В. Б. Венславский

ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ И ШКОЛЬНИКОВ ЭЛЕМЕНТАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Обсуждается технология учебного проектирования электронных устройств. Переход от линейных моделей элементов цепи к математическим моделям электронных систем предлагается выполнять на основе графического представления структурных законов Кирхгофа методом «опрокинутой характеристики».

Ключевые слова: моделирование; линейная система; закон Кирхгофа; метод опрокинутой характеристики; математическая модель; графическая форма модели; падающая характеристика; информационная модель; эквивалентная схема; электронное устройство.

V. Venslavsky

TEACHING ELEMENTS OF DESIGNING ELECTRONIC DEVICES TO STUDENTS AND PUPILS

The educational designing technology of electronic devices is discussed. The transition from the linear models of the network elements to the electronic system simulator is suggested to be made on the basis of the pictorial representation of Kirchhof's structural laws by means of "flip - chip characteristic" method.

Keywords: modeling, linear system, Kirchhof's law, flip-chip characteristic method, mathematical model, pictorial form of the model, decreasing charakteric, information model, equivalent circuit, electronic device.

Перспективные высокие технологии будущего предполагают использование и проектирование новых инновационных технических средств на основе *электронных устройств* (ЭУ). От компетентности педагога в современных ус-

ловиях перехода на профильное обучение школьников зависит направленность подготовки будущих кадров, способных проектировать ЭУ и работать с новой техникой на более высоком уровне технической и технологической культуры. Подготовленность студентов — будущих учителей физики и технологии работать в условиях профильного обучения по направлению «Электротехника / радиоэлектроника» напрямую связана с освоением *технологий учебного проектирования* ЭУ, включая *педагогическое проектирование* дидактических единиц [3, с. 118; 186]. Изыскание содержательных и организационных инновационных решений, направленных на подготовку студента — будущего учителя физики и учителя технологии к работе в условиях профильного обучения старшеклассников электронике, является предметом настоящего обсуждения.

Учебное проектирование ЭУ как учебная технология позволяет реализовать активные формы учебного процесса в педвузе, готовить студента — будущего учителя к участию в модернизации старшего звена общеобразовательной школы, охватывающего существенные структурные, организационные и содержательные изменения. Переход на профильное обучение предполагает начальное профессиональное образование, ориентированное на интересы творческой личности, на овладение исследовательской деятельностью, на получение опыта участия в учебных проектах. Учитель физики и учитель технологии предстаёт в новом качестве технолога и участника учебной проектной деятельности. Опыт проектной деятельности школьника в дальнейшем будет востребован в высшем и послевузовском образовании, в достижении успеха в производственной сфере. Для подготовки кадров, способных в будущем осваивать и создавать новую технику, целесообразно, на наш взгляд, осуществлять подготовку будущих учителей физики и технологии к организации проектной деятельности в области электроники. Освоение студентами технологий проектирования ЭУ нами рассматриваются в контексте параллельного *освоения технологии педагогического проектирования конструктов дидактических единиц* [4, с. 19]. Процесс проектирования опирается на применение проектных процедур: теоретическое исследование темы учебного задания, математическое и имитационное моделирование, анализ и синтез, оптимизацию, конструирование, макетирование и испытание образца *изделия*, презентацию и защиту проекта. Учебное проектирование изделия в современной системе образования приобретает статус социокультурного явления и для педагога является мощным инструментом педагогической деятельности [2, с. 18]. Наиболее значимой особенностью проектной деятельности (по О. С. Газману) является *автодидактизм*, когда параллельно с созданием проекта (например, простейшего ЭУ) происходит освоение соответствующих компетенций, повышение профессионального уровня участников проекта. Конечный результат большинства *учебных проектов* (как и в производственной сфере [1]) складывается из проектной документации и образца изделия, полученных в результате выполнения этапов *учебно-исследовательской работы* (УИР) и *учебно-конструкторской работы* (УКР). Параллельным продуктом учебных проектов в педвузе является предметная и профессиональная компетентность будущего учителя.

