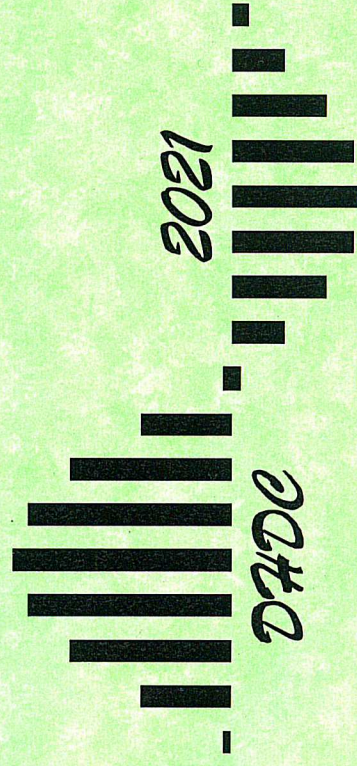


**ДИНАМИКА  
НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы

XIV Всероссийской научно-технической  
конференции



УДК 621.3:004(063)  
ББК 381:321Я73  
Д44

**Редакционная коллегия:**

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;  
д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;  
канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

*Печатается по решению Ученого совета  
Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова*

**Динамика нелинейных дискретных электротехнических  
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.  
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.**

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)  
ББК 381:321Я73  
© Издательство  
Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

**ДИНАМИКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Алифов А.А.  
(Москва, ИМАШ РАН)

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ  
ВОЗБУЖДЕНИИ И ЗАПАЗДЫВАНИИ**

В устройствах различного рода (системы автоматического управления, следящие системы, электроника, регуляторы и др.) широко распространены системы с запаздыванием. В автономных и телеуправляемых системах (подвижные роботы, манипуляторы и др.) источником запаздывания является канал передачи данных и пренебрежение им может привести к существенным ошибкам при управлении группой роботов [1]. В данной статье рассматриваются параметрические колебания при запаздывающей силе упругости в русле теории колебаний систем с ограниченным возбуждением [2–3]. В основу положена описанная в [2] модель стержня с пружиной (рис. 1), соединенной с кривошипом, приводимым в движение двигателем ограниченной мощности.

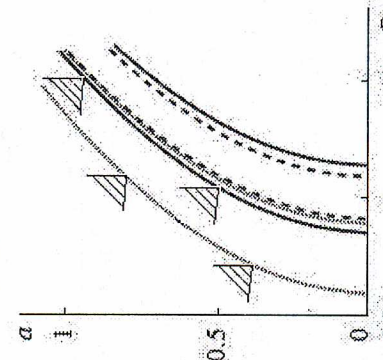
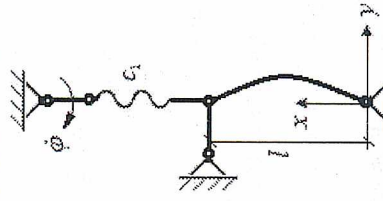


Рис. 1. Модель системы Рис. 2. Амплитудно-частотные кривые Система, являясь нелинейной, имеет уравнения движения

$$\ddot{y} + (\omega^2 + b \sin \varphi) y = -\beta_1 \dot{y} - m^{-1} f(y) - c_t y, \quad (1)$$

$$J \ddot{\varphi} = M(\varphi) - 0,5 c_3 y^2 \cos \varphi - 0,5 c_3 \sin 2\varphi - c_4 \cos \varphi,$$

Как видно из графика, ошибка на тестовой выборке уменьшается с увеличением сложности модели. При уменьшении предсказания частоты для сети с 4 нейронами в скрытом слое, где  $MAE < 0,45$  рад/с, значение измеряемой расстройки в соответствии с формулой (4) будет отличаться от истинного не более, чем на 0,28%. Данная точность является достаточной для работы автоматики УДР.

