

Некоторые материалы при длительном воздействии ультрафиолета подвергаются разложению.

Основным способом защиты от химических воздействий является использование защитных покрытий. Также для предотвращения попадания воды и агрессивных веществ внутрь устройства применяется герметизация.

**Биологические воздействия.** Биологические факторы воздействия на технику являются довольно специфичными, поскольку возникают редко и представляют собой попадание живых организмов в устройство. Самым частым случаем такого типа неисправностей является появление плесневых грибов, приводящих к замыканиям, разрушению покрытий и коррозии. Для избежания подобной неисправности необходимо следить за условиями эксплуатации электронных приборов, не допускать попадания внутрь влаги и грязи и регулярно производить очистку.

**Выводы.** В работе изучены основные причины появления неисправностей в электронных

устройствах и приведены способы диагностики этих неисправностей [4]. Можно сделать вывод, что существует множество факторов, воздействующих на электронную аппаратуру, и в связи с очень стремительным развитием электроники необходимо учитывать весомость всех факторов и оценивать их вклад при защите от внешних воздействий.

#### Литература

1. Классификация неисправностей [сайт]. – URL: <https://helpiks.org/8-95905.html> (дата обращения: 02.09.2025).
2. Радиоэлектронная аппаратура и основы ее проектирования / Н. И. Каленкович [и др.]. – Мн.: БГУИР, 2008. – 200 с.
3. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства: учебник / Ф. А. Ткаченко. – М.: ИНФРА-М: Новое знание, 2011. – 682 с.
4. Никитин, Л. Н. Испытания, контроль и диагностика приборов и электронных средств / Л. Н. Никитин, А. Н. Лукин, В. Н. Семенов. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 243 с.

УДК 620.179.14

### СОЗДАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ 12ХН3А

Кулагин В. Н., Бурак В. А., Осипов А. А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрена возможность многопараметрового контроля стали 12ХН3А с использованием магнитных параметров. Даны рекомендации по увеличению надежности определения контролируемых величин, а также повышению надежности выпускаемой продукции.

**Ключевые слова:** магнитный метод, неразрушающий контроль, точность измерения магнитных характеристик

### CREATING STABLE MULTI-PARAMETER MODELS USING 12ХН3А STEEL

Kulagin V. N., Burak V. A., Osipov A. A.

The State Scientific Institution

“Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus

**Abstract.** The possibility of multi-parameter testing of 12ХН3А steel using magnetic parameters is considered. Recommendations for increasing the reliability of determining the controlled quantities, as well as improving the reliability of manufactured products, are provided.

**Keywords:** magnetic method, non-destructive testing, magnetic characteristic measurement accuracy.

Адрес для переписки: Осипов А. А., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: [osipov@iaph.bas-net.by](mailto:osipov@iaph.bas-net.by)

Контроль сталей с неоднозначной зависимостью является одной из трудных проблем методов неразрушающего контроля (НК) при их внедрении в производственный процесс предприятий. Для решения проблемы возможно использование многопараметрового метода контроля [1, 2].

При создании моделей использовались линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j, \quad (1)$$

где  $b_j$  – коэффициенты многопараметровой модели,  $y$  – зависимые переменные,  $x_j$  – независимые переменные.

Для большей объективности результатов воспользуемся данными, которые известны из литературы [3, 4]. В [3] приводятся данные для стали 12ХН3А при температуре закалки  $T_{\text{зак}} = 860^\circ\text{C}$  по четырем измеренным магнитным параметрам: коэрцитивной силе  $H_c$ ; релаксационной намагниченности  $M_{H_r}$ ; начальной магнитной восприимчивости  $\chi_n$  и намагниченности насыщения  $M_s$ . Модели по [3] можно построить для температуры отпуска  $T_{\text{отп}}$  и твердости  $HRC$ . Интервал изменения температур от 250 до 750 °C и твердости от 17 до 37  $HRC$ .

На рисунке 1 представлена зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\chi_n$  от температуры отпуска  $T_{\text{отп}}$ . (аналогичные зависимости

приводятся в [3] и для других трех магнитных параметров), поэтому необходимо привлечение нескольких параметров.

На рисунке 2 представлена зависимость температуры отпуска вычисленной  $T_{\text{отп. выч}}$  от температуры отпуска измеренной  $T_{\text{отп. изм}}$  для модели из четырех параметров ( $H_c$ ,  $M_{H_r}$ ,  $\chi_n$ ,  $M_s$ ).

