

неустойчивого динамического объекта типа перевернутый маятник синтезирована устойчивая нейросетевая система управления с оптимизацией переходного процесса.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

#### Литература

1. Strong mixed-integer programming formulations for trained neural networks / Ross Anderson [et al.] // *Mathematical Programming.* – 2020. – P. 1–37.

2. A unified view of piecewise linear neural network verification / Rudy Bunel [et al.] // *In Advances in Neural Information Processing Systems.* – 2018.

3. Feofilov, S. V. Synthesis of neural network controllers for objects with non-linearity of the constraint type / S. V. Feofilov, D. L. Khapkin // *Journal of Physics: Conference Series.* 11. Сер. "XI International Scientific and Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges, RIASIC 2020. – 2021. – P. 12–14.

4. Чернодуб, А. Н. Обзор методов нейроруавления / А. Н. Чернодуб, Д. А. Дзюба // *Проблемы программирования.* – 2011. – Вып. 2. – P. 79–94.

5. Goodfellow, I. *Deep Learning* / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MA: MIT Press, 2016.

УДК 621.3.07

### ТРЕХФАЗНЫЙ ТЕСТЕР ДЛЯ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Ворсин Н.Н., Маркевич К.М.

*Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Представлен цифровой измерительный комплект, предназначенный для организации лабораторного практикума по электротехнике. По способам включения в цепь и проведению измерений прибор аналогичен стандартным электротехническим комплектам, однако имеет существенно меньшие массогабаритные параметры, стоимость и обеспечивает лучшую разрешающую способность, свойственную цифровым приборам и дополнительные возможности измерений.

**Ключевые слова:** измерительный комплект, токовый трансформатор, микроконтроллер.

### THREE-PHASE TESTER FOR TRAINING LABORATORIES OF ELECTRICAL ENGINEERING

Vorsin N., Markevich K.

*Brest State Technical University  
Brest, Republic of Belarus*

**Abstract.** A digital measuring set is presented, designed for organizing a laboratory workshop in electrical engineering. In terms of the methods of inclusion in the circuit and measurements, the device is similar to standard electrical kits, however, it has significantly lower weight and size parameters, cost and provides better resolution inherent in digital instruments and additional measurement capabilities.

**Keywords:** measuring set, current transformer, microcontroller.

*Адрес для переписки: Ворсин Н.Н., ул. Гоголя, 80, кв. 7, Брест 224016, Республика Беларусь  
e-mail: vorsin@hotmail.com*

Организация лабораторного практикума по электротехнике требует большого количества измерительных приборов. В случае использования отдельных приборов (амперметров, вольтметров, ваттметров) [1] электрические цепи оказываются весьма громоздкими, а их сборка и отладка занимает очень много учебного времени, что далеко не всегда является положительным фактором. Для его преодоления довольно часто обращаются в противоположную крайность - все исключают из лабораторных работ сборку цепей и возможность видеть исследуемое устройство путем использования "лабораторных стендов". Изучаемое устройство или цепь является частью стенда или подключается к нему очень простым способом, а функция учащихся сводится к манипулированию ручками управле-

ния стенда и списыванию показаний его приборов. Очевидно, что дидактическая эффективность такого подхода не высока.

Еще одним способом обеспечения практикума измерительной аппаратурой является использование стандартных измерительных комплектов К50, К505, К540 и т.п. [2], которые почти полностью обеспечивают необходимые измерения, вырабатывают навыки обращения с реальной аппаратурой, оставляют достаточное место для сборки цепей и не «прячут» от учащихся изучаемые устройства. Измерения в трехфазных цепях обеспечивает штатное использование прибора, а для однофазных цепей измерительный комплект представляет собой три почти независимых однофазных измерителя, покрывающих потребности измерений для многих лабораторных работ.

Недостатками этого подхода является громоздкость и избыточность стандартных комплектов, высокая стоимость и несоответствие аналоговых комплектов современной, преимущественно цифровой, измерительной технике.

В качестве альтернативы стандартным комплектам специально для организации учебного практикума разработан цифровой трехфазный измерительный комплект с клеммами нулевого провода (по аналогии с К505). В отличие от прототипов данный прибор позволяет измерять как действующее значение переменного, так и постоянного и пульсирующего тока нулевого провода. Для измерений переменных линейных токов используются токовые трансформаторы, а измерение тока нулевого провода осуществляется с помощью шунта 0,05 Ом. Результаты измерений – действующие значения напряжения, тока и активной мощности в выбранной фазе или нулевом проводе отображаются на ЖК дисплее. Хорошая разрешающая способность цифрового индикатора и ограниченный в учебных лабораториях диапазон возможных значений измеряемых величин (250 В, 5 А, 500 Вт) позволили отказаться от переключателей пределов измерений. Единственным органом управления является кнопка выбора измеряемой фазы. Обозначение выбранной фазы также, как и порядок чередования фаз отображаются на дисплее.

Питание прибора может осуществляться от любого источника с действующим значением напряжения 40–240 В. Вилка питания может быть включена в обычную розетку 220 В или между генераторными клеммами самого прибора, если напряжение лабораторного источника находится в указанных пределах. Размеры прибора 100×125×200 мм, масса 0,8 кг.

Функционирование прибора основано на вычислении действующих значений напряжений и токов, а также активной мощности по отсчетам их мгновенных значений. Взятие отсчетов осуществляются с периодом 120 мкс. Постоянная времени накопления результатов составляет около 0,5 с (осреднение по 4096 отсчетам). В режимах измерений фазных величин происходит цифровая отфильтровка постоянных составляющих напряжений и токов с характеристическим временем 0,5 с, поэтому для стабилизации показаний после включения прибора или изменении постоянных составляющих требуется 2–3 с, что незаметно в практике измерений. В режиме измерения тока нулевого провода подавление постоянной составляющей отключается. В этом режиме измеряются действующие значения напряжения между клеммами А и 0, тока между клеммами 0 и 0' и активной мощности, проходящей в нагрузку, подключенную между клеммами А' и 0', причем ток может быть постоянным, переменным или пульсирующим.