На первом этапе выполнения УИР осуществляется *предварительное учебное проектирование* ЭУ, результатом которого является подготовка *технического предложения* и согласование *учебного технического задания* (ТЗ) на целенаправленное и регламентированное по времени выполнение этапов УИР и УКР.

Выполнение второго этапа УИР связано с *эскизным учебным проектированием* ЭУ, результат которого представляет собой создание *эскизного проекта*, включающего *изыскание системотехнического и схемотехнического решений*, их оптимизации доступными методами:

• результат *системотехнического проектирования* — это информационные визуально-знаковые модели: структурная схема, функциональная схема;

• результат *схемотехнического проектирования* — это математические модели: таблицы данных, графики характеристик и системы уравнений (характеристик как взаимосвязи основных параметров), это информационные визуально-знаковые модели — *схемы замещения* и *принципиальные схемы*;

В учебных технических проектах третий этап связан с выполнением УКР — осуществляется *техническое учебное проектирование*, при котором прорабатываются конструкторские решения чертежей всех типов, включая трассировку и размещение комплектующих элементов. Результат *технического учебного проектирования* — создание *технического проекта*, который содержит конструкторскую техническую документацию на выпуск изделий и макет изготовленного образца изделия с учётом «наладки».

Четвёртый этап учебного проектирования (характерное педагогической профессиональной подготовке) — это *педагогическое проектирование дидактических единиц* учебного процесса заданного уровня. Результатом *педагогического проектирования* является разработка элементов *учебно-методических комплексов* (УМК). Заключительный этап учебного проекта для будущего педагога связано с оценкой внедрения УМК (изделия) в учебный процесс и с анализом результата учебного эксперимента. Завершением учебного проекта является его защита.

Изделием в образовательной сфере можно считать любой объект учебного назначения как элемент УМК, подлежащий учебному исследованию или изготовлению в процессе обучения. К структуре и наиболее значимым элементам УМК можно отнести:

— сборники нормативных материалов как *технические условия* на педагогическое проектирование «примерных» учебных планов;

— авторские учебные планы и программы как модели учебного процесса;

— учебные пособия как модели содержательной составляющей, учебно-методические пособия как модели деятельной составляющей и другие дидактические материалы обучения и контроля;

— демонстрационные и лабораторные технические средства учебного назначения;

— *цифровые образовательные ресурсы* (ЦОР) — программные средства учебного назначения, включая моделирующие программы и системы сквозного автоматизированного проектирования ЭУ.

Тематические УМК и их компоненты, на наш взгляд, можно рассматривать как средство и как предмет обучения: предмет *учебного педагогического проектирования* интеллектуального изделия в педагогическом вузе, средство технологичного освоения предметных и профессиональных компетенций.

Решение задач учебного проектирования ЭУ основывается на применении системного подхода — объект по усмотрению участника проектного изыскания может быть представлен:

• либо «чёрным ящиком» с заданным функционалом как элемент более крупной системы;

• либо «прозрачным ящиком» — системой, состоящей из взаимосвязанной структуры более мелких элементов (комплектующих изделий).

Проектная деятельность на этапе изыскания схемотехнического решения подразумевает овладение проектной процедурой моделирования, включающей синтез, анализ и оптимизацию ЭУ. Проектная процедура моделирования — творческий процесс создания или выбора модели. Результатом выполнения процедур учебного проектирования являются создание оптимального или приемлемого *проектного решения.* Создание *схемотехнического проектного решения* — изыскание информационных математических и визуально-знаковых моделей прототипа изделия по заданным свойствам, ограничениям учебного ТЗ и нормативным условиям. *Процедура синтеза схемы ЭУ* — изыскание структуры визуально-знаковой модели (или моделей) электронной системы объединением моделей дискретных элементов как подсистем. *Процедура анализа схемы ЭУ* — разбиение визуально-знаковой модели на подсистемы и нахождение параметров подсистем в заданном режиме. Проектные процедуры состоят из множества проектных операций, связанных с методами моделирования объектов: с решением уравнений, с построением графиков, с аппроксимацией, с идеализацией. Современные технические средства позволяют осуществлять «моделинг» — имитационное моделирование с помощью компьютерных программных средств. Применение программных средств учебного назначения и учебная разработка простейших авторских моделирующих программ приобретает всё большую значимость в предметной и профессиональной подготовке будущего учителя — технолога и участника педагогического процесса.

