

УДК: 608.4

Хоменко Л.Г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ-АНАЛОГИ И СЕТОЧНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В УКРАИНЕ

В статті подано історико-науковий аналіз докомп'ютерних лічильних пристроїв, які у 40–50 роках ХХ ст. склали основу численних практичних застосувань. Показана пріоритетна роль вітчизняних вчених у формуванні теоретичного базису аналогового моделювання і його технічної реалізації.

В статье подан историко-научный анализ докомпьютерных счетных устройств, составивших в 40–50-х годах ХХ в. основу многочисленных практических применений. Показана приоритетная роль отечественных ученых в формировании теоретического базиса аналогового моделирования и его технической реализации.

In the article a historical and scientific analysis of the precomputers account devices was given. It was made of the basis of the numerous practical applications. The priority role of native scientists in forming of theoretical base of analog design and his technical realization had been described.

Издавна существуют многочисленные формы моделирования (описательное, логическое, геометрическое и т.д.). Мы рассмотрим формы, которые связаны с аналоговой вычислительной техникой.

Одной из универсальных форм является моделирование по системе аналогий, то есть подобие явлений различной физической природы, основанное на изоморфизме математических уравнений, описывающих эти явления. Моделируются различные сочетания сторон моделируемого явления такими же сочетаниями соответствующих сторон моделирующего явления (аналогия между механическими и электрическими, гидравлическими и электрическими и др. явлениями). Однако, простое повторение форм моделируемого объекта в модели не всегда давало правильные результаты. Потребовалось развить некоторые общетеоретические положения.

Еще в 1874 году в трудах русского ученого В.Л. Кирпичева формулируются основы аналогового моделирования – теория подобия, заложенные французскими математиками Ж. Бертраном и Ж. Фурье (XVIII в.). Третья теорема теории подобия сформулирована М.В. Кирпичевым в 1931 году [1, 2].

Сущность этих теоретических положений сводится вкратце к тому, что у подобных явлений должны быть пропорциональными сходственными параметрами, входящие в уравнение однозначности, и одинаковыми критерии подобия, определенная зависимость между которыми может представить всякое полное уравнение физического процесса.

Эти положения лежат в основе действия аналоговых вычислительных машин. Например, по пути реализации принципа электрогидродинамической аналогии (ЭГДА), начало которой положено Н.Е. Жуковским (1887) и Н.Н. Павловским (1918). Первый в Украине электроинтегратор ЭГДА создан П.М. Фильчиковым в 1947 году (Институт математики Украинской ССР). В качестве моделирующей сплошной среды, как и во всех последующих разработках класса ЭГДА, использовалась электропроводная бумага. В течение последующих 25 лет было построено семейство интеграторов ЭГДА (см. табл. 1.). Так, в 1960 году разработан и выпускался серийно на Северодонецком приборостроительном заводе интегратор ЭГДА-9/60. Он предназначен для решения методом электроаналогий двумерных и осесимметричных краевых задач, описываемых уравнениями в частных производных эллиптического типа, коэффициенты которых суть кусочно постоянные функции. Осесимметричные задачи моделируются на бумаге, удельная проводимость которой по оси „Z” постоянна, а в направлении оси „R” изменяется по линейному закону. На приборе решались технические задачи фильтрации (в т.ч. при анизотропном грунте), осушения, движения нефти и газа в пластах, кручения, изгиба, определения напряжений, построения потенциальных полей, потоков, задачи теории струй, функций конформных отображений, определения констант интеграла Кристоффеля-Шварца.

В состав модели входил стенд (1,6×0,8 м), до 100 моделей скважин (точек стока), 20 делителей напряжения и измерительное устройство постоянного тока, собранное по мостовой схеме. Нуль-индикатор коммутировался измерительной иглой. Рабочее напряжение 23В, точность отсчета потенциала в любой точке модели до 0,1%, максимальная погрешность решения до 5%. Переменные и параметры представлялись напряжениями и токами. В целом прибор применялся для исследования стационарных процессов. В нем применен потенциометрический делитель напряжения. Для прямых и квазианалоговых исследований нестационарных процессов предусмотрены дополнительные приспособления, возможно применение электроинтеграторов в качестве отдельных составных блоков различных комбинированных моделей [3, 4].

На электроинтеграторах ЭЛДА решены такие задачи, которые другими способами, кроме натуральных испытаний, решены в то время быть не могли.

В институте математики УССР с 1963 года проводятся также исследования вопросов моделирования нестационарных процессов. Для этой цели создан ряд электроинтеграторов нестационарных процессов (ЭИНП). Моделью объекта в нем являлась трехслойная электрическая модель – электро-

проводная бумага с распределенной ёмкостью и проводимостью зон. Так, в 1960 году создана модель ЭИМП-3/66. На ней исследовались уравнения параболического типа, коэффициенты которых суть кусочно постоянные функции, и решались нестационарные задачи тепловых, магнитных и других полей, задачи фильтрации, движения нефти и газа в пластах и т.д. В состав модели входили стенд моделей, делители напряжения ДН-1 для задания граничных условий, устройство для периодизации решений, блок измерения и индикации и т.д. Электронные схемы конструкции построены на лампах и транзисторах. Переменные представлялись потенциалом в диапазоне 0..30 В, параметры – емкостями и сопротивлениями. Максимальная относительная погрешность до 3%. Время наработки на отказ до 2 лет, средний экономический эффект 14 тысяч рублей в год [5]. Интегратор выпускался серийно с 1967 года Киевским заводом "Транссигнал".