Описанный измерительный алгоритм реализован на основе микроконтроллера PIC24F04KA201.

Весьма существенной является возможность цифровой калибровки тестера по приборам высокого класса точности. Калибровка является заключительной операцией изготовления прибора, но ее можно повторять в процессе эксплуатации. В ходе калибровки определяется ряд констант, которые записываются в программную память микроконтроллера и используются им в дальнейшем для вычислений результатов измерений. Такой прием позволяет исключить из прибора органы аналоговых регулировок и отказаться от прецизионных аналоговых элементов, что существенно удешевляет прибор при неплохих его метрологических параметрах.

Структура измерительного комплекта показана на рис. 1. В нем выделены три функциональных узла: модуль питания, модуль трансформаторов тока, электронный модуль.

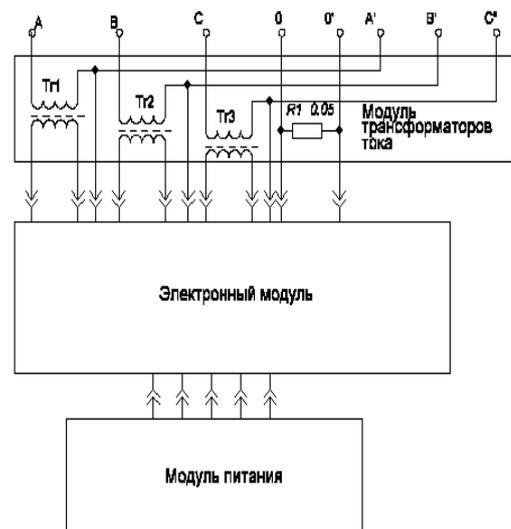


Рисунок 1 – Структура измерительного комплекта

Первичные катушки токовых трансформаторов соединяют между собой одноименные генераторные и нагрузочные клеммы. Напряжения вторичных катушек, которые пропорциональны производным по времени от линейных токов, далее интегрируются в электронном модуле, формируя пропорциональные токам напряжения.

Как видно из структурной схемы, по способам включения в измеряемую цепь, учебный комплект не отличается от стандартных и может заменять их без изменений методических параметров лабораторных работ. Некоторые дополнительные возможности появляются вследствие лучшей разрешающей способности цифровых измерителей: точнее определяется режим резонанса, коэффициент мощности в соответствующих лабораторных работах, улучшается совпадение измеренных ве-

личин с расчетными. Дополнительные возможности также вытекают из способности измерять ток нулевого провода и проводить измерения на постоянном и пульсирующем токе, что важно при изучении нелинейных цепей и устройств. Индикация результатов измерений на дисплее содержит обозначение размерностей, что весьма важно для учебных целей.

#### Литература

1. Общая электротехника: методические указания к лабораторному практикуму / В. А. Толмачев [и др.] – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 71 с.
2. Комплект измерительный К505. Техническое описание. ООО «Приборостроительная компания «Высоковольтные технологии». – г. Волгоград. – 2018.

УДК 621.382

### ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ОКИСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрено применение установки фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии для выявления дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковой пластины после операции туннельного окисления, выполненной в различных технологических режимах. Измерения в двух режимах (измерения контактной разности потенциалов и визуализации длины диффузии неравновесных носителей заряда) являются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

**Ключевые слова:** зондовая электрометрия, полупроводниковая пластина, окисел, дефект.

### CHARACTERISATION OF TUNNELING OXIDATION TECHNOLOGICAL PROCESS USING SCANNING PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUE

Zharin A.<sup>1</sup>, Petlitsky A.<sup>2</sup>, Pilipenko V.<sup>2</sup>, Tyavlovsky A.<sup>1</sup>, Tyavlovsky K.<sup>1</sup>, Gusev O.<sup>1</sup>, Vorobey R.<sup>1</sup>, Pantišaleyeu K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University  
<sup>2</sup>JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A photostimulated scanning probe electrometry device was applied for detecting defects in ion-doped and diffusion layers of a semiconductor wafer after the operation of tunnel oxidation performed in various technological modes. Two modes of measurement (contact potential difference measurements and visualisation of diffusion length of nonequilibrium charge carriers) are shown to be complementary allowing to detect different types of defects on the same wafer.

**Key words:** probe electrometry, semiconductor wafer, oxide, defect.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Характеризация дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковых пластин требует исключительно высокой поверхностной чувствительности метода контроля, что связано с малой толщиной (как правило, менее 1 мкм) таких слоев. Особый интерес представляет выполнение такой характеристики на различных стадиях технологического процесса для пластин с уже сформированными приборными структурами, что позволяет выполнить оценку качества и определить пути совершенствования самого технологического процесса. Используемый метод контроля должен обеспечивать визуализацию пространственного распределения электрофизических

параметров поверхности для анализа степени выраженности дефектов и их возможного источника. Методика измерений предпочтительно должна быть бесконтактной, обеспечивая возможность возвращения контролируемых пластин в технологический процесс.

Для решения этой задачи в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ был разработан комплекс методов и средств неразрушающей бесконтактной характеристики полупроводниковых пластин диаметром до 200 мм на основе методов зондовой электрометрии, основные элементы которого к настоящему времени внедрены на ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания