

УДК 621.3.084 : 621.3.014.4 : 621.3.082.74 : 620.179.14 : 621.376.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ МОСТОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2018 Д.А. Ворох, А.И. Данилин, Е.Е. Дудкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 12.12.2018

В статье рассмотрена математическая модель синхронного (ключевого) детектора для выделения полезного сигнала, формируемого мостовыми схемами переменного тока, в частности мостовым вихретоковым преобразователем (ВТП). В тексте получены выражения связывающие выходное напряжение детектора с амплитудой и фазой входного напряжения.

Ключевые слова: математическая модель, вихретоковый, дифференциальный детектор, вихретоковый преобразователь, ключевой детектор, фазовый детектор.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2, 3] рассматриваются характеристики, свойства и особенности мостовых вихретоковых преобразователей. Ранее, в работе [4] рассматривалась схема лабораторной установки для исследования частотных свойств мостового ВТП. В этой установке, в качестве детектора выходного напряжения ВТП, использовался дифференциальный амплитудный детектор [5, 6]. Подробное описание синхронного (ключевого) детектора приводится в [7].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Схема ключевого (синхронного) детектора представлена на рисунке 1. Здесь на компонентах L1-L4 собран мостовой ВТП, причем катушки L1 и L4 индуктивно связаны между собой, и на них воздействует объект контроля (ОК) на расстоянии Δl . Катушки L2 и L3 индуктивно связаны, но не взаимодействуют с ОК, и являются опорными для мостовой схемы. Генератор G1 вырабатывает прямоугольные импульсы заданной частоты, на двух противофазных выходах. Далее сигнал с прямого выхода генератора поступает на мостовой ВТП. Под действием объекта контроля происходит разбалансировка моста, и в результате между выходными диагональными клеммами моста возникает разность напряжений. Сигнал с выхода ВТП поступает на 4 ключа, которые соединены в определённом порядке (рисунок 1) и управляются автоматически от генератора G1.

Далее сигнал поступает на два фильтра низких частот Z1 и Z2. После выделения сочетаний полуволн и их фильтрации в ФНЧ Z1 и Z2 сигнал поступает на вычитающее устройство. Так же на вычитающее устройство поступает напряжение $U_{см}$, которое необходимо для устранения явления смещения нуля, вызванного не идентичностью характеристик катушек моста и другими эффектами. С выхода вычитающего устройства сигнал поступает на компоненты R2 и C1, которые предназначены для дополнительной фильтрации выходного сигнала.

Рассмотрим работу детектора на периоде времени T, показанном на рисунке 2 и поясняющим работу ключевого детектора.

Генератор G1 вырабатывает опорные прямоугольные противофазные импульсы импульсные сигналы прямоугольной формы, которые описываются выражениями

$$U_{on1}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{on2}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ 1, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (2)$$

На выходе мостовой схемы в точках А и В сигналы имеют синусоидальную форму и описываются выражениями

$$U_1(t) = A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (3)$$

$$U_2(t) = A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (4)$$

После прохождения синусоидальных сигналов через ключи, сигналы в точках X и Y определяются выражениями

$$U_x(t) = U_{кx1}(t) + U_{кx3}(t) = \begin{cases} U_1(t), & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ U_2(t), & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (5)$$

Ворох Дмитрий Александрович, аспирант.

E-mail: fallout2s@yandex.ru

Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники.

E-mail: aidan@ssau.ru

Дудкина Елена Евгеньевна, аспирант.