Исследование и разработка моделей прямой аналогии на металлическом листе проводились в Институте кибернетики АН УССР (О.В. Тозони). Роботы были завершены созданием интегрирующего устройства. Это электроинтегратор Дирихле-Неймана (ЭДН-1), разработанный и построенный в 1961 году. Он предназначен для расчета плоских магнитных и электрических полей, описываемых уравнениями в частных производных второго порядка (уравнениями Лапласа и Пуассона) с краевыми условиями при предварительном моделировании конформного отображения исследуемой области на бесконечную полосу тонкого листа стали. При расчете полей использовалось предварительное моделирование конформно отображающей функции; аналогом искомой величины служила функция тока либо электрический потенциал. Граничные значения искомой величины моделировались значениями втекавшего тока на границе разделенной на 100 участков-зубцов, форма которых выбрана из условия минимума погрешности.

Необходимость повышения точности и удобства при моделировании гармонической функции обусловили применение металлической полосы вместо электропроводной бумаги, применявшейся в интеграторах ЭГДА (бумага недостаточно однородна), а ничтожное удельное сопротивление металла исключило возможность независимого задания потенциала в каждой точке границы, поэтому разработчики прибегли к моделированию гармонической функции функцией тока, а не потенциала. Электроинтегратор изготовлен в нескольких экземплярах. Один экземпляр был передан в Ростовский инженерно-строительный институт, остальные в Новочеркасский политехнический институт, Киевский политехнический институт и Институт электродинамики АН УССР [6].

Идеи построения некоторых электрических моделей-аналогов базируются на принципе электромеханической аналогии. Он был установлен в 1949 году В.А. Лазаряном (Днепропетровск), который работал над задачами динамики подвижных составов на железных дорогах и совместно с

Н.Г. Бондарем – над вопросами моделирования переходных режимов, динамики стержневых систем.

Принцип электромеханической аналогии выводится из условия идентичности выражений для кинетической и потенциальной энергии механической и электрической систем, при этом одному выражению в механической системе можно поставить в соответствие два выражения (выражение через емкость или выражение через индуктивность) в электрической системе. Отсюда вытекает возможность построения двух систем электромеханической аналогии с представлением механической массы и скорости в первой – через индуктивность и ток, а второй – через емкость и напряжение (соответственно). Модели такого типа обычно называют пассивными, т.к. они используют пассивные элементы электрических цепей. Модели-аналоги могут строиться и с применением активных элементов (электронных усилителей, электрических двигателей и т.д.); в этом случае собственные параметры модели могут служить эквивалентами соответствующих параметров оригинала (объекта).

В Днепропетровске В.А. Лазаряном в 1950 году была разработана электрическая модель-аналог усилий в упряжных приборах неоднородных поездов при неустановившихся режимах их движения. Машина решала системы линейных дифференциальных уравнений и волновое уравнение при заданных граничных и начальных условиях. Поезд, как система сосредоточенных масс, воспроизводился электрической цепью пассивных четырехполюсников (до 36 штук), каждый из которых моделировал сосредоточенную массу (вагон, локомотив). Применена первая система электромеханической аналогии – аналогия процессов, описываемых идентичными дифференциальными уравнениями. Предусмотрена возможность соединения элементов электроцепи для создания модели-аналога по второй системе электромеханической аналогии. Источники тока и напряжения моделируют силы, действующие на поезд. Для моделирования периодических сил и получения резонансных кривых применялись звуковые генераторы. Бег тормозной волны вдоль состава моделировался последовательным подключением аккумуляторов к четырехполосникам посредством коммутатора. Заданный график внешних сил воспроизводился фотоэлектромеханическим устройством и прерывателем.

В качестве измерительного устройства использовался осциллограф с фотоприставкой. Скорость экипажа представлялась силой тока, масса – индуктивностью 25 .. 100 мГн, жесткость упряжного аппарата – емкостями 0.1 .. 1 мкФ, сила тяги локомотива – напряжением на входе, коэффициенты – сопротивлениями [7].

В 1964 году в Институте кибернетики АН УССР разработана модель, в которой частично нашел отражение принцип электромеханической аналогии (труды А.И. Кухтенко). Это электромеханическая модель перевернутого маятника, моделировавшая неустойчивые процессы колебания плазмы. Масса и скорость перемещения плазмы (ток) моделировались подобными меха-

ническими параметрами маятника. Неустойчивость плазменных процессов, вызываемая электродинамическими факторами описываемая дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных, моделировалась неустойчивым "перевернутым" положением маятника. На модели при совместной работе с импедантным регулятором исследовались вопросы стабилизации процессов колебания в плазме и вопросы разработки автоматических регулирующих устройств [8].

В 1964 году была разработана и построена специализированная электрическая модель поля токов в сети подземных трубопроводов (О.В. Толзони). Модель предназначена для нахождения напряжения на изоляционном покрытии