлять замыкание одного и более вит-

ка в обмотке ротора у синхронных машин средней и большой мощности.

Заключение

В результате сопоставительного анализа амплитудно-частотных характеристик наилучшим по качеству выделения требуемой гармонической определен фильтр Кауэра. Разработана методика расчета параметров эллиптического фильтра с учетом локальных неоднородностей амплитудно-частотной характеристики, позволяющая минимизировать потери полезного сигнала и максимально подавить паразитную частоту.

Список литературы

1. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
2. Гордов В.В., Лашитский А.П., Самородов Ю.Н. Новые средства для диагностирования состояния изоляции статоров мощных электрических машин // Энергетик. – 2003. – № 9.
3. Джексон П. Введение в экспертные системы: учеб. пособие / Пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2001. – 624 с.
4. Петров В.Н. Информационные системы. – СПб.: Питер, 2002. – 688 с.
5. 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.
6. 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.
7. Полищук В.И., Кислов А.П., Новожилов А.Н. Критерии выбора уставок защит обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий // Изв. высш. учеб. заведений «Электромеханика». – 2009. – № 6. – С. 74–77.
8. Полищук В.И. Построение релейной защиты и диагностики ротора синхронного генератора на индукционных преобразователях / Монография. – Павлодар: Издательство «Кереку». ПГУ им. С. Торайгырова. – 2010. – 114 с.
9. Полищук В.И., Утанан С.А. Синтез фильтра минимального порядка для системы диагностики синхронного генератора // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 110–112.
10. Степанов М.Ф. Основы проектирования экспертных систем технической диагностики: учеб. пособие. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. – 128 с.
11. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых замыканий обмотки ротора: пат. Рос. Федерация № 254613; заявл. 19.06.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
12. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий обмотки ротора: пат. Республика Казахстан № 17810 (KZ). заявл. 19.12.2004. опубл. 15.09.2006. Бюл. № 9.
13. Detlev W. Gross Partial Discharge «Measurement and Monitoring on Rotating Machines». Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002.
14. Johnson D., Johnson J., and H. Moore, A. Handbook of Active Filters / Prentice-Hall. New Jersey. 1980.
15. Thammawongsa N., Rhromlounsri R., Jamsai M., Pornsuwancharoen N. Design elliptic lowpass filter with inductively compensated parallel-coupled lines. / Procedia engineering, 2012. – Vol. 32. – P. 550–555.