

УДК 53.072.13

В. К. Манукян,  
Московский физико-технический институт

## Применение программных приложений для моделирования физических процессов в радиотехнике и электронике в условиях дистанционного обучения

*Проводится анализ существующих программных приложений для создания прототипов электронных схем, который поможет оценить работу всей схемы по заданным параметрам. Основная цель – разработать систему, способную генерировать электронные схемы с доступными и простыми инструкциями по сборке, основанными на описании желаемых функций схемы. На основе приложения TAC (Trigger-Action-Circuits) и библиотеки компонентов Arduino разработаны проекты и инструкции по созданию и тестированию электронных схем. Проведен анализ возможностей и эффективности приложения для тестирования и разработки новых электронных схем с оценкой простоты интерфейса и пользовательских параметров, близких к реальным условиям. Использование приложения TAC дает возможность сгенерировать из списка компонентов несколько подходящих вариантов альтернативных схем. Результаты апробации программ показали, что использование приложения для создания прототипов микросхем значительно ускоряет процесс обучения и помогает устранению проблем, возникающих при их проектировании и сборке в сравнении с традиционными методами. Данные приложения могут быть адаптированы как для профессионального дизайна сложных электронных схем, так и для практических и творческих заданий для студентов технических вузов.*

### Прототипы электронных схем, схемотехника, микроэлектроника, виртуальные схемы

Интенсивное развитие микроэлектроники и большой спрос на нее в последнее десятилетие привели к расширению области применения и усилению микропроцессорных систем. Развитие данных систем обусловило создание различных методик и продуктов прототипирования, широко применяемых дизайнерами, производителями и исследователями во многих областях [1]. Одним из первых прототипов стала созданная в 1970-х гг. макетная беспаячная плата, которая благодаря простоте использования приобрела наибольшую популярность при прототипировании электронных схем как для производственных, так и для образовательных проектов. Известно [2], что, несмотря на доступность и простоту этих плат, сбой работы всей схемы может произойти из-за неправильного подключения проводов или компонентов, плохой пайки и пр. Кроме того, при моделировании повышения или усиления некоторых

функций цифровых электронных систем применение макетных плат становится нерациональным с точки зрения практичности, скорости устранения ошибок и наличия необходимых компонентов. Одним из вариантов решения данной проблемы становится разработка программного приложения, которое основывается на моделировании физической схемы в виртуальной реальности с подборкой параметров системы и устранением ошибок моделирования и совместного использования виртуальных схем. Например, с помощью программ Toastboard [3] или PSpice [4] можно нарисовать схемы на виртуальной макетной плате, которая в автоматическом режиме обнаружит типичные ошибки и предложит варианты их решения. Однако такие схемы создаются вручную и требуют постоянного обновления пользователем данных приложений, что тоже непрактично и занимает много времени.

Однако, несмотря на достижения в области разработки программ-прототипов, для моделирования микросхемных схем по-прежнему требуются обширные знания в теории электроники и физических характеристик компонентов.

В этой статье представлен анализ существующих программных приложений для создания прототипов электронных схем с оценкой эффективности и выбора оптимальных вариантов. На основе приложения Arduino были разработаны обучающие программы и инструкции по сборке электронных схем. Также представлен анализ возможностей данного приложения для тестирования и разработки новых электронных схем с оценкой простоты интерфейса и пользовательских параметров, близких к реальным условиям. Предложенные программные приложения могут быть адаптированы как под профессиональное использование для дизайна сложных электронных схем, так и в качестве практических и творческих заданий для студентов технических вузов в условиях дистанционного обучения.

**Особенности программ прототипирования электронных схем.** Аппаратно-программные средства Arduino относятся к популярным и широко распространенным платформам построения простых интегральных систем [5]. Программная часть нередко используется для написания программ, их компиляции и программирования аппаратной части. Обычно она представляет собой смонтированные печатные платы, поэтому средства Arduino наиболее часто применяются для создания программ моделирования микросхем в

производственных и обучающих проектах. Но даже в таком простом приложении пользователи часто сталкиваются с неправильным подбором и подключением компонентов, использованием неправильной логики и переменных [6]. Особенно это касается студентов и новичков, которые хотят освоить микроэлектронику. Так, для обеспечения простой и понятной абстракции в программном обеспечении при проектировании микросхем необходимо дополнить приложения Arduino новыми инструментами и компонентами [7].

