ISSN 0201–7032

ЖУРНАЛ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ (РОНКТД)

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

РОНКТД

Спектр

11 (185) 2013
ноябрь

ЛУЧ ДЕЛАЕТ ТАЙНОЕ ЯВНЫМ

15 ЛЕТ УСПЕШНОЙ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ!

ПРОСТО ЛУЧШИЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ!

МИНИАТЮРНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП ПЕЛЕНГ-115

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП ПЕЛЕНГ-116

МИНИАТЮРНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ВД 70

ПРИБОРЫ ЗАРЕГИСТРИРОВАНЫ В РЕЕСТРАХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ РОССИИ И КАЗАХСТАНА

НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КОМПАНИЯ «ЛУЧ»

143930, Московская область, г. Балашиха, мкр. Салтыковка, ш. Ильича, д. 1

тел./факс: (498) 520-77-99 (многоканальный); тел.: (495) 961-09-03;
E-mail: luch@luch.ru; http://www.luch.ru

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

РОНКТД

2013

11 (185) ноябрь

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Главный редактор
В.В. Клюев – проф., акад. РАН

Заместители главного редактора:
В.Г. Шевандыкин – д-р техн. наук
П.Е. Клейзер

Редакционный совет:
Артемьев Б.В., д-р техн. наук, проф.
Бобров В.Т., д-р техн. наук, проф.
Будадин О.Н., д-р техн. наук
Буклей А.А., д-р техн. наук
Вавилов В.П., д-р техн. наук, проф.
Голенков В.А., д-р техн. наук, проф.
Горкунов Э.С., д-р техн. наук, проф., акад. РАН
Ефимов А.Г., д-р техн. наук
Зусман Г.В., д-р техн. наук
Коннов В.В., д-р техн. наук, проф.
Коновалов Н.Н., д-р техн. наук
Костюков В.Н., д-р техн. наук, проф.
Кузепев Н.Р., д-р техн. наук, проф.
Матвеев В.И., канд. техн. наук
Нуждин Г.А., канд. техн. наук
Подмастерьев К.В., д-р техн. наук, проф.
Полупан А.В., д-р техн. наук
Степанов Ю.С., д-р техн. наук, проф.
Степанова Л.Н., д-р техн. наук
Сухоруков В.В., д-р техн. наук, проф.
Труханов В.М., д-р техн. наук, проф.
Шелихов Г.С., д-р техн. наук, проф.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
П.Е. Клейзер
Д.А. Елисеев
С.В. Сидоренко

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия Российской Федерации. Свидетельство регистрации ПИ № ФС77-46328

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в издательстве или в любом почтовом отделении.
Индексы по каталогам агентств:
«Роспечать» – 47649;
«Пресса России» – 29075;
«Почта России» – 60260.

ООО «Издательский дом «Спектр»
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1

Тел.: (495) 514 76 50, 8 (916) 676 12 38
Http://www.td-j.ru; www.idspektr.ru
E-mail:td@idspektr.ru, tdjpost@gmail.com

Спектр

СОДЕРЖАНИЕ

Хакимов А. Г. О собственных продольных колебаниях ступенчатого стержня с распределенной присоединенной массой . . . 9

Недавний О. И., Осипов С. П. Применение рассеянного фотонного излучения для контроля покрытий на узких ребрах 14

Лившиц А. М., Горский Е. В. Особенности обучения основам аналитической эмиссионной спектроскопии с использованием современных спектрометров 19

Гаврилин А. Н. Метод снижения уровня вибраций при механической обработке 23

Горшков В. А., Рожкова Н. И., Прокопенко С. П. Визуализация микрокальцинатов на основе выпуклой комбинации плотности и эффективного атомного номера 26

Кликушин Ю. Н., Кобенко В. Ю. Способ оценки состояния объектов диагностики 31

Ксенофонтов В. Е., Буков В. Н. Оценивание и диагностирование функционирования бортового интегрированного навигационного комплекса в рамках перспективных стратегий его технического обслуживания 36