E-mail: staku1988@gmail.com

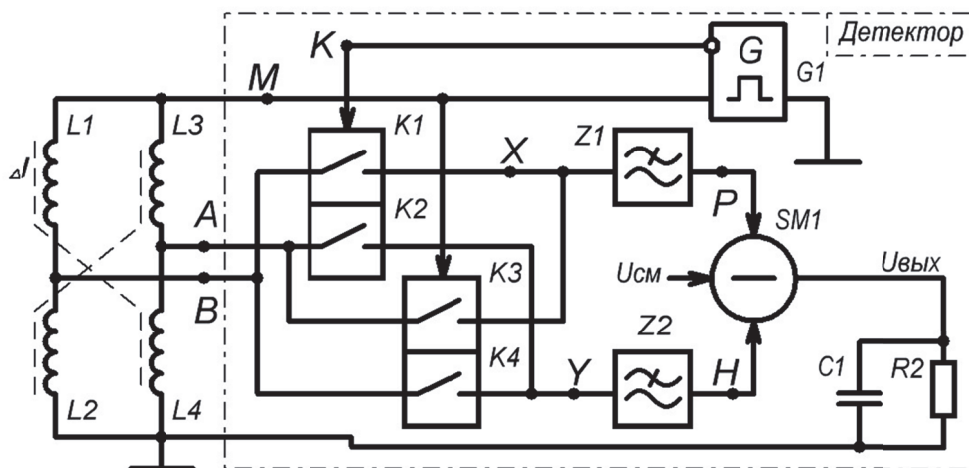


Рис. 1. Синхронный детектор для мостового ВТИ

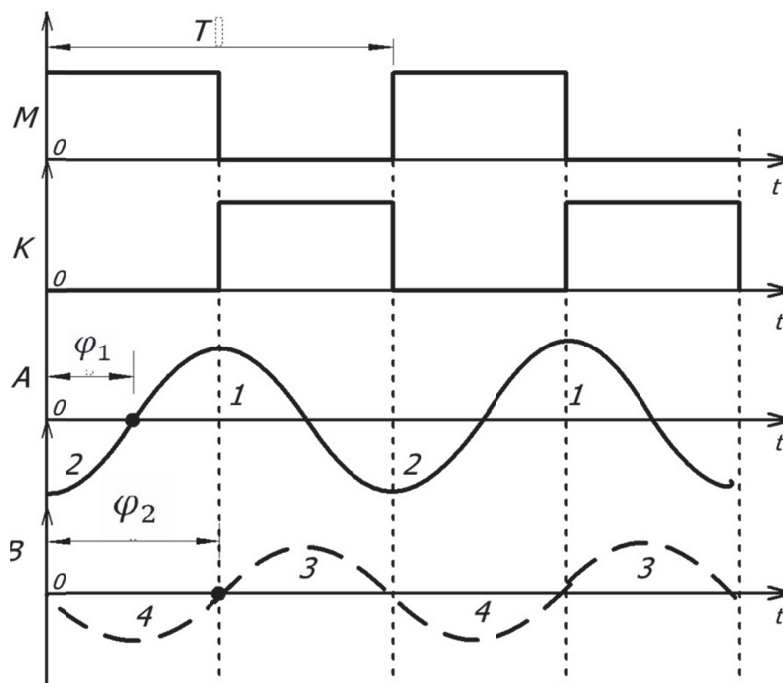


Рис. 2. Выменные диаграммы, поясняющие работу ключевого детектора

$$U_y(t) = U_{кx2}(t) + U_{кx4}(t) = \begin{cases} U_2(t), 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ U_1(t), \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (6)$$

Далее, оба сигнала проходят через фильтры нижних частот, являющихся интеграторами на периоде T. Тогда сигналы на выходе фильтров описываются выражениями

$$U_p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U_x(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_1(t) dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T U_2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) dt +$$

$$+ \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T A_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) dt = \frac{-A_1}{2\pi} \left[\cos\left(\omega \cdot \frac{T}{2} + \varphi_1\right) - \cos(\omega \cdot 0 + \varphi_1) \right] + \frac{(-A_2)}{2\pi} \left[\cos(\omega \cdot T + \varphi_2) - \cos\left(\omega \cdot \frac{T}{2} + \varphi_2\right) \right] = \frac{A_1}{2\pi} \cos(\varphi_1) + \frac{A_1}{2\pi} \cos(\varphi_1) - \frac{A_2}{2\pi} \cos(\varphi_2) - \frac{A_2}{2\pi} \cos(\varphi_2) = \frac{A_1}{\pi} \cos(\varphi_1) - \frac{A_2}{\pi} \cos(\varphi_2). \quad (7)$$

Аналогично,

$$\begin{aligned}
 U_n(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T U_y(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_2(t) + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T U_1(t) = \\
 &= \frac{A_2}{\pi} \cos(\varphi_2) - \frac{A_1}{\pi} \cos(\varphi_1). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Тогда на выходе вычитающего устройства имеем сигнал

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых}}(t) &= U_p(t) - U_n(t) - U_{\text{см}}; \\
 U_{\text{вых}}(t) &= \frac{2 \cdot A_1}{\pi} \cos(\varphi_1) - \frac{2 \cdot A_2}{\pi} \cos(\varphi_2) - U_{\text{см}} = \\
 &= \frac{2}{\pi} (A_1 \cos(\varphi_1) - A_2 \cos(\varphi_2)) - U_{\text{см}} = \\
 &= \frac{2 \cdot A_1}{\pi} \cos(\varphi_1) - \frac{2 \cdot A_2}{\pi} \cos(\varphi_2) - U_{\text{см}} = \\
 &= \frac{2}{\pi} (A_1 \cos(\varphi_1) - A_2 \cos(\varphi_2)) - U_{\text{см}}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

В частном случае, при отсутствии разности фаз между опорными сигналами и сигналами с выхода мостовой схемы $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ и отсутствии смещения нуля $U_{\text{см}} = 0$, выходное напряжение пропорционально разности амплитуд сигналов с выхода мостовой схемы с коэффициентом $2/\pi$. Тогда выражение (9) принимает вид

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{2}{\pi} (A_1 - A_2). \quad (10)$$

Аналогично получим зависимость выходного сигнала от значений сдвига фазы сигналов на выходе мостовой схемы относительно опорных сигналов с генератора с помощью полученного ранее выражения (9)

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{2}{\pi} (A_1 \cos(\varphi_1) - A_2 \cos(\varphi_2)) - U_{\text{см}}.$$

Примем $U_{\text{см}} = 0$, $\varphi_2 = 0$, а φ_1 будем варьировать от 0 до π . Тогда выражение (9) имеет вид

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{2}{\pi} (A_1 \cos(\varphi_1) - A_2). \quad (11)$$

ВЫВОДЫ

Исходя из полученных выражений 10 и 11, можно сделать вывод о работоспособности детектора. Преобразование разности входного напряжения в выходное напряжение происходит по линейному закону. Преобразование разности фаз входного напряжения и опорного генератора в выходное напряжение, происходит по нелинейному закону. Однако при углах сдвига фаз свыше 30 град. зависимость с хорошей точностью порядка 5% можно считать линейной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин А.И., Ворох Д.А. Анализ частотных характеристик мостового вихретокового преобразователя перемещения // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г.Самара, 18-20 мая 2016 г.) Самара : ООО «Офорт», 2016. С. 77-80.
2. Иванова Я.А., Руденко Е.А., Садыков А.Н., Ворох Д.А. Мостовой вихретоковый преобразователь перемещения и его конструктивная компоновка // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г.Самара, 18-20 мая 2016 г.) Самара: ООО «Офорт», 2016. С. 73-76.
3. Ворох Д.А., Иванова Я.А. Эквивалентная схема мостового вихретокового преобразователя // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г.Самара, 16-18 мая 2017 г.) Самара: ООО «Офорт», 2017. С. 58-60.
4. Данилин А.И., Ворох Д.А. Мостовой вихретоковый преобразователь и анализ его экспериментальных частотных характеристик // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(6). С. 1268-1271.
5. Данилин А.И., Ворох Д.А. Амплитудный детектор для мостового вихретокового преобразователя // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г.Самара, 16-18 мая 2017 г.) Самара : ООО «Офорт», 2017. С. 19-21.
6. Данилин А.И., Медников В.А., Чернявский А.Ж., Капустин А.С. Первичный преобразователь для реализации оптоэлектронного дискретно-фазового метода измерения деформаций лопаток турбомашин // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. Т. 5. № 2. С. 388-395.
7. Ворох Д.А., Данилин А.И., Бояркина У.В. Синхронный детектор для мостового вихретокового преобразователя // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4. С. 167-170.

**MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONOUS DETECTOR
FOR BRIDGE VORTEX-CONVERTER CONVERTER**

© 2018 D.A. Vorokh, A.I. Danilin, E.E. Dudkina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article discusses a mathematical model of a synchronous (key) detector for the selection of a useful signal generated by ac bridge circuits, in particular, an eddy current bridge transducer (VTP). The text obtained expressions connecting the output voltage of the detector with the amplitude and phase of the input voltage.

Keywords: mathematical model, eddy current detector, differential detector, eddy current transmitter, key detector, phase detector.

Dmitry Vorokh, Postgraduate Student.

E-mail: fallout2s @ yandex.ru

*Aleksandr Danilin, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Radio Engineering.*

E-mail: aidan@ssau.ru

Elena Dudkina, Postgraduate Student.

E-mail: staku1988@gmail.com