Приложения Multimeter, Oscilloscope, Digilent Electronics Explorer, Toastboard применяются для отладки используемых макетных плат [8]. Например, в Toastboard используется макетная плата с вольтметрами для визуализации показаний напряжения на ней [9]. Кроме того, в него включены функции отладки системы, которые сопоставляют ошибки с шаблонами общих ошибок и предлагают необходимые решения. Однако это приложение не обнаруживает физические провода и компоненты в цепи.

Программное приложение Fritzing также применяется для виртуального моделирования электронных схем и оборудования на основе прототипов Arduino. При помощи этой программы можно преобразовать прототип в топологию печатной платы. Пример интерфейса приложения Fritzing показан на рис. 1 [10]. Программа также предусматривает широкую базу данных компонентов с различными характеристиками.

Как видно из рис. 1, Fritzing использует макетные платы Arduino различной конфигурации.

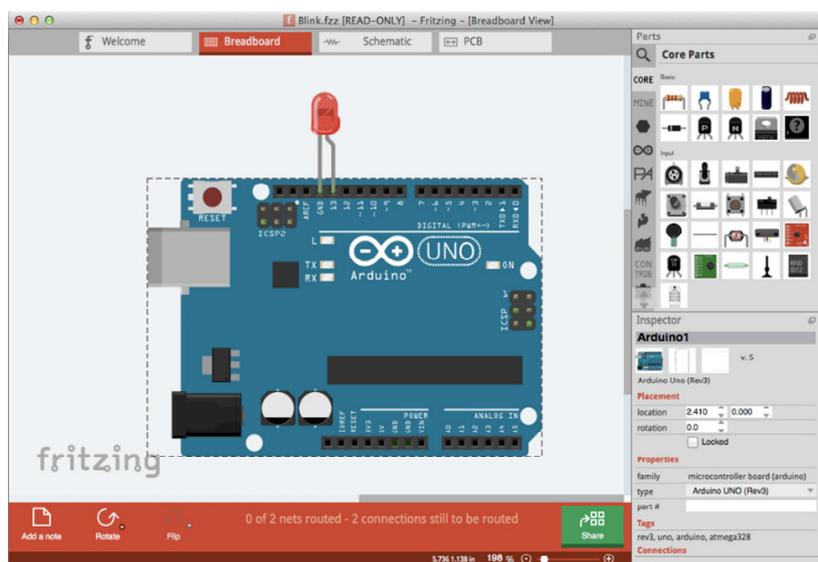


Рис. 1

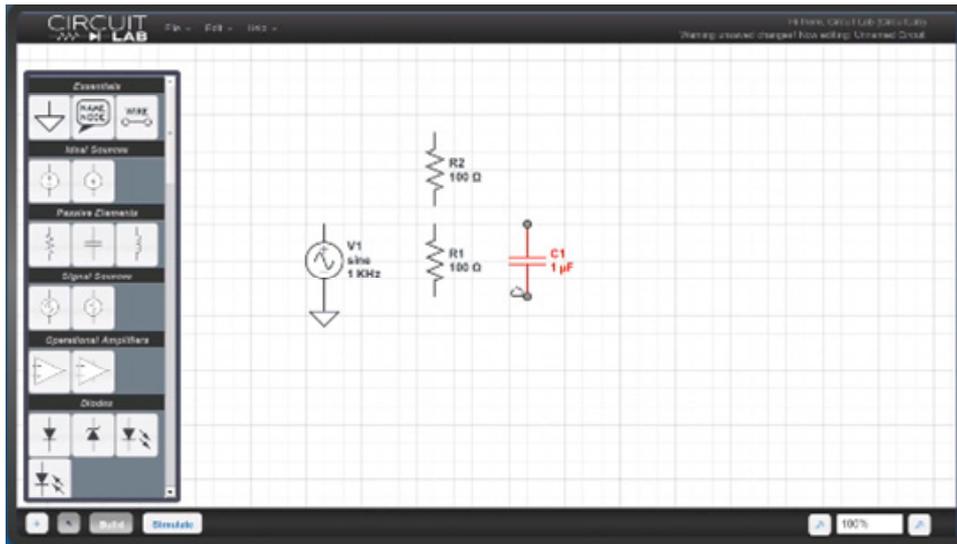


Рис. 2

Чтобы создать прототип схемы, достаточно выбрать из перечисленных компонентов необходимый и разместить на нужном месте платы, затем можно добавлять другие платы, создавать более сложные схемы. Как указывают производители, данное приложение просто в применении и позволяет использовать его в обучающем процессе и для выполнения собственных проектов. Однако, как и во многих коммерческих продуктах, добавление своих продуктов, пополнение