Захаров О. В. Выбор оптимальной схемы контроля размеров деталей на станках токарной группы 42

Данилин Н. С., Белов Д. А., Димитров Д. М., Сабиров И. Х. Электронно-компонентная база СВЧ-диапазона микроспутников для диагностики метеоритной угрозы 45

Липовко П. О. Метрологические аспекты разработки ультразвуковых высокочастотных импедансометров нового поколения . . . 49

Мустафабейли Х. Ш. Особенности учета и оценки загрязнения почвы от точечных источников эмиссии тяжелых металлов 56

Шахнин В. А., Моногаров О. И., Чебрякова Ю. С. Алгоритм управления движением антенны мехатронного комплекса электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования 60

Власов Ю. А., Удлер Э. И., Тищенко Н. Т., Саркисов Ю. С. Высоковольтная газоразрядная диагностика агрегатов машин по параметрам работающего масла 65

Попов Ю. В. Система электроснабжения воздушных судов – объект контроля 72

Журнал входит в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней.

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Контроль. Диагностика» обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Testing. Diagnostics

Journal of Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

№ 11 (185) November 2013

CONTENTS

Khakimov A. G. About Own Longitudinal Oscillations of the Stepped Bar with the Distribution of the Added Masses 9

Nedavnii O. I., Osipov S. P. Application of Scattered Photon Radiation Control Coatings Narrow Ribs 14

Livshits A. M., Gorsky E. V. Method of Teaching Analytical Optical Emission Spectroscopy Using Modern Spectrometers . . . 19

Gavrilin A. N. Method to Reduce Vibration when Mechanical Machining 23

Gorshkov V. A., Rozhkova N. I., Prokopenko S. P. Visualization of Microcalcifications on the Basis of a Convex Combination of Density and Effective Atomic Number 26

Klikushin J. N., Kobenko V. Y. Way of Estimation of a State of Diagnostic Objects 31

Ksenofontov V. E., Bukov V. N. Evaluation and Diagnosing of Functioning of the Onboard Integrated Navigating Complex within the Limits of Perspective Strategy of its Maintenance Service 36

Zakharov O. V. Selecting Optimal Scheme of Control of Dimensions of Parts on Lathes 42

Danilin N. S., Belov D. A., Dimitrov D. M., Sabirov I. Kh. Electronic and Component Base of Microwave Range of Microsatellites for Diagnostics of Meteoric Threat 45

Lipovko P. O. Metrological Aspects of Construction of Ultrasonic High Frequency Impedance Meters of New Generation 49

Mustafabeili Kh. Sh. Features of Accounting and Assessment of Pollution of Soil with Point Type Sources of Heavy Metals Emissions 56

Shakhnin V. A., Monogarov O. I., Chebryakova Yu. S. The Antenna Motion Control Algorithm of the Mechatronic Complex for Electronoise Diagnostics of High-Voltage Equipment 60

Vlasov Yu. A., Udler E. I., Tishchenko N. T., Sarkisov Yu. S. High-Voltage Gas-Discharge Diagnostics of Units of Cars on Parameters of Working Oil. 65

Popov. Yu. V. Doctor of Science Technical, Interstate Aviation Committee 72

НПП ДОРИ

ПОРТАТИВНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП УД3-71

ПРЕИМУЩЕСТВА ДЕФЕКТОСКОПА:

- **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ** - проведение дефектоскопии, толщинометрии, оценки скорости распространения ультразвуковых колебаний в материале.
- **МИНИМАЛЬНЫЕ ГАБАРИТЫ ДЕФЕКТОСКОПА** - не более (188 x 107 x 78) мм, обеспечивают высокую эргономичность прибора и простоту в эксплуатации.
- **ЭРГОНОМИЧНОСТЬ** - удобный корпус, малый вес, высококонтрастный TFT-дисплей, вывод наиболее часто используемых функций на "горячие клавиши" клавиатуры, а также использование специального кожаного чехла для удобного и надежного удержания прибора в руке.
- **КОМПЛЕКТ ПОСТАВКИ**
  Прибор по согласованию с Заказчиком комплектуется различными специализированными ПЭП, стандартными образцами и программным обеспечением для работы в различных производственных секторах.