Компонентные и системные модели. Для осуществления процедур анализа и синтеза ЭУ могут быть использованы инвариантные способы задания моделей изделия: *в описательной форме* (на естественном языке коммуникаций), в *математической форме (*на формальных языках: в *табличной, графической* и *аналитической форме)* и в *визуально-знаковой форме,* с использованием *условных графических обозначений* (УГО) дискретных элементов. Учебное проектирование ЭУ подразумевает знание *компонентных моделей* элементной базы и законы построения *системных математических моделей* для простейших цепей, состоящих из источников и приёмников, — это структурные топологические законы Кирхгофа. Поскольку учащиеся старших классов ещё не знакомы с математическими методами анализа во временной или частотной области, то весьма важно при подготовке студентов педвуза ориентироваться на построение *линейных моделей*, используя простые графические методы. Речь идёт о технологии перехода от *компонентного представления вольт-амперных характеристик* (ВАХ) или производных от ВАХ моделей резистивных устройств к *математическим моделям цепей как целостным системам*, представленным на вольт-амперной плоскости. Традиционно для анализа электрической цепи-контура применяется аналитическая форма системы «цепных» уравнений Кирхгофа. Графическая форма представления простых систем (состоящих из источника и одного или двух приёмников) на практике применяется для расчёта цепей смещения транзисторов и диодов, имеющих нелинейные ВАХ. Координаты пересечения графиков компонентных характеристик в системе являются точ-

ным решением в оценке режима. Принято говорить о *режиме по постоянному току* при условии баланса мгновенных мощностей источника и приёмника в замкнутой цепи.

В реальном эксперименте проявляется нелинейность компонентных характеристик: отклонение от закона Ома при нагревании резистора, нелинейность генераторного участка ВАХ гальванического элемента или фотодиода в режиме генерации при заданном световом потоке (рис. 1).

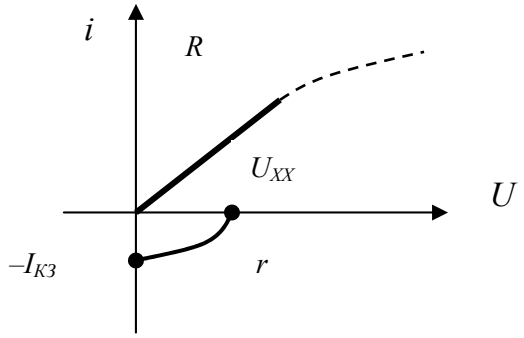


Рис. 1. Компонентные модели приёмника и источника

На основе ВАХ строятся компонентные модели в графической и аналитической форме. Компонентное алгебраическое уравнение элемента цепи — математическая модель, которая получается как результат творческого акта, выбор человека из множества графических вариантов: варианта модели нагрузки, варианта модели *источника задающего напряжения* (ИЗН) или модели *источника задающего тока* (ИЗТ).

Простейшие резистивные элементы цепи принято описывать терминами линейного моделирования:

— *R-элемент* — линейная модель резистора, описывается законом Ома;

— *E-элемент* — идеальная модель ИЗН, «внутреннее сопротивление» $r = 0$;

— *I-элемент* — идеальная модель ИЗТ, «внутреннее сопротивление» $r = \infty$;

— *r-элемент* — линейная модель ИЗН / ИЗТ («внутреннее сопротивление» принято считать $r = U_{XX} / I_{КЗ}$) или модели касательных в точке *напряжения холостого хода* U_{XX} и в точке *короткого замыкания* ($-I_{КЗ}$).

Применение линейных моделей позволяет с определённой степенью точности описывать и прогнозировать *свойства целостных линейных систем*, осуществлять *дуальные преобразования модели «контура» в «узловую пару»* и наоборот. Принципиальная схема и схема замещения цепи — визуально-знаковые модели (графическое изображение схемы) цепи в виде соединения в различные структуры *R-элементов*, *XX-элементов* ($R = \infty$), *КЗ-элементов* ($R = 0$), *C-элементов*, *L-элементов*, *r-элементов* (или *E-элементов* и *I-элементов*). Список реальных дискретных приборов, применяемых в электронике, значительно шире, а выбор моделей часто сводится к линейному приближению для рабочих участков ВАХ.

Специфику процедуры схемотехнического анализа цепей целесообразнее (с точки зрения понимания) осваивать на линейных визуально-знаковых моделях, строить модель системы, состоящую из *R-элемента* и линейного ИЗН / ИЗТ — *r-элемента*. Эта специфика связана с применением «правила знаков»

для анализа двух режимов источников — гальванических аккумуляторов и фотодиодов:

• *в режиме генерации* ВАХ или модели изображаются в IV (или II) квадранте;

• *в режиме регенерации* (зарядки) ВАХ или модели — в I (или III) квадранте.

На схемах «правилами знаков» принято изображать отсчёты силы тока и напряжения в направлении минусов согласованно включенных по полярности вольтметров и амперметров (встречаются и другие подходы). На источниках в режиме генерации правилами знаков принят *встречный отсчёт силы тока и напряжения*, на пассивных резистивных элементах — *согласный*. При соединении источника и приёмника в цепь (в систему «источник—приёмник») устанавливается режим по постоянному току. На графическом изображении математической *модели системы* можно прогнозировать появление точки пересечения графиков, которая характеризует режим по постоянному току. На основе представленного примера на рис. 1 можно предположить вариант построения модели электронной системы за счёт преобразования ВАХ источника в режиме генерации из IV в I квадрант. Изображение ВАХ источника в режиме генерации в I квадранте является искусственным приёмом (методом) и требует подробных обоснований, рассчитанных на восприятие школьника.

Как следствие правила знаков, на источнике в режиме генерации — отрицательная мгновенная мощность, на пассивной нагрузке — положительная. В системе «генератор—нагрузка», которая описывается по законам Кирхгофа, выполняется условие баланса мощностей:

$$iu_г + iu_н = 0, \text{ где для генератора } iu_г < 0,$$

отсюда следует: $-|iu_г| + iu_н = 0.$

Для представления ВАХ источника в режиме генерации в I квадранте также используется операция |ВАХ|, что приводит к появлению «*падающей характеристики*», свойственной только генераторным системам. В замкнутой цепи как в целостной системе «источник—приёмник» проявляется свойство *отрицательной резистивности* генератора, на что указывает тангенс наклона касательных после «опрокидывания характеристики» из IV в I квадрант. С нашей точки зрения, следует заметить, что «*опрокинутая характеристика*» (термин используется в учебной литературе) — уже не ВАХ, а её модуль — *внешняя характеристика генератора* (ВХГ). Графическое представление ИЗН / ИЗТ в режиме генерации в I квадранте «подающей характеристикой» позволяет анализировать математические модели систем в наглядной графической форме. Метод графического анализа модели целостной системы «источник—приёмник» получил название *метод опрокинутой характеристики*. Метод основан на построении графической модели электронной системы и нахождении точки пересечения компонентных характеристик, определяющей режим по постоянному току на рабочем элементе. Метод опрокинутой характеристики — метод Кирхгофа в графической форме (это утверждение будет ниже подтверждено). Возможность с достаточно хорошей степенью приближения описать компоненты цепи линейными моделями позволяет считать модель целостной системы также линейной. Одно из наиболее важных свойств целостности линейной системы — это проявление дуализма моделей схем замещения «*контура*» и «*узловой пары*»

и их математических моделей. Метод опрокинутой характеристики — ключ к востребованной практикой учебной технологии проектирования ЭУ. Мы считаем, что применение не только аналитической, но и графической формы записи *математических моделей электронных систем* значительно расширяет возможности учителя в достижении учебных целей. Элементарный анализ математической модели электронной системы в форме системы графиков *методом опрокинутой характеристики* открывает перспективу инновационных учебных технологий в условиях профильного обучения. На линейных моделях удаётся раскрыть целостные свойства различных систем, прогнозировать режимы в разных условиях.