библиотеки компонентов вызывает сложности при работе с Fritzing. Многие продукты и пакеты не бесплатные, что ограничивает доступ для большинства пользователей. Так, в [11] авторы на основе 4000 различных вариаций шаблонов автозаполнения разработали дополнительный пакет AutoFritz для прототипирования виртуальных схем, которые

также могут быть использованы в качестве учебного пособия и для работы над ошибками. Для сравнения состояния аппаратной части с прототипом, диагностирования возникающих проблем и анализа ошибок, возникающих в цепи, были разработаны программные продукты CircuitSense [12] и Bifrost [13]. Инструменты CircuitLab [14] и Autodesk Circuits [15] позволяют пользователям создавать виртуальные схемы с последующей проверкой посредством моделирования реальных условий (на рис. 2 представлен интерфейс программы CircuitLab для создания электронных цепей и проектирования электронных схем [14], а на рис. 3 – пример описания оборудования из библиотеки программы Autodesk Circuits [15]).

CircuitLab имеет достаточно простой и понятный пользователю интерфейс, а схематиче-

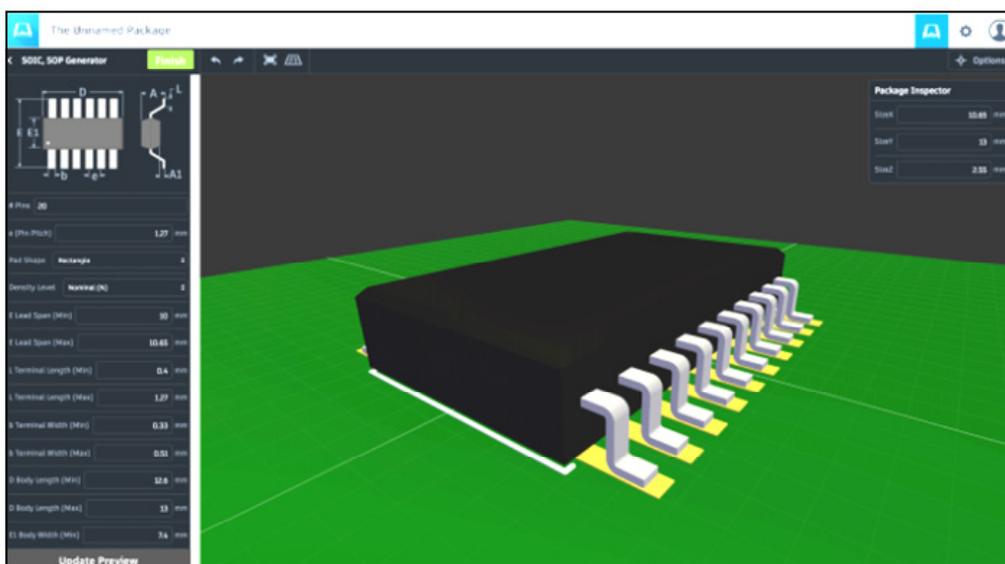


Рис. 3

ские обозначения упрощают решение практических заданий и проверку правильности соединений. Простая сборка и проверка работы цепи сделали данное приложение популярным в учебных целях, однако покупка лицензионного соглашения для использования учебного пакета выгодна непосредственно в учебном классе, но не для удаленных пользователей.