СТЕПЕНЬ ЗАЩИТЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Степень защиты корпуса дефектоскопа соответствует IP65, дефектоскоп устойчив к воздействию ионизирующего излучения и рассчитан на работу в условиях повышенной влажности.

Рабочая температура окружающего воздуха от минус 30 до плюс 45 °С.

Внесен в реестр средств измерений Российской Федерации, Казахстана, Белоруссии, Украины, Узбекистана, Азербайджана.

Россия, 107023, г. Москва, ул. Измайловский Вал, дом 30; тел./факс (495) 580-3-777
E-mail:pp@ndtprompribor.ru
www.ndtprompribor.ru

* На правах рекламы

УДК 621.384.658

В. А. Шахнин, О. И. Моногаров, Ю. С. Чебрякова
(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых)
E-mail: vshakhnin@rambler.ru

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АНТЕННЫ МЕХАТРОННОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Предложен алгоритм управления движением антенны мехатронного диагностического комплекса. Отличительной особенностью алгоритма является корректировка параметров движения в соответствии с текущими результатами электрошумовой интродиагностики. Для интерполяции траекторий движения применен модифицированный метод оценочной функции.

Ключевые слова: интродиагностика, антенна, высоковольтное оборудование, частичные разряды, метод оценочной функции.

V. A. Shakhnin, O. I. Monogarov, Yu. S. Chebryakova
(Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs)

THE ANTENNA MOTION CONTROL ALGORITHM OF THE MEKHATRONIC COMPLEX FOR ELECTRONOISE DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

The algorithm to control the movement of the antenna of a mekhatronic diagnostic complex is proposed. A distinctive feature of the algorithm is the adjustment of the parameters of motion in accordance with the current results of electronoise introdiagnostics. The modified estimation function's method is used for interpolation of movement trajectories.

Keywords: introdiagnostics, antenna, high-voltage equipment, partial discharges, method of estimation function.

Современное состояние электроэнергетической отрасли в России характеризуется высокой степенью изношенности силового высоковольтного оборудования. Достоверная диагностика позволяет продолжать эксплуатацию уже выработавших ресурс аппаратов.Однако многие из традиционных методов диагностики ориентированы на систему планово-предупредительных ремонтов и непригодны для реализации внедряемой в настоящее время концепции обслуживания высоковольтного оборудования на основе оценки его текущего технического состояния. Эффективность перехода к этой концепции в значительной мере определяется возможностями применяемых методов и средств интродиагностики. Термин «интродиагностика» для высоковольтного оборудования означает неразрушающий (т.е. без вскрытия баков и слива диэлектрических жидкостей) контроль комплекса параметров, характеризующих состояние высоковольтных аппаратов, для предотвращения повреждений и ненормальных режимов их функционирования[1]. Безусловно, наиболее перспективны методы интродиагностики под рабочим напряжением без вывода оборудования из эксплуатации. К их числу относятся электрошумовые методы, позволяющие обнаружить быстроразвивающиеся локальные дефекты [2, 3]. Физической основой большой группы электрошумовых методов являются *частичные разряды* (ЧР), т.е. микропробои в диапазоне от десятых долей до десятков нанокулон, перекрывающие лишь небольшую часть изоляции. Процесс возникновения частичных разрядов является результатом действия множества факторов и носит случайный характер, что позволяет отнести метод ЧР к электрошумовым. К числу наиболее важных диагностических признаков ЧР относится сопровождающее их высокочастотное электромагнитное излучение.

Во Владимирском государственном университете им. А. Г. и Н. Г. Столетовых совместно с ОАО «Электросетьсервис» разработан *мехатронный диагностический комплекс* (МДК) «ЭЛЕКТРО», реализующий предложенный авторами способ электрошумовой диагностики трансформаторного оборудования электрических подстанций [4]. Комплекс представляет собой автономно функционирующую систему, объединяющую на общей интеграционной платформе мехатронные модули электрошумовой

диагностики с манипуляционно-исполнительными мехатронными модулями.