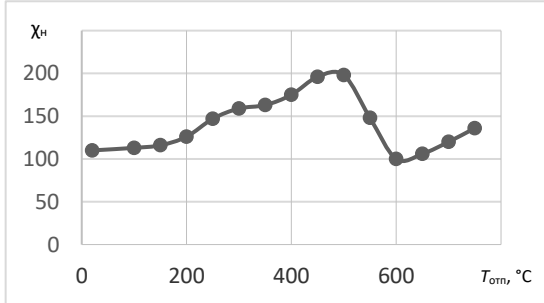


Рисунок 1 – Зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\chi_n$  от температуры отпуска  $T_{\text{отп}}$  [3]

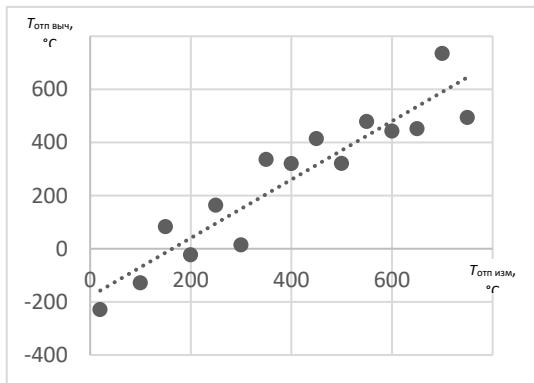


Рисунок 2 – Зависимость температуры отпуска вычисленной  $T_{\text{отп. выч}}$  от измеренной  $T_{\text{отп. изм}}$

Из рисунка 2 видно, что вычисленные значения температуры отпуска  $T_{\text{отп. выч}}$  могут быть отрицательными (при вычислениях в модель из четырех параметров вводилась случайная ошибка 1 %) [1, 2, 5], коэффициент множественной корреляции  $R = 0,9478$ , приведенная погрешность  $\gamma = ((1 - R^2)/3)^{1/2} = 18,4\%$  (т. к.  $R > 0,9$ ) [4–6]. Для увеличения точности вычисленных параметров создают более сложные модели, например, из 8-ми параметров, причем для увеличения стабильности модели при ее формировании вводят погрешность (в данном случае 1 %)

$$T_{\text{отп. выч}} = 2848 + 32271/(H_c \cdot H_c) - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot M_s \cdot M_s + (2) \\ 4,92 \cdot 10^9/(M_s \cdot M_s) - 0,0571 \cdot M_{H_r} \cdot H_c - 6,235 \cdot M_s / H_c - \\ 6046 \cdot M_{H_r} - 0,540 \cdot M_s + 1,484 \cdot 10^6 / M_s.$$

Коэффициент множественной корреляции  $R = 0,9825$ , а приведенная погрешность  $\gamma = ((1 - R^2)/3)^{1/2} = 10,8\%$ . Однако, более объективно анализировать модели не только по величине приведенной погрешности, а и по

коэффициенту чувствительности к погрешности параметров [1, 2]

$$\delta y = \sum_{j=1}^p (b_j x_j / y) \delta_j = \sum_{i=1}^p K_i \delta_i, \quad (3)$$

где  $K_j$  – коэффициенты значимости мультипликативных ошибок  $\delta_j$  независимых переменных.

Тогда для модели (2) получаем

$$\delta y = 4,38 + 2,45/(H_c \cdot H_c) - 2,787 \cdot M_s \cdot M_s + \\ 2,717/(M_s \cdot M_s) - 0,186 \cdot M_{H_r} \cdot H_c - 3,558 \cdot M_s / H_c - \\ 2,067 \cdot M_{H_r} - 1,386 \cdot M_s + 1,368 / M_s.$$

В (3) средний по модулю коэффициент  $K \sim 2$  как при восьми параметрах, так и при семи. В случае, если модель создавали без введения погрешности, то в обоих случаях средний по модулю коэффициент находится на уровне десятков тысяч. На рисунке 3 приводится модель из семи параметров (без введения в нее погрешности).

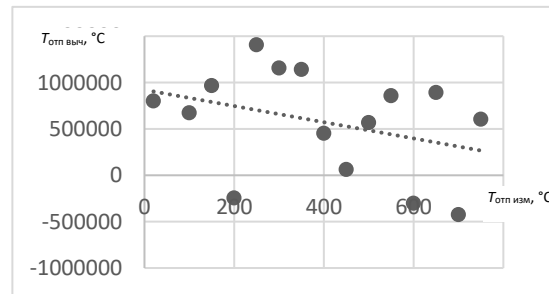


Рисунок 3 – Зависимость температуры отпуска вычисленной  $T_{\text{отп. выч}}$  от измеренной  $T_{\text{отп. изм}}$  для модели из семи параметров без введения в нее погрешности

В данном случае (рисунок 3) зависимость имеет обратный ход (рисунок 2), но есть варианты, в которых зависимость практически отсутствует (при вычислениях по модели в каждый ее параметр вводилась случайная ошибка 1 %).