Таким образом, применение нейронных сетей для анализа переходных процессов в КНП сети позволяет получать необходимые для расчета расстройки параметры с требуемой точностью при использовании четырёх отсчетов исследуемого сигнала. Для работы автоматики с достаточной точностью измерения расстройки требуется использовать ИНС с четырьмя и более нейронами в скрытом слое.

Повышение сложности модели позволяет существенно уменьшить ошибку для прогнозируемых значений и снизить погрешность определения расстройки до 0,16%, что позволяет повысить точностные показатели настройки реактора в резонанс с сетью.

#### Литература

1. Соловьева И. В. Совершенствование управления компенсации емкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2018. 24 с.
2. Дементий Ю. А., Шорников Е. В. Обучаемый модуль параметрической идентификации сигнала // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 395–398.
3. Коцеев М. И., Славутский Л. А. Оценка параметров переходных процессов при помощи нейронной сети // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 94–98.

Дементий Ю. А., Николаев К. П.  
(Чебоксары, ООО «Релематика», ЧГУ)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА В БАЗИСЕ МГНОВЕННЫХ ВЕЛИЧИН

В работе представлен метод определения индуктивности ДДР для создания интеллектуального устройства управления автоматикой реактора [1]. В данной работе предложено использование мгновенных значений тока и напряжения реактора для определения его индуктивности.

Мгновенные значения тока и напряжения измеряются вольтметром, включённым во вторичную обмотку реактора, и встроеным трансформатором тока (рис. 1), где  $r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки,  $L_{p1}$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки,  $r_2$  – активное сопротивление вторичной (сигнальной) обмотки,  $L_{p2}$  – индуктивность рассеяния вторичной обмотки,  $R$  – эквивалентное сопротивление потерь на намагничивание,  $L$  – индуктивность намагничивания.

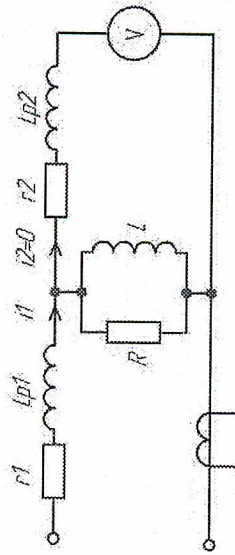


Рис. 1. Схема замещения реактора с подключенным вольтметром и трансформатором тока

Вследствие высокого входного сопротивления вольтметра можно принять ток вторичной обмотки равным нулю. Тогда измеряемые ток и напряжение будут связаны дифференциальным уравнением

$$i'(t) = \frac{u'(t)}{R} + \frac{u(t)}{L}.$$

Для двух моментов времени составляется система уравнений

$$i'(t_1) = \frac{u'(t_1)}{R} + \frac{u(t_1)}{L}, \quad i'(t_2) = \frac{u'(t_2)}{R} + \frac{u(t_2)}{L}.$$

где  $i'(t_1)$ ,  $u'(t_1)$ ,  $u(t_1)$  — значения производных тока и напряжения и напряжения в первый момент времени,  $i'(t_2)$ ,  $u'(t_2)$ ,  $u(t_2)$  — значения производных тока и напряжения во второй момент времени.

Решением системы (2) будет искома индуктивность:

$$L = \frac{u(t_1)u'(t_2) - u'(t_1)u(t_2)}{i'(t_1)u'(t_2) - i'(t_2)u'(t_1)}$$

Поскольку в данном методе производные тока и напряжения не измеряются, предлагается аппроксимировать производные конечными разностями. Используется несимметричная разность, степень несимметрии которой регулируется коэффициентом  $k$  [2]:

$$f'(t) \approx \frac{f(t+h)(1-k) + f(t)(2k-1) - f(t-h)k}{h}$$

где  $k$  — степень несимметрии,  $h$  — шаг дискретизации.