Аппаратные и программные средства комплекса обеспечивают возможность его встраивания в диагностические системы более высокого уровня. Термин «интеграционная платформа» в данном случае означает общие принципы функционирования мехатронных модулей, по которым они объединяются в комплекс. Для МДК «ЭЛЕКТРО» в качестве интеграционной платформы предложен принцип управления модулями на основе учета текущих результатов диагностики [5]. Этот принцип используется при формировании законов изменения напряженности электрического поля диагностируемого объекта, алгоритмов обработки диагностических сигналов, траекторий перемещения компонент комплекса и характера изменения параметров движения во времени.

Рассмотрим особенности реализации названного принципа для управления движением датчиков электромагнитного излучения мехатронного комплекса «ЭЛЕКТРО», в качестве которых применены направленные СВЧ-антенны типа АШП-1. Эти антенны предназначены для измерения шумов в диапазоне частот от 5 до 3000 МГц и хорошо подходят для электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования. Антенна имеет наружное исполнение, диапазон рабочих температур от –40 до +40 °С, массу 0,5 кг. В электроприводах МДК для перемещения элементов антенны использованы высокомоментные бесколлекторные двигатели постоянного тока с полым ротором. В качестве преобразователей движения применены планетарные и ролико-винтовые механизмы. Для сканирования диагностируемого крупногабаритного объекта (силового трансформатора) необходимо обеспечить перемещение элементов антенны по криволинейным траекториям с реализацией сложных законов движения во времени.

Анализ особенностей систем программного управления движением позволяет сделать вывод о том, что для перемещения антенны наиболее пригодны системы, реализующие контурное управление [6]. Эти системы обеспечивают решение практически любой задачи формообразования, с их помощью можно реализовать любую заданную траекторию перемещения антенны. Однако гибкость мехатронного комплекса при использовании систем контурного управления ограничивается тем, что траектории движения должны быть заданы заранее на этапе переобучения, например в связи с переходом на другой вид диагностируемого оборудования. Эта гибкость оказывается недостаточной в тех случаях, когда текущие результаты контроля требуют изменения траекторий непосредственно в процессе диагностики.

Необходимо решение задачи управления движением с элементами адаптации к текущим результатам диагностики, например к интенсивности электрошумовых процессов в изоляции. Для этого были проанализированы возможности создания алгоритмов управления движением антенны с элементами адаптации на основе наиболее распространенных методов интерполяции траекторных перемещений. С использованием программных моделей по методике, предложенной в работе [7], исследовали алгоритмы интерполяции на основе: параметрического уравнения траектории; метода оценочной функции; метода *цифровых дифференциальных анализаторов* (ЦДА), а также алгоритм CORDIC (цифра за цифрой). По результатам исследований сделан вывод о том, что для повышения достоверности диагностики путем изменения параметров движения антенны в соответствии с текущими данными диагностики целесообразно применение модернизированного метода оценочной функции.

Поясним его суть на примере наиболее простого исполнительного механизма антенны. Механизм имеет ортогональную кинематическую схему и осуществляет перемещения одного из элементов антенны в плоскости XY. При движении элемента со скоростью $\mathbf{v}(v_x, v_y)$ координаты контрольной точки и проекции ее скорости связаны соотношениями $dx / dt = v_x$ и $dy / dt = v_y$, которые можно рассматривать как математическую модель системы перемещения. Управляющим (входным) для этой системы является вектор $\mathbf{v}$, а выходным – вектор положения контрольной точки датчика.