Рассмотрим технологию построения модели цепи-системы «*r-элемент* — *R-элемент*» (рис. 2):

1. От генераторного участка ВАХ источника в IV квадранте перейдём к линейной модели, по U_{XX} и ($-I_{КЗ}$) построим график *r-элемента* (пунктир).

2. Для графика *r-элемента* применим операцию mod — «опрокинем» в I квадрант (по стрелке).

3. Именуем «опрокинутый» график — ВХГ.

4. Построим модель *R-элемента* и из точки пересечения опустим перпендикуляры на оси для оценки *режима* (силы тока и напряжения).

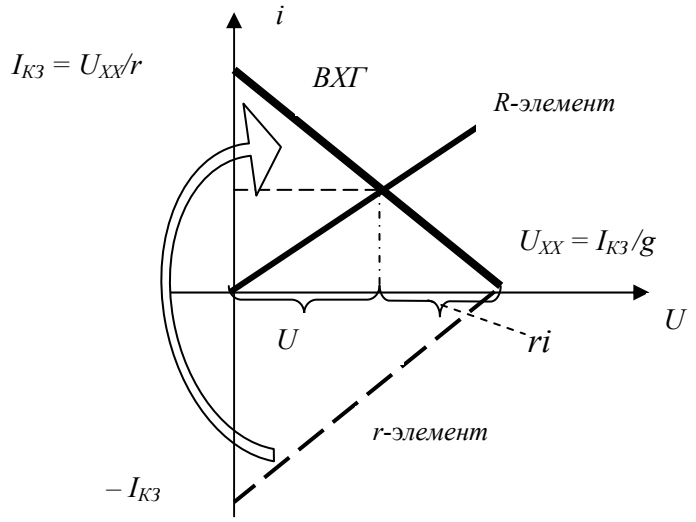


Рис. 2. Математическая модель системы

Потери в источнике электропитания (*ri*) указывают на его резистивность, а падающий график ВХГ — на режим генерации (мгновенная мощность меньше нуля). При переходе от реальных характеристик гальванических аккумуляторов к линейным моделям ИЗН / ИЗТ, как правило, используется не U_{XX} и $I_{КЗ}$ (как для солнечного элемента), а U_{XX} и r (для точки U_{XX}). Гальванические аккумуляторы, как правило, имеют малое сопротивление в режимах, близких к холостому ходу, и чаще используются как ИЗН, в большинстве инженерных решений применяется модель *E-элемента* (на схемах обозначают *E*). Реальные ИЗТ разрабатываются (как одно из решений) на основе операционных дифференциальных усилителей, достигается стабилизация выходного тока в определённых пределах.

Линейное представление математической модели источника (рис. 2) позволяет осуществить переход к *дуальным моделям системы*:

• при малых нагрузках (R велико) целесообразно использовать схему замещения линейного ИЗН;

• при больших нагрузках (R мало, $g = 1/r$ велико), как известно, логично применять схему замещения линейного ИЗТ.

Линейные модели «контура» и дуальной «узловой пары» представлены на рис. 3 и рис. 4.