AutoDesk Circuits отличается от предыдущих программных продуктов тем, что использует трехмерные модели реальных компонентов от различных производителей (рис. 3) с описанием физических параметров. Его библиотека данных постоянно обновляется и достаточно широкий спектр оборудования позволяет моделировать реальные проекты, которые могут реализовываться в производстве. Эта программа пользуется большей популярностью у дизайнеров и разработчиков интегральных схем, инженеров робототехники и электроники.

Проект VISIR, основанный на создании удаленной лаборатории, позволяет подключать и тестировать электронные схемы на виртуальном рабочем месте (не в лаборатории) посредством копирования прототипов виртуальных схем [16].

Из вышеприведенного обзора различных программных приложений, разработанных для прототипирования электронных схем, следует, что для отлаженной работы и приближения виртуальных схем к реальным объектам при разработке программного пакета необходимо учитывать простоту интерфейса программы, большую библиотеку компонентов и шаблонов схем, макетные платы, классификацию шаблонных макетов по классу функционирования.

В качестве средства, позволяющего определять необходимые правила, цели и ограничения, при разработке программы применяется производительное проектирование, которое предоставляет необходимые инструменты для изменения дизайна [17] и дает возможность, используя вычислительные мощности, изучать различные альтернативы и оценивать большее количество студенческих проектов. Данный подход может быть использован в учебном процессе, обеспечивая платформу для введения ключевых концепций.

**Дизайн приложения для изучения микроэлектроники для студентов.** Основная цель подобного приложения состоит в том, чтобы разработать систему, способную генерировать электронные схемы, с доступной и простой инструкцией по сборке на основе описания желаемой функциональности схемы. Это можно осуществить при помощи производительного проектирования с триггерами (входами) и выходами, которое используется в приложении TAC [18]. Данная спецификация позволяет генерировать множество вариантов схем, используя заданный набор компонентов с предоставлением альтернатив, что позволяет наглядно оценить возможности и варианты решения поставленной задачи. С помощью предложенных схем-макетов пользователь может создать соответствующую схему, следуя инструкции по сборке. Такой подход дает студенту возможность выбора одного из вариантов сборки схемы и проверки ее производительности для реализации задачи, поставленной преподавателем. Макетные платы и библиотека компонентов базируются на Arduino.

**Алгоритм построения схемы.** В зависимости от поставленной задачи необходимо выбрать количество реализуемых компонентов, перемещая их из боковых панелей на рабочий экран

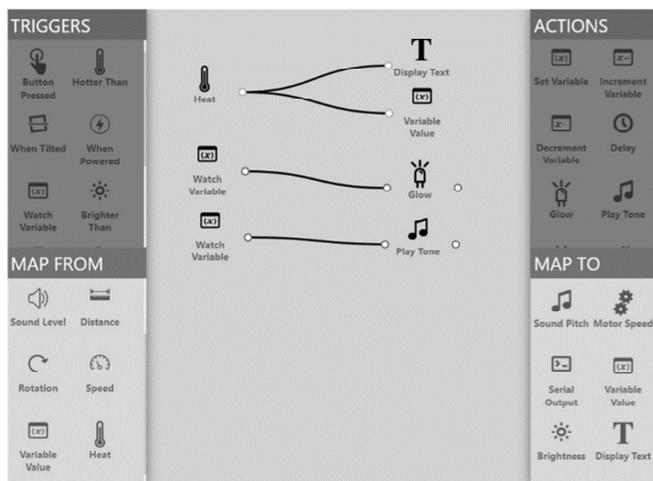


Рис. 4

(рис. 4). Пользовательский интерфейс разделен на пять панелей для каждой из задач, которые пользователь должен выполнить, чтобы построить свою схему.