Пусть задана кривая S, по которой в идеале должно происходить перемещение, а $\mathbf{v}$ имеет точки разрыва первого рода в моменты равенства нулю функции $F(x, y) = S(x, y)\,(\partial S / \partial x)(\partial S / \partial y)$. Это означает, что функция F обращается в ноль во всех точках кривой S и в точках равенства нулю частных производных $S_x = \partial S / \partial x$ и $S_y = \partial S / \partial y$. Обеспечим в области над траекторией S, где функция F отрицательна, возможность перемещения только вдоль оси X, а под траекторией, где F положительна, только вдоль оси Y. Функцию F можно рассматривать как функцию переключения. В этом случае контрольная точка, находящаяся над траекторией S, начав свое движение в начальный момент t_0, будет двигаться в направлении к кривой S только при выполнении условия $S(\partial S / \partial t) < 0$. Учитывая, что $\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}$, это условие можно за-

писать следующим образом: $Sv_x \frac{\partial S}{\partial x} < 0$. Аналогично точка, находящаяся в начальный момент под траекторией, будет приближаться к последней, если только выполняется неравенство $Sv_y \frac{\partial S}{\partial y} < 0$.

При выполнении названных условий точка из любого начального положения на плоскости XY будет двигаться по траектории, сопрягающейся с кривой S. В дальнейшем при смещении точки с этой кривой возникнет движение, возвращающее точку на S. Таким образом, после попадания на идеальную траекторию контролируемая точка сможет двигаться только вдоль нее, совершая при этом колебания с бесконечно малой амплитудой и бесконечно большой частотой. Этот режим называется идеальным скольжением. В реальном случае из-за инерционностей, запаздывания и других причин точка будет двигаться вдоль линии S, совершая колебания с конечными значениями названных параметров.

Управление $\mathbf{v}(v_x, v_y)$, позволяющее контрольной точке датчика начиная с некоторого момента $t_1 \geq t_0$ воспроизводить кривую в скользящем режиме, можно определить следующим образом:

$$v_x = \begin{cases} -|v_\perp(t_0)|\operatorname{sign}\left(\frac{\partial S}{\partial y}\right), & \text{если } S\frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y} > 0; \\ 0, & \text{если } S\frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y} < 0; \end{cases}$$

$$v_y = \begin{cases} +|v_\perp(t_0)|\operatorname{sign}\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right), & \text{если } S\frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y} < 0; \\ 0, & \text{если } S\frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y} > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Сущность предлагаемой модернизации метода оценочной функции в целях корректировки перемещения элементов антенны МДК в соответствии с текущими результатами диагностики рассмотрим на примере интерполятора, основными узлами которого являются *логическое переключающее устройство* (ЛПУ), вычислительное устройство и интеграторы каналов X и Y.

В теории автоматического управления известен метод вибрационной линеаризации, который, например, используется для улучшения параметров скользящего режима при интерполяции траекторий [8]. Для его реализации на вход логического переключающего устройства, реализующего управление (1), подают пилообразное воздействие $f(t)$ с частотой значительно более высокой, чем частота периодической составляющей $S(t)$. При этом на выходе ЛПУ по-прежнему будет действовать последовательность импульсов, но с частотой внешнего периодического воздействия. Такой режим воспроизведения траектории S называется вынужденным скольжением. Для адаптации траектории перемещения датчика к текущим результатам диагностики предлагается корректировать режим работы логического переключающего устройства сигналом, который является результатом интегрирования мгновенных интенсивностей электрошумовых процессов в изоляции диагностируемого высоковольтного оборудования. При технической реализации способа интегрируются короткие импульсы с амплитудой, равной текущим значениям интенсивности шума, которые формируются в результате стробирования соответствующих выходных сигналов антенны. Корректирующее воздействие $f(t)$ на входе логического переключающего устройства в общем случае будет также пилообразным, но с изменяющимся наклоном. Структурная схема адаптивного интерполятора, реализующего управление (1) при $v_x(t_0) = v_x(t_0) = v_0 = \text{const}$, представлена на рис. 1. В состав интерполятора входят: ЛПУ, реализуемое на двух переключающих элементах *1*, *7* и одном релейном

