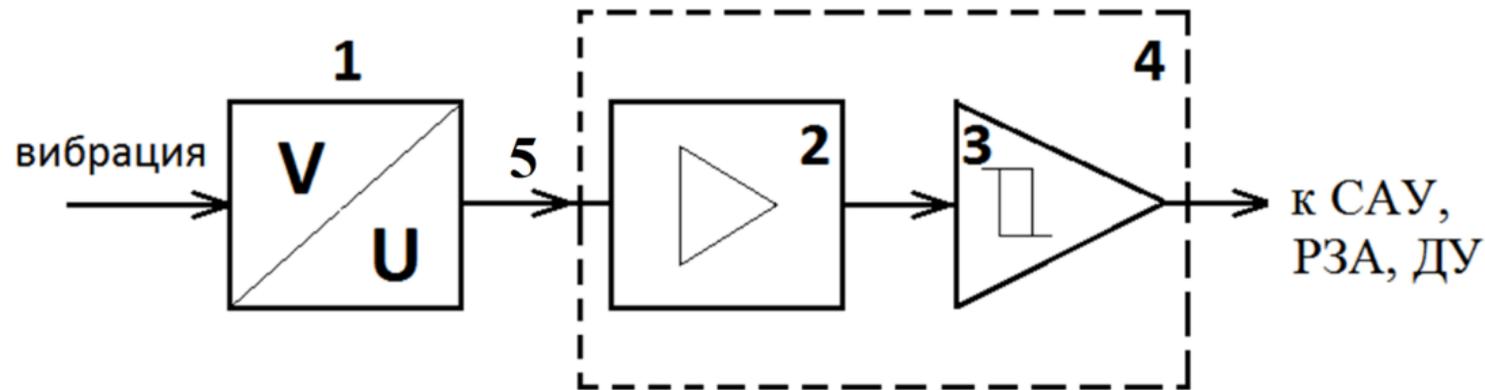


**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ  
ВЫЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СИЛОВОМ  
ТРАНСФОРМАТОРЕ ИЛИ РЕАКТОРЕ**

**Косарев Б.А.**

Одним из аварийных режимов работы силового оборудования является феррорезонанс - равенство индуктивного сопротивления измерительного или силового трансформатора с емкостным сопротивлением сети. Способ борьбы с ФП в измерительных трансформаторах антирезонансная конструкция, в силовых трансформаторах – устройства РЗА. Переход к цифровой форме информации на практике дает сбои в работе РЗА за счет роста доли нелинейной нагрузки, гармонических искажений при ФП.

Цель – разработка устройства, выявляющего ФП без анализа параметров тока и напряжения сети. Возникла идея детектирования ФП по параметрам вибрации.



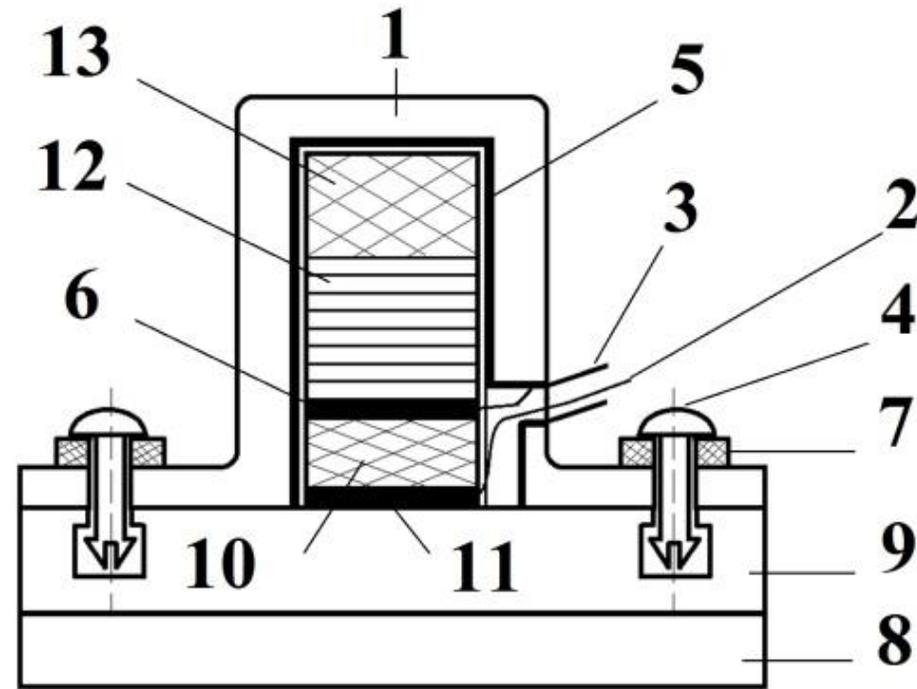
**Рис.1.** Структурная схема устройства для выявления феррорезонансного процесса: 1 – чувствительный элемент; 2 – усилитель напряжения на полевых транзисторах; 3 – триггер Шмитта на биполярных транзисторах; 4 – электронный преобразовательный блок; 5 – экранированный кабель

Типичным устройством для выявления ФП является пьезоэлектрический акселерометр.