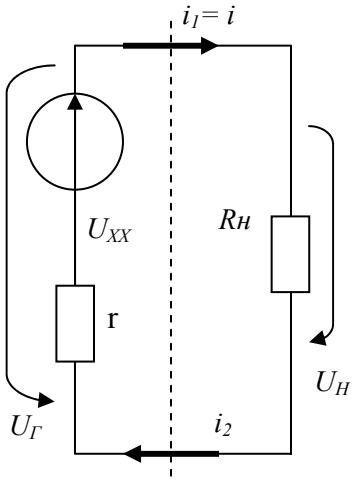


Рис. 3. Модель «контура»

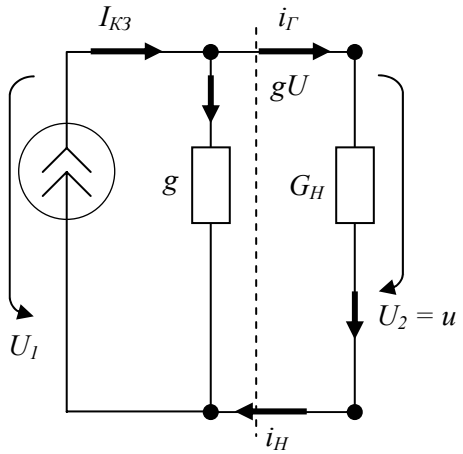


Рис. 4. Модель «узловой пары»

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = i; & \text{ЗТК (сечение-пунктир)} \\ U_Г + U_H = 0; & \\ U_Г < 0. & \text{ЗНК} \end{cases}$$

Математическая модель контура в аналитической форме:

$$\begin{cases} u = U_{XX} - ri; \\ u = R_H i; \\ i_1 = i_2 = i. \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = u; & \text{ЗНК} \\ i_Г + i_H = 0; & \\ i_Г < 0. & \text{ЗТК} \end{cases}$$

Дуальная математическая модель:

$$\begin{cases} i = I_{КЗ} - gu; \\ i = G_H u; \\ U_1 = U_2 = U. \end{cases}$$

Стрелками отсчётов на дуальных схемах показаны современные *условные графические обозначения* (УГО) амперметров и вольтметров, включённых «*согласованно полярности*» (в направлении минуса полярности прибора). Эти УГО, мы считаем, следует применять в условиях профильного обучения.

Заданная рабочая точка с координатами i и u может быть найдена *методом опрокинутой характеристики* или аналитическим методом Кирхгофа как следствие графического представления математической модели (рис. 2):

$$\begin{cases} u = Ri; \\ u = U_{XX} - ri. \end{cases}$$

Вычитая из первого уравнения второе, приходим к *закону напряжений Кирхгофа.* Это позволяет говорить о графической математической модели сис-

темы «источник—приёмник» как о представлении системы законов Кирхгофа в графической форме. Расчёт режима в «контуре» по точке пересечения графиков даёт:

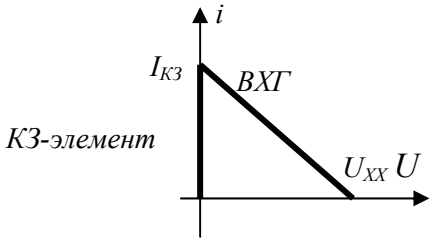
$$\begin{cases} i = \dfrac{U_{XX}}{R+r}; \\ u = U_{XX}\dfrac{R}{R+r}. \end{cases} \qquad (1)$$

Традиционно первое уравнение в решении этой задачи называется «законом Ома для полной цепи». В ходе изложения нами показано, что, на самом деле, системными законами здесь являются законы Кирхгофа, на что неоднократно указано в работах К. К. Гомоюнова.

Дуальная математическая модель «узловой пары» в аналитической форме:

$$\begin{cases} i = Gu\ ; \\ i = I_{КЗ} - gu\ . \end{cases}$$

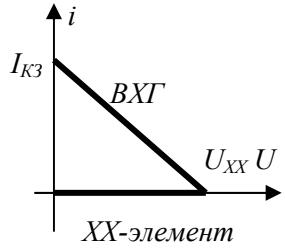
Решение системы уравнений можно получить и простой заменой в (1) параметров на дуальные. Запись уравнения ВХГ без уравнения модели нагрузки недопустимо. Главная ошибка, которая часто встречается в учебной литературе, — это *нарушение целостности системы «источник—приёмник»*, когда ВХГ наносят на график без графика модели нагрузки (например, без *R-элемента*). В учебных пособиях для высшей школы описание построения графика ВХГ авторы связывают с нахождением координат двух точек ($I_{КЗ}$ и U_{XX}), оставляя каждый раз на втором плане виртуальное подключение источника к *КЗ-элементу* и *XX-элементу*. В деталях (из которых складывается понимание и учебная технология) моделирование короткого замыкания осуществляется построением ВХГ по вышеприведённой технологии и *КЗ-элемента* (рис. 5).