При выборе схемы из диалогового окна (список схем) с оценкой мощности, места, занимаемого на плате, сложности схемы можно подобрать подходящий вариант для достижения поставленной цели. Таким образом, в автоматическом режиме система подбирает варианты компонентов из библиотеки Arduino, которые можно использовать. Это удобно и занимает немного времени по сравнению с приложениями, где пользователь сам ищет в списке название и характеристики каждого компонента. Кроме того, просчет параметров конструкции и вычисление мощности также требует времени и приводит к частым ошибкам, вследствие чего на выполнение задания может не хватить академической пары или иного предоставленного времени. При помощи подхода производительного проектирования эти проблемы решаются в режиме реального времени. Кроме того, при поиске вариантов можно использовать фильтры – например, установить один или несколько компонентов либо название платы. Все эти тонкости должны быть оговорены при составлении тестового или лабораторного задания. После изучения нескольких вариантов схем с помощью функции фильтрации список схем уменьшается, что значительно сокращает поиски необходимого варианта, который отсортировывается из необходимых компонентов – от простого к сложному.

Следующим шагом является сборка схемы на виртуальном рабочем столе (тестовое окно). Сборка начинается с обзора компонентов и их размещения на макетной плате (рис. 5) – при подведении курсора

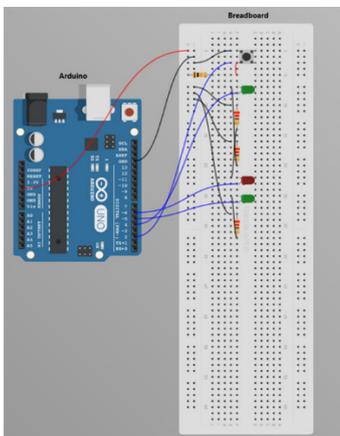


Рис. 5

к компоненту всплывают подсказки о его параметрах и свойствах, а также советы по сборке. Затем пользователь может совершать сборку и загружать код в Arduino для обеспечения обратной связи и последующей апробации собранной схемы.

Также в режиме теста можно выбрать варианты для модернизации схемы или подключения дополнительных компонентов (в режиме ручной настройки на макетной схеме), после чего опять-таки загрузить код и протестировать схему.

Адаптировать описанное программное обеспечение под учебный процесс несложно, поскольку использовать данное приложение для создания более сложных схем и моделирования проектов могут как новички, так и специалисты. Кроме того, руководство по сборке предоставляет студенту пошаговую инструкцию по подключению полученной схемы – одновременно происходит обучение техническим терминам и обозначениям в микроэлектронике. Данный подход не только помогает получать необходимые знания по электронике, но и может быть использован в качестве обучающего материала, если студент пропустил лекцию или не разобрался в изучаемом.

Для проверки эффективности программного приложения в качестве учебного пособия для дисциплины «Микроэлектроника» были разработаны 20 проектов в стартовом наборе Arduino с большим количеством схем, которые охватывают широкий спектр функций: создание и считывание цифровых и аналоговых сигналов, последовательности связи. Для создания библиотеки использовались различные электронные компоненты и для каждого прописывалось подробное руководство с учетом технологических характеристик от производителя и пр. Система тестировалась с помощью рабочей группы из 10 студентов. Ошибки регистрировались и учитывались в журнале с фиксацией времени начала и окончания обучения и сборки каждого проекта.

**Результаты апробации и обсуждение.** Результаты тестирования разработанных проектов показали, что с помощью приложения ТАС и библиотеки Arduino для обычной электрической цепи при выбранных параметрах для 4 компонентов и заданных напряжений было сгенерировано более 10 макетных схем (для большего количества компонентов число систем гораздо больше). Сгенерированные варианты решения имеют бо-

лее сложные схемы подключения по сравнению со схемами, собранными вручную по блок-схеме. Этим демонстрируется то, что с помощью приложения TAC можно спроектировать большое количество вариантов сборки, которые можно оценить по производительности и геометрическим параметрам. Сборка схемы и тестирование занимали от 15 мин до 3 ч в зависимости от сложности и набора компонентов. Все результаты времени сборки для каждого из вариантов макетов были внесены в программу и дополнены в инструкции приложения.

Для тестирования вариантов сборки, разработанных в приложении TAC, для студентов-участников была проведена вводная лекция о знакомстве с интерфейсом приложения и представлены правила сборки схемы с использованием Arduino. В рамках обучения были продемонстрированы все рабочие окна интерфейса и соответствующие инструкции по использованию приложения. Затем участникам было выдано тестовое задание для создания 5-компонентной системы с определенными параметрами, в котором были прописаны диапазоны потребляемой и выходной мощностей для данной схемы, которым собранная схема должна удовлетворять. На выполнение задания отводился 1 акад. ч (45 мин). Также были выданы компоненты (включая избыточные) и стартовый набор Arduino. Результаты тестирования показали, что все 10 участников справились с заданием в среднем за 38 мин. Более сложные задания увеличивали время выполнения, однако временные ограничения, указанные в инструкции, практически совпадали с реальными данными с погрешностью в 15 мин. Результаты моделирования новых проектов в качестве творческих заданий продемонстрировали, что уровень сложности и пути решения имели различные интересные подходы и решения.

В [19] для проектирования микроэлектромеханических систем авторы применили многокритериальный алгоритм поиска с генерацией и тестированием. Предлагаемый метод основывается на физическом моделировании в автоматическом режиме с оценкой эффективности дизайна, а также на выборе оптимальных вариантов по методу Парето. Результаты апробации показали, что использование данного подхода при проектировании дизайна системы дает более широкий спектр параметров и ограничений для нахождения оптимального решения и совершенствования дизайна.

**Использование мощных инструментов САЕ/CAD для создания сложных электронных схем [20].** Интеграция CAD-инструментов Synopsys и Altera в среду проектирования Mentor Graphics позволяет выполнять точное функциональное моделирование «соединитель–соединитель» двух или даже нескольких плат, включая эффекты размещения и компоновки. Согласно результатам моделирования установлено, что данный подход значительно сокращает время, необходимое для проектирования и его реализации.

В пособии для обучения управлению и схемам в силовой электронике [21] при построении и тестировании схем, в которых есть физический доступ к каждому узлу, авторы предлагают использовать модульную систему. Модульность конструкции платы и возможность конфигурирования соединений позволяет заменять только поврежденные модули. Каждый модуль можно настраивать, что позволяет студентам исследовать проекты с различными топологиями и значениями компонентов; помимо прочего возможен компромисс между пропускной способностью, мощностью и точностью. Данный подход также может применяться при дальнейшем усовершенствовании программы для других областей электроники и радиотехники.

К ограничениям указанной модульной системы относится использование схем на базе Arduino, что не всегда удобно и практично с точки зрения подбора компонентов и плат. Также необходимы дополнительные исследования для изучения эффективности всех возможных вариантов схем и продуктивного проектирования для профессиональных разработчиков. Например, продуктивный подход к проектированию схем мог бы позволить участникам проекта легко обмениваться эквивалентными схемами, а также проектами в различных формах (для сообщества) и обеспечивать быстрое прототипирование с доступными деталями.

В настоящей статье приведено описание особенностей популярных программных приложений для разработки и дизайна прототипов электронных схем. Установлено, что для отлаженной работы и приближения виртуальных схем к реальным объектам при разработке программного пакета необходимо учитывать простоту интерфейса программы, использование большой библиотеки компонентов и шаблонов схем, макетные платы, классификацию шаблонных макетов по

функционированию. Проведен анализ функциональности системы генерирования электронных схем на основе ТАС с простой и полной инструкцией по сборке на основе описания желаемой функциональности схемы. Апробация демонстрирует простоту и доступность интерфейса, а также ускорение процесса обучения и сборки электронной схемы согласно виртуальному прототипу. Показано, что использование приложения ТАС и про-

дуктивное проектирование помогают решить большинство проблем, возникающих при проектировании и сборке схем в сравнении с традиционными методами. Данные приложения могут быть адаптированы как под профессиональное использование для дизайна сложных электронных схем, так и в качестве практических и творческих заданий для студентов технических вузов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tietze U., Schenk C., Gamm E. *Electronic circuits: handbook for design and application*. Cham: Springer, P. 2015–1543.
2. CurveBoards: integrating breadboards into physical objects to prototype function in the context of form / J. Zhu, L. G. Blumberg, Y. Zhu, M. Nisser, E. L. Carlson, X. Wen, K. Shum, J. A. Quaye, S. Mueller // Proc. of the 2020 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. Honolulu, USA, 2020. P. 1–13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376617> (дата обращения 15.10.2020).
3. The toastboard: Ubiquitous instrumentation and automated checking of breadboarded circuits / D. Drew, J. L. Newcomb, W. McGrath, F. Maksimovic, D. Mellis, B. Hartmann // Proc. of the 29<sup>th</sup> Annual Symp. on User Interface Software and Technology (UIST '16). New York, NY, USA: ACM, 2016. P. 677–686.
4. Ramshaw R., Schuurman D. *PSPICE Simulation of power electronics circuits* / London: Chapman & Hall, 1997.
5. Brühlmann T. *Arduino: Praxiseinstieg*. München: Hüthig Jehle Rehm, 2010.
6. Crossed wires: Investigating the problems of end-user developers in a physical computing task / T. Booth, S. Stumpf, J. Bird, S. Jones // Proc. of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. USA, San Jose California, 2016. P. 3485–3497.
7. Khandpur R. S. *Printed circuit boards: design, fabrication, assembly and testing*. New York: Tata McGraw-Hill Education, 2005.
8. Ventura J., Drake R., McGrory J. NI ELVIS has entered the lab [educational laboratory virtual instrumentation suite] // Proc. of IEEE Southeast Conf. IEEE, Ft. Lauderdale. USA, FL, 2005. P. 670–679.
9. Hartmann B. A Research Agenda for Academic Makerspaces ISAM // Proc. of the 1st Intern. Symp. on Academic Makerspaces. USA, Massachusetts, HEMI, 2016. P. 32–35.
10. Fritzing. Official website. URL: <https://fritzing.org/> (дата обращения 29.10.2020).
11. AutoFritz: Autocomplete for prototyping virtual breadboard circuits / J. Y. Lo, D. Y. Huang, T. S. Kuo, C. K. Sun, J. Gong, T. Seyed, X. D. Yang, B. Y. Chen // Proc. of the 2019 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems. Glasgow Scotland, UK, 2019. P. 1–13.
12. CircuitSense: Automatic sensing of physical circuits and generation of virtual circuits to support software tools / T. Y. Wu, B. Wang, J. Y. Lee, H. P. Shen, Y. C. Wu, Y. A. Chen, P. S. Ku, M. W. Hsu, Y. C. Lin, M. Y. Chen // Proc. of the 30<sup>th</sup> Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. Québec City, Canada, 2017. P. 311–319.
13. Bifröst: Visualizing and checking behavior of embedded systems across hardware and software / W. McGrath, D. Drew, J. Warner, M. Kazemitabaar, M. Karchemsky, D. Mellis, B. Hartmann // Proc. of the 30<sup>th</sup> Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology, Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 2017. P. 299–310.
14. Circuit Lab. Official website. URL: <https://www.circuitlab.com/> (дата обращения 29.10.2020).
15. Library I. O. Official website. URL: <https://library.io/> (дата обращения 29.10.2020).
16. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard / M. Tawfik, E. Sancristobal, S. Martin, R. Gil, G. Diaz, A. Colmenar, J. Peire, M. Castro, K. Nilsson, J. Zackrisson, L. Håkansson, I. Gustavsson // IEEE Transactions on learning technologies. 2012. Vol. 6, № 1. P. 60–72.
17. Computer-based design synthesis research: an overview / A. Chakrabarti, K. Shea, R. Stone, J. Cagan, M. Campbell, N. V. Hernandez, K. L. Wood // J. of Computing and Information Science in Engineering. 2011. Vol. 11, № 2. P. 021003.
18. Anderson F., Grossman T., Fitzmaurice G. Trigger-action-circuits: Leveraging generative design to enable novices to design and build circuitry // Proc. of the 30<sup>th</sup> Annual ACM Symp. on User Interface Software and Technology. 2017. P. 331–342.
19. Bolognini F. An integrated simulation-based generative design method for microelectromechanical systems. Doctoral dissertation. Cambridge: University of Cambridge, 2009.
20. Virtual prototype method used in design of electronic circuitry for CDF / B. Ashmanskas, M. Bogdan, H. Frisch, T. Liu, H. Sanders, M. Shochet // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. Vol. 518, № 1–2. P. 491–492.