Однако в условиях ФП пьезоэлектрический акселерометр:

1. Будет находиться в вышедшем из сердечника магнитном поле трансформатора (нагрев токами Фуко и перемагничиванием).
2. Силовой трансформатор в условиях ФП перегревается.

Задача – разработка пьезоэлектрического акселерометра специальной конструкции.



**Рис. 2.** Конструкция пьезоэлектрического акселерометра:

1 – крышка корпуса; 2 – сигнальная жила экранированного кабеля; 3 – экран экранированного кабеля; 4 – защелка с фиксатором; 5 – тонкопленочная металлизация; 6 – отрицательный электрод пьезоэлектрической пластины; 7 – шайба; 8 – магнитная платформа; 9 – основание корпуса; 10 – пьезоэлектрическая пластина; 11 – положительный электрод пьезоэлектрической пластины; 12 – инерционная масса; 13 – резиновая прокладка (упругий элемент)

Выполним оценочный расчет нагрева инерционной массы 17 в условиях ФП при шихтованном исполнении (в виде пакета пластин) и монолитном исполнении.

В процессе работы магнитопроводы трансформаторов и реакторов нагреваются за счет возникновения в них вихревых токов и потерь на гистерезис. Обусловленная такими потерями мощность нагрева инерционной массы акселерометра может быть вычислена через удельную мощность потерь:

$$P_0 = p_x \cdot m, \quad (1)$$

где  $p_x$  – удельная мощность потерь в стали,  $m$  – масса инерционной массы.

Согласно справочным данным удельная мощность потерь в электротехнической стали Э12 при толщине листа  $h = 0,5$  мм, величине магнитной индукции  $B = 1$  Тл, частоте  $f = 50$  Гц составляет  $p_x = 3$  Вт/кг (инерционная масса 17 шихтованного исполнения, т.е. выполнена в виде пакета соединенных высокотемпературным клеем металлических листов).

При увеличении толщины пластин до 10 мм (инерционная масса 17 монолитного исполнения) удельная мощность потерь в электротехнической стали Э12  $p_x$  возрастает в 400 раз, так как она прямо пропорциональна квадрату толщины листа  $h$  [11]:

$$p_x = 4 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot h^2 \cdot k_f^2 \cdot 10^{-10} / (3 \cdot d \cdot \rho), \quad \underline{\underline{(2)}}$$

где  $B$  – амплитуда магнитной индукции,  $f$  – частота,  $h$  – толщина листа электротехнической стали,  $k_f$  – коэффициент формы кривой магнитной индукции,  $d$  – плотность материала,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала.

Тогда удельная мощность потерь в инерционной массе 17 монолитного исполнения из электротехнической стали Э12 составит  $p_x = 1200$  Вт/кг.

Переходный процесс нагрева инерционной массы может быть рассчитан согласно следующим выражениям [12]:

$$T = T_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + T_v \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad \underline{\underline{(3)}}$$

$$\tau = \frac{c}{-k \cdot S + \alpha \cdot P_0}, \quad \underline{\underline{(4)}}$$

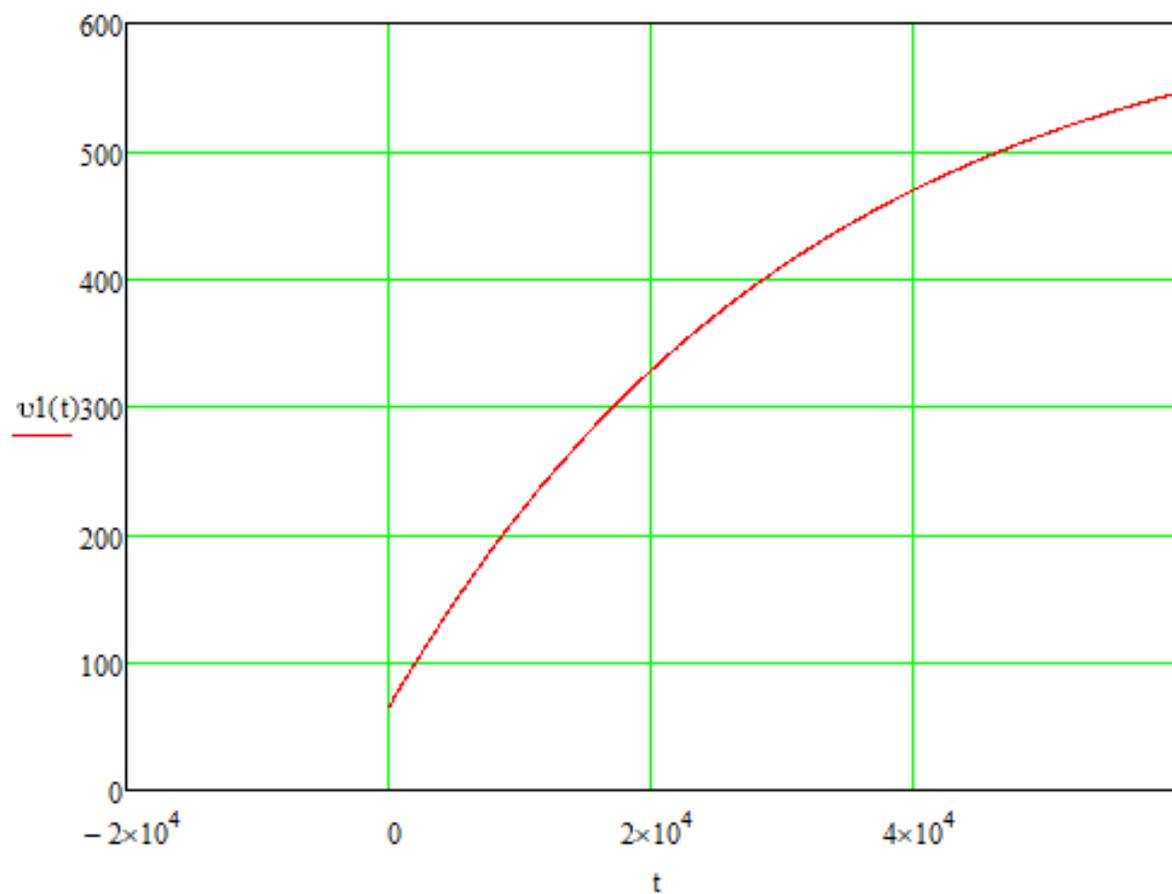
$$T_v = \frac{P_0 + k \cdot S \cdot T_0}{-k \cdot S + \alpha \cdot P_0}, \quad \underline{\underline{(5)}}$$

где  $T_{\text{нач}}$  – начальная температура инерционной массы,  $T_v$  – установившаяся температура инерционной массы,  $c$  – удельная теплоемкость материала инерционной массы,  $k$  – суммарный коэффициент теплоотдачи,  $S$  – площадь полной поверхности инерционной массы,  $\alpha$  – температурный коэффициент удельного сопротивления,  $P_0$  – мощность нагрева инерционной массы,  $T_0$  – температура окружающего пространства.

Учитывая теплоотдачу от поверхности инерционной массы 17 при естественной нестабильной конвекции и приняв температуру воздуха трансформаторной подстанции  $T_1 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температуру инерционной массы 17 до ФП  $T_2 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – соответствует номинальному режиму работы силового трансформатора, степень черноты поверхности инерционной массы 0,8, площадь полной поверхности  $S = 0,0005 \text{ м}^2$ , имеем: коэффициент конвективной теплоотдачи  $k_1 = 9,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , коэффициент радиационной теплоотдачи  $k_2 = 7,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , суммарный коэффициент теплоотдачи  $k = k_1 + k_2 = 16,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Рассчитаем нагрев инерционной массы 17 в условиях ФП для монолитного и шихтованного исполнений. Пусть время прибытия ремонтной бригады после возникновения ФП составляет  $t = 3600 \text{ с}$ , материал инерционной массы 17 сталь Э12, ее масса  $m = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ , удельная теплоемкость стали  $c = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , суммарный коэффициент теплоотдачи  $k = 16,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , площадь полной поверхности  $S = 0,0005 \text{ м}^2$ , температурный коэффициент удельного сопротивления стали  $\alpha = 0,0025 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$ .

Согласно формулам (1), (3)– (5) для монолитного исполнения инерционной массы 17 ее температура увеличится на  $60,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для шихтованного исполнения массы изменение температуры пренебрежимо мало.



$t := 5 \cdot \tau$       $v1(t) = 628.272$      . - установившаяся согласно Курбатову температура через  $5 \cdot \tau$ , что дает незначительную погрешность

$\frac{\tau}{3600} = 8.875$       $t := 3600$       $v1(t) = 125.431$      . температура через 1 час

$v1(t) - v_{нач} = 60.431$      . разница с номинальной температурой через 1 час

## **Выводы:**

1. Разработана конструкция устройства для выявления ФП с участием силовых трансформаторов.
2. Показано, что предложенная конструкция пьезоэлектрического элемента уменьшает нагрев устройства переменным магнитным полем. Для инерционной массы около 8 г монолитного исполнения нагрев за 1 час составляет около 60 °С, для шихтованного исполнения – 2,5 °С.



# ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2829713

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРОУСКОРЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Омский государственный технический университет"  
(ОмГТУ) (RU)*

Автор(ы): *Косарев Борис Андреевич (RU)*

Заявка № 2023127624

Приоритет изобретения 27 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 05 ноября 2024 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 27 октября 2043 г.



*С Новым годом!*



*Пусть сойдутся все  
заветные мечты!*