$$\begin{cases} u = 0, (R = 0) \\ |I_{КЗ}| = \dfrac{U_{XX}}{r}. \end{cases}$$

Рис. 5. Модель «ИЗН / ИЗТ — *КЗ-элемент*»

Моделирование холостого хода — построение ВХГ и *XX-элемента* (рис. 6).



$$\begin{cases} i = 0, (R = \infty) \\ U_{XX} = \dfrac{|I_{КЗ}|}{g}. \end{cases}$$

Рис. 6. Модель «ИЗН / ИЗТ — *XX-элемент*»

Настолько подробное рассмотрение фундаментальных вопросов содержания основ схемотехники ЭУ, с нашей точки зрения, является залогом успеха при формировании предметных компетенций (как подсистемы профессиональной компетентности) и готовности студентов-физиков и технологов к педагогическому проектированию в условиях профильного обучения. В результате применения проектных технологий нами разработан УМК, главными элементами которого являются учебное пособие «Введение в учебное проектирование электронных устройств» и версии авторских моделирующих программ, реализующих математические модели систем «источник—приёмник» типа «контур» и «узловая пара». Применение УМК в учебном проектировании (как показала практика) способствует развитию профессиональной рефлексии студентов — будущих учителей, успешному освоению методик проектно-исследовательского обучения фундаментальным основам теории цепей и практической схемотехнике. Освоение технологии учебного проектирования и моделирования электронных систем графоаналитическим методом, включая педагогическое проектирование учебных модулей, позволяет студентам разрабатывать авторские элементы УМК, которые в дальнейшем могут применяться и совершенствоваться в реальных условиях реализации индустриально-технологического, а также физико-математического и информационно-технологического профилей.

Степень освоения студентами технологии учебного проектирования и схемотехнического моделирования оценивалась нами по результатам выполнения контрольных и творческих заданий на разработку модулей элективного учебного предмета «Основы схемотехники», ориентированного на условия профильного обучения. Эффективность учебной технологии подтверждается результатами проведённого нами эксперимента и публикациями студентов в материалах научных конференций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипенский Р. В.* Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. М.: Техносфера, 2007. 128 с.

2. *Радионова, Н. Ф.* Проектирование в образовательном процессе вуза: гуманитарные технологии: Научно-методическое пособие / Под ред. Н. Ф. Радионовой. СПб., 2008. 192 с.

3. *Филатова, Л. О.* Развитие преемственности школьного и вузовского образования в условиях введения профильного обучения в старшем звене средней школы: Монография. М., 2005. 192 с.

4. *Эрганова Н. Е.* Методика профессионального обучения в системе современного педагогического знания // Образование и наука. 2007. №3 (45). С. 13–20.

REFERENCES

1. *Antipenskij R. V.* Shemotehnicheskoe proektirovanie i modelirovanie radioelektronnyh ustrojstv / R. V. Antipenskij, A. G. Fadin. M.: Tehnosfera, 2007. 128 s.

2. *Radionova, N. F.* Proektirovanie v obrazovatel'nom processe vuza: gumanitarnye tehnologii: Nauchno-metodicheskoe posobie / Pod red. N. F. Radionovoj. SPb., 2008. 192 s.

3. *Filatova, L. O.* Razvitie preemstvennosti shkol'nogo i vuzovskogo obrazovanija v uslovijah vvedenija profil'nogo obuchenija v starshem zvene srednej shkoly: Monografija. M., 2005. 192 s.

4. *Erganova N. E.* Metodika professional'nogo obuchenija v sisteme sovremennogo pedagogicheskogo znanija // Obrazovanie i nauka. 2007. №3 (45). S. 13–20.