Необходимо также отметить, что при формировании моделей без введения в них погрешности результаты получаются существенно разными при переходе от семи параметров к восьми, поскольку коэффициент множественной корреляции  $R$  изменяется от 0,996 до 0,713, а величина приведенной погрешности  $\gamma$  возрастает от 5 % до 35 %. При этом данные изменения для модели с восемью параметрами не происходят при введении в нее погрешности приблизительно  $6 \cdot 10^{-12}\%$  и связаны с появлением в модели (2) последнего слагаемого.

Расчеты по формулам для коэффициентов множественной корреляции  $R^2$  (3.37) и (3.38) из [7] приводят к отрицательным результатам (приблизительно -25 и -59, соответственно), что является еще одним аргументом для того, чтобы вводить погрешность в модель при ее формировании. При замене последнего слагаемого на  $H_c$ ,  $M_s$  или  $\chi_n$  падение коэффициента множественной корреляции  $R$  не

наблюдается (по порядку величины – это погрешность расчета).

На основании проведенных вычислений, необходимо рекомендовать выполнять значительно более точное измерение независимых параметров, поскольку только для коэрцитивной силы  $H_c$  в модели (2) имеет место существенная внутренняя компенсация погрешности измерения параметра  $K$  с  $\sim 6$  до значения около 1 [5].

#### Литература

1. Осипов, А. А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78–84.
2. Осипов, А. А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87–93.

3. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.

4. Кулагин, В. Н. Оценка надежности и выбор многопараметровой модели при использовании магнитного контроля для стали 12ХН3А / В. Н. Кулагин, В. А. Бурак, А. А. Осипов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы конференции, Могилев, 24–25 апреля 2025 г.; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2025. – С. 288–289.

5. Оценка регрессионных многопараметровых моделей в задачах магнитного неразрушающего контроля / А. А. Осипов, В. А. Бурак, З. М. Короткевич, А. С. Счастный // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 4. – С. 32–44.

6. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

7. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 240 с.

УДК 621.317.799: 621.3.049.77

### ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Лисенков Б. Н., Сидорик О. В.

Открытое акционерное общество «МНИПИ», Минск, Беларусь

**Аннотация.** Представлен метод формирования прямоугольных импульсов напряжения большой мощности за счет разряда накопительного конденсатора.

**Ключевые слова:** контроль силовых диодов, транзисторов, измерение ВАХ.

### FORMATION OF POWERFUL RECTANGULAR VOLTAGE PULSES

Lisenkov B. N., Sidorik O. V.

MNIPI Open Joint-Stock Company, Minsk, Belarus

**Abstract.** A method for generating high-power rectangular voltage pulses by discharging a storage capacitor is presented.

**Keywords:** power diode and transistor testing, I-V characteristic measurement.

Адрес для переписки: «МНИПИ» Лисенков Б. Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Сфера приборостроения охватывает производство и контроль изделий опто- и микроэлектроники. Контроль силовых компонентов требует применения мощных импульсных сигналов большой скважности, чтобы избежать повышения температуры объекта подверженного испытаниям (ОПИ), который, как правило, обладает малой теплоемкостью.

Для повышения достоверности контроля статических параметров ОПИ желательно использовать испытательные импульсы прямоугольной формы и проводить контроль интересующего параметра при установившемся значении вершины испытательного сигнала.

В работе рассматривается метод формирования прямоугольных (трапецеидальных) импульсов напряжения с плоской вершиной большой мощности, например,  $5 \div 10$  кВт, и прецизионной амплитуды предназначенных для регистрации вольтамперных характеристик (ВАХ) силовых диодов и транзисторов.

Как правило, мощные импульсы напряжения формируют путем разряда накопительного

конденсатора через ОПИ с помощью электронного ключа, способного выдерживать требуемое напряжение и большой ток, при этом формируемые остроконечные импульсы не обеспечивают высокой точности измерений из-за возникающей динамической погрешности.

Предлагаемый метод основан на формировании мощных импульсов напряжения с помощью быстродействующего и высоковольтного операционного усилителя (ОУ), охваченного цепью отрицательной обратной связи, выходной каскад которого выполнен на силовоточном МОП транзисторе, как показано на рисунке 1.

С помощью блока управления задают амплитуду и длительность входного импульса. Блок формирования преобразует цифровой код амплитуды, поступающий с блока управления, в уровень напряжения. Кроме того, блок формирует импульсы на входе ОУ путем переключения его входа между уровнем напряжения и нулевым уровнем (земля). Длительность импульсов определяется сигналом с блока управления.