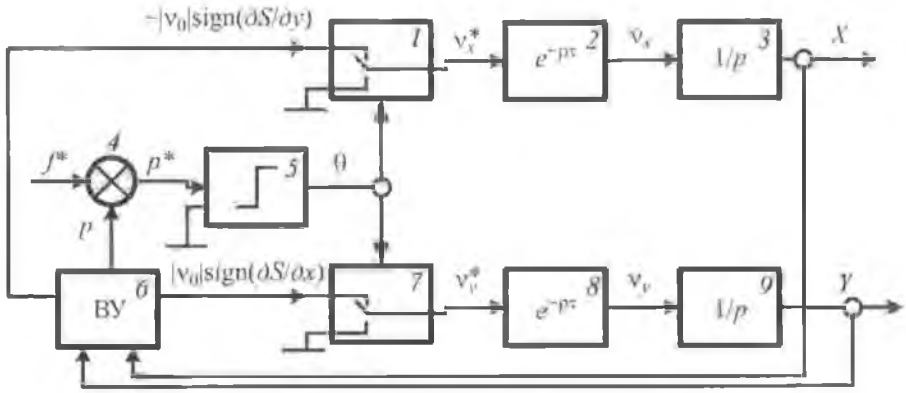

Рис. 1. Структурная схема адаптивного интерполятора

элементе *5*; звенья чистого запаздывания *2*, *8*; интеграторы каналов *X* и *Y* – *3*, *9*; сумматор *4*, а также вычислительное устройство *6*.

Определим условия, обеспечивающие режим перемещения элемента антенны, адаптированный к текущим результатам диагностики. Для этого воспользуемся методикой, предложенной в работе [9] при анализе вынужденного скользящего режима. Пусть интерполятор имеет запаздывание τ при переключении компонент вектора управления, а на входе ЛПУ действует сигнал $p^*(t) = p(t) + f^*(t)$, где $p(t) = S\,\mathrm{sign}\dfrac{\partial S}{\partial x}\dfrac{\partial S}{\partial y}$; $f^*(t) = f(t)\,\mathrm{sign}\dfrac{\partial S}{\partial x}\dfrac{\partial S}{\partial y}$; $f(t)$ – результат интегрирования текущих мгновенных значений выходного сигнала антенны. Система уравнений, соответствующая адаптивному интерполятору (см. рис. 1), имеет вид

$$\nu_x(t) = \nu_x^*(t-\tau); \quad \nu_y(t) = \nu_y^*(t-\tau);$$

$$\nu_x^* = F_x(\theta) = \begin{cases} -\nu_0\,\mathrm{sign}\left(\dfrac{\partial S}{\partial y}\right) & \text{при} \quad \theta = 1; \\ 0 & \text{при} \quad \theta = -1; \end{cases}$$

$$\nu_y^* = F_y(\theta) = \begin{cases} \nu_0\,\mathrm{sign}\left(\dfrac{\partial S}{\partial x}\right) & \text{при} \quad \theta = -1; \\ 0 & \text{при} \quad \theta = 1; \end{cases}$$

$$\theta = F(p^*) = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad p^* > 0; \\ -1 & \text{при} \quad p^* < 0; \end{cases} \quad p = S\,\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial S}{\partial y}.$$

Выходные сигналы нелинейных элементов ν_x^* и ν_y^* представляют собой последовательности импульсов, текущая частота которых ω определяется частотой стробирования выходного сигнала антенны и его уровнем в момент стробирования. Значение ω лежит за пределами высокочастотной области полосы пропускания исполнительных органов мехатронного комплекса, поэтому влиянием переменных составляющих сигналов ν_x^* и ν_y^* можно пренебречь. Интерполятор, таким образом, представляет собой замкнутую систему для текущих средних значений названных сигналов и разомкнутую для их высокочастотных составляющих. Для реальных значений контурной скорости перемещения элементов антенны текущие средние значения кинематических переменных ν_x^* и ν_y^* можно рассматривать как медленно изменяющиеся функции. Их значения, а также значение *S* на интервалах времени, включающих несколько последовательных стробирующих импульсов, будем считать постоянными. С учетом этих замечаний алгоритм работы адаптивного интерполятора поясняется диаграммами на рис. 2. Диаграмма пилообразной формы соответствует выходному сигналу интегратора, на вход которого подаются поочередно стробирующие импульсы с амплитудой, равной мгновенным значениям выходного сигнала антенны, и образцовое компенсирующее напряжение противоположной полярности постоянного уровня. Время интегрирования выходного напряжения датчика τ постоянно и равно длительности стробимпульса. Следовательно, значение коэффициента α определяется выходным напряжением датчика в момент стробирования. Средние текущие значения компонент скорости перемещения датчика можно определить как

$$\nu_{x\text{ср}}^* = -|\nu_0|(t_1/T)\,\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial y}; \quad \nu_{y\text{ср}}^* = |\nu_0|(t_2/T)\,\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial x}. \tag{2}$$

С учетом подобия треугольников на рис. 2 справедливы следующие соотношения:

$$\delta/\alpha T = (p+\delta)/t_1;$$

$$t_1 = \alpha T(1 + p/\delta); \quad t_2 = T(\beta + \alpha p/\delta),$$

где $\beta = 1 - \alpha$.

Таким образом, выражения (2) можно представить в виде

$$\nu_{x\text{ср}}^* = -\alpha|\nu_0|(1 + p/\delta)\,\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial y};$$

$$\nu_{y\text{ср}}^* = |\nu_0|(\beta + \alpha p/\delta)\,\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial x}.$$

Анализ последних формул показывает, что текущие средние значения сигналов ν_x^* и ν_y^* зависят

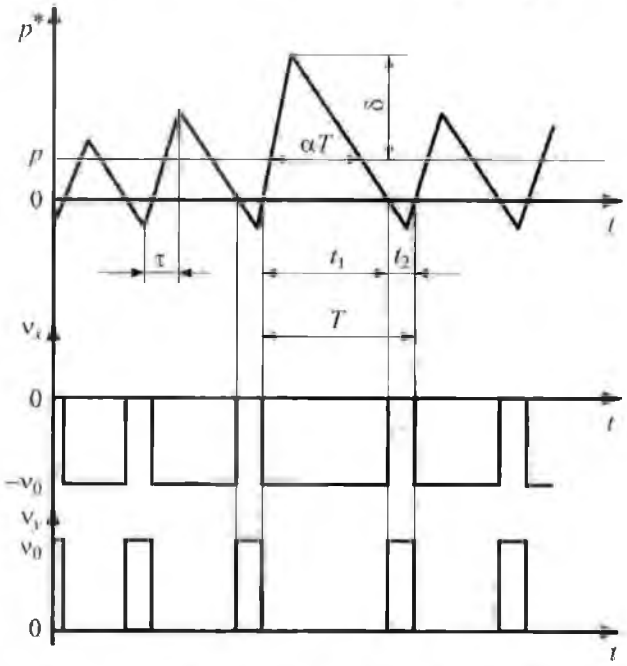

Рис. 2. Диаграммы работы адаптивного интерполятора

от величин $p = S\mathrm{sign}\frac{\partial S}{\partial x}$, α и β, т.е. предложенный способ позволяет не только реализовать эффект вибрационной линеаризации, но и адаптировать параметры движения элементов антенны к текущим значениям ее выходного сигнала, а, следовательно, к интенсивности электрошумовых процессов в диагностируемом оборудовании.

Рассмотренный алгоритм адаптации параметров движения антенны реализован системой управления мехатронного диагностического комплекса «ЭЛЕКТРО» с электродвигателями *L6234PD* на базе микроконтроллеров *MSP430F2274* (компании *TexasInstruments*) и *PSS*300 (фирмы *Pilz*). В настоящее время четыре образца комплекса эксплуатируются на подстанциях Федеральной сетевой компании и холдинга МРСК.

Библиографический список

1. **Шахнин В. А., Моногаров О. В., Чебрякова Ю. С.** Анализ динамических погрешностей датчиков для электрошумовой интродиагностики высоковольтного оборудования // Контроль. Диагностика. 2012. № 8. С. 27 – 31.
2. **Вдовико В. П.** Частичные разряды в диагностике высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука. 2007. 155 с.
3. **Meijer S., Gulski E., Smit J.** Pattern Analysis of Partial Discharges // IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation. 2008. V. 15. No 6. P. 830 – 842.
4. **Пат. 2434236 РФ, МПК G01R 31/12.** Способ диагностики высоковольтного оборудования / В. А. Шахнин, О. И. Моногаров Патенты и полезные модели. 2011. 32.
5. **Шахнин В. А.** Гибкие производственные модули неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 2008. № 2. С. 18 – 25.
6. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. 479 с.
7. **Юнусов Н. Ф., Ильин Г. И., Васильев И. И., Хохлов Ю. М.** Сравнительный анализ методов интерполяции линейных и круговых движений, применяемых на станках с фазовой СПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 40 – 45.
8. **Уткин В. И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации управления. М.: Наука. 1981. 368 с.
9. **Зотеев А. И.** Алгоритмы управления технологическим оборудованием с ЧПУ. Владимир: Изд-во ВлГУ. 1984. 111 с.

References

1. Shakhnin V. A., Monogarov O. V., Chebriakova Iu. S. (2012). Analysis of dynamic inaccuracy of sensors for the electrical-noise intradiagnostics of high-voltage equipment. *Kontrol'. Diagnostika*, (8), pp. 27 – 31.
2. Vdoviko V. P. (2007). *Partial discharges in the diagnostics of high-voltage equipment*. Novosibirsk: Nauka.
3. Meijer S., Gulski E., Smit J. (2008). Pattern analysis of partial discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation, 15*(6), pp. 830 – 842.
4. Shakhnin V. A. , Monogarov O. I. (2011). Method of diagnostics of high-voltage equipment. *Ru Patent No. 2434236*. Russian Federation.
5. Shakhnin V. A. (2008). Flexible production modules of non-destructive control. *Defektoskopiia*. (2), pp. 18 – 25.
6. Zenkevich S. L., Iushchenko A. S. (2004). *Fundamentals of management of manipulating robots*. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana.
7. Iunusov N. F., Il'in G. I., Vasil'ev I. I., Khokhlov Iu. M. (2005). Comparative analysis of methods of interpolation of linear and circular movements used on machines with phase system numeric control. *Mekhatronika, avtomatiza-tsiia, upravlenie*. (6). pp. 40 – 45.
8. Utkin V. I. (1981). *Sliding modes in problems of optimization of management*. Moscow: Nauka.
9. Zoteev A. I. (1984). *Algorithms for control of technological equipment with CNC*. Vladimir: Izdatel'stvo VIGU.

ПОЗДРАВЛЯЕМ !

90-летие Риммы Васильевны Васильевой

19 октября 2013 года исполнилось 90 лет со дня рождения известного ученого и специалиста в области разработки виброаппаратуры, кандидата технических наук, лауреата Премии Совета министров СССР Риммы Васильевны Васильевой.

Придя в Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения вскоре после окончания вуза, Римма Васильевна проработала в ЦНИИТМАШ *с 1948 года и по 1998 год, все время находясь в первых рядах исследователей вибрации лопаток турбин, гидратурбоагрегатов, принимая участие в разработке аппаратуры виброзащиты энергетического оборудования, создании виброакселерометров, а также инфранизкочастотных вибродатчиков.*

Итогом многолетних плодотворных исследований Риммы Васильевны и успешного применения полученных научных результатов стала гамма высокоэффективных средств измерения параметров вибрации, широко применяемых при контроле вибросостояния различных промышленных объектов.

Р.В. Васильева – автор 85 научных работ и восьми изобретений, защищенных авторскими свидетельствами.

От имени коллектива НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике, коллектива редакции журнала «Контроль. Диагностика», а также коллег и друзей сердечно поздравляем Римму Васильевну с юбилеем, желаем ей неразрушаемого здоровья, счастья и благополучия.