21. A hands-on approach to advanced undergraduate instruction in control and circuitry in power electronics / A. T. Avestruz, C. Wilson, R. W. Cox, S. Campbell, S. B. Leeb // Proc. of the Power Electronics Education

Workshop. 2007. P. 1–8. URL: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/137655/2/PEEW-032007.pdf> (дата обращения 29.10.2020).

---

V. K. Manukyan

*Moscow Institute of Physics and Technology*

## SOFTWARE APPLICATIONS IN MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN RADIO ENGINEERING AND ELECTRONICS IN THE CONTEXT OF DISTANCE LEARNING

*Software applications to create electronic circuits, which will help to evaluate the entire circuit according to the specified parameters. The main goal is to develop system, that will be capable of generating electronic circuits with accessible and simple assembly instructions based on the description of the desired circuit functions. Based on TAC applications and the Arduino library, projects and instructions for creating and testing electronic circuits were developed. The analysis of the capabilities and efficiency of the application for testing and developing new electronic circuits with an assessment of the simplicity of the interface and user parameters close to real conditions. Using the TAC application makes it possible to generate several alternate schematics that may fit from the list of components. The results of program approbation showed that using the application for creating prototypes of microcircuits significantly speeds up the learning process and helps to use circuits than using methods. These applications can be adapted for professional use for the computer schemes of technical universities as practical and creative tasks.*

**Electronic circuit prototypes, circuits engineering, microelectronics, virtual circuits**

---

УДК 621.793.18:536.2.083 537.877

В. А. Павлов, В. И. Шаповалов, Д. С. Шестаков,  
А. В. Кочин, А. В. Рудаков, А. Е. Шабалин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Сокращение продолжительности наблюдения за кинетикой нагревания подложки при магнетронном распылении медной мишени

*Исследованы тепловые процессы кинетики нагревания и остывания подложки при магнетронном распылении медной мишени. Для изучения кинетики тепловых процессов на подложках использован терморезистивный датчик с чувствительным элементом в виде медного диска. Установлено, что кинетическая зависимость нагревания носит экспоненциальный характер. Для сокращения продолжительности наблюдения за этим процессом может применяться метод экстраполяции кинетической зависимости в область стационарного состояния. В качестве критерия выбора сокращенного интервала наблюдений использована относительная погрешность экстраполяции. Предложена методика сокращения продолжительности эксперимента. Она носит универсальный характер для установок, схожих по своему типу и устройству с той, которая была использована в данном исследовании. Для ее применения в каждом практическом случае необходимо выполнить один продолжительный эксперимент, в котором процесс нагревания подложки достигает стационарного состояния.*

**Магнетрон, мишень, подложка, распыление, тепловой процесс**

Нагревание подложки при осаждении металлической пленки методом магнетронного распыления является самостоятельной физической за-

дачей. Внимание к ней обусловлено влиянием температуры подложки на кристаллическую структуру, химический состав и, в конечном ито-