Предполагается использовать предлагаемый метод в автоматике управления ДП совместно с импульсным методом измерения расстройки компенсации [3]. Измеряемые напряжение и ток переходных процессов, генерируемых импульсным методом, описываются уравнениями:

$$u = U \sin(\omega t + \varphi) e^{-\delta t},$$

$$i = \frac{U}{R} \sin(\omega t + \varphi) e^{-\delta t} + \frac{U}{L} \left[ \frac{\delta \sin(\omega t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + \omega^2 e^{\delta t}} - \frac{\omega \cos(\omega t + \varphi)}{\delta^2 e^{\delta t} + \omega^2 e^{\delta t}} \right],$$

где  $U$  — амплитудное значение напряжения,  $\omega$  — частота свободных колебаний,  $\varphi$  — начальная фаза колебаний,  $\delta$  — декремент затухания.

На рис. 2 представлена зависимость относительной ошибки вычисления  $L$  ( $\delta L$ ) от коэффициента  $k$ . Как видно на графике, существуют два значения  $k$ , при которых достигается нулевая относительная ошибка вычисления  $L$ .

На рис. 3 и 4 построены зависимости относительных ошибок вычисления  $L$  от коэффициента  $k$  для разных значений декремента затухания и частоты свободных колебаний.

Как видно из рис. 3, при увеличении декремента затухания значения  $k$ , при которых достигается нулевая относительная ошибка, сдвигаются в сторону нуля, также увеличивается абсолютное значение относительной ошибки.

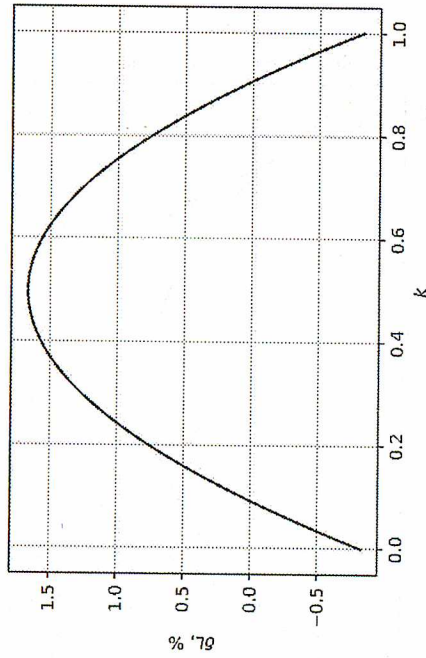


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки определения  $L$  от  $k$ ;  $L = 2,5$  Гн

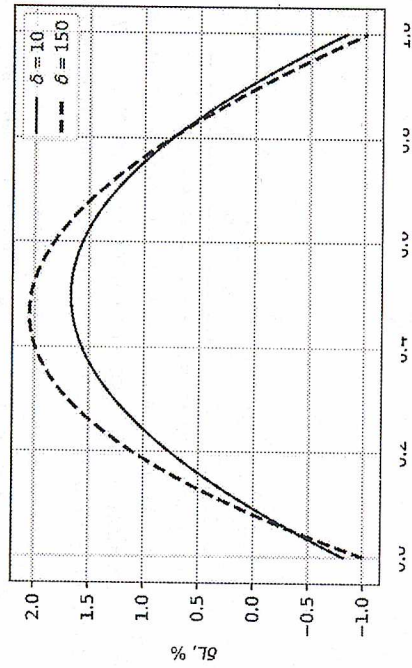


Рис. 3. Зависимость относительной ошибки определения  $L$  от  $k$  при разных декрементах затухания;  $L = 2,5$  Гн

Из рис. 4 видно, что при увеличении частоты свободных колебаний увеличивается абсолютное значение относительной ошибки, а значения  $k$ , при которых достигается нулевая относительная ошибка, не изменяются.

Из анализа зависимостей относительной ошибки от  $k$  можно сделать вывод, что целесообразно проводить аппроксимацию производных при значениях коэффициента несимметрии  $k_0$ , уменьшающих ошибку вычисления  $L$ .

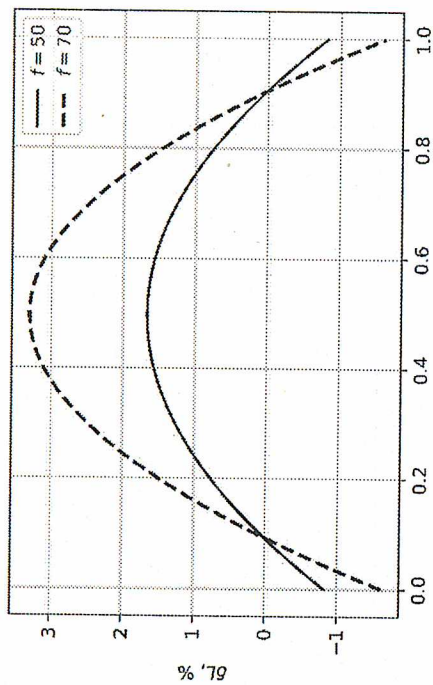


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки определения  $L$  от  $k$  при разных частотах свободных колебаний;  $L = 2,5$  Гн

На рис. 5 показана зависимость относительной ошибки определения  $L$  от частоты свободных колебаний и декремента затухания. Как видно, с увеличением частоты свободных колебаний и декремента затухания возрастает и относительная ошибка.

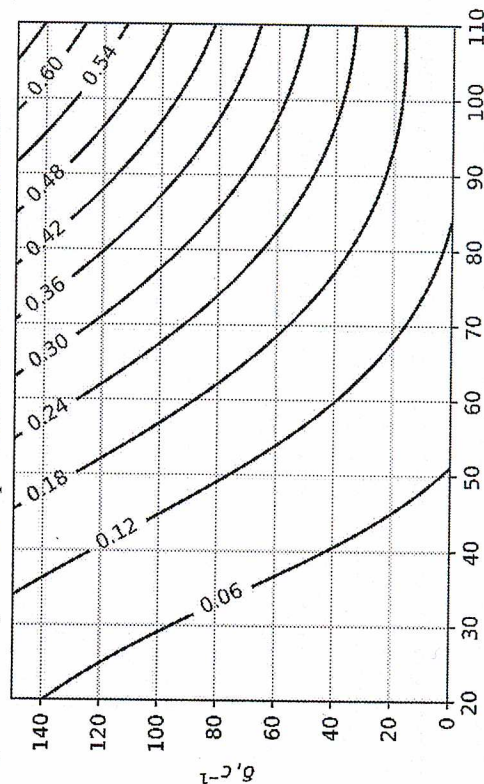


Рис. 5. Зависимость относительной ошибки определения  $L$  от частоты свободных колебаний и декремента затухания;  $L = 0,1$  Гн

Для расчёта ошибки использовались значения декремента затухания от 0 до  $150 \text{ с}^{-1}$  и частоты свободных колебаний из диапазона от 20 Гц до 110 Гц. Как видно из рис. 5, относительная ошибка не превышает 1 %, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к автоматике управления ДГР [4].

Таким образом, предложен метод определения индуктивности ДГР, основанный на использовании мгновенных значений тока и напряжения реактора.

Проанализированы зависимости относительной ошибки определения индуктивности от декремента затухания и частоты свободных колебаний. Выявлена возможность уменьшения ошибки определения индуктивности подбором коэффициента несимметрии разностной производной.

Проведено сравнение относительной ошибки определения индуктивности с требованиями, предъявляемыми к автоматике ДГР.

#### Литература

1. Дементий Ю. А., Шорников Е. В. Совершенствование методов и алгоритмов настройки плавящихся ДГР: обзор методов и постановка задачи // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Международ. науч.-техн. конф. Чебоксары, 2019. С. 255–261.
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учеб. пособие для вузов. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 735 с.
3. Соловьёв И. В. Совершенствование управления компенсацией ёмкостных токов замыкания на землю в распределительных электрических сетях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2018. 24 с.
4. СТО 34.01-3.2-008-2017. Реакторы заземляющие дугогасящие 6-35кВ. Общие технические требования: стандарт организации: дата введения 28.02.2017 / Публичное акционерное общество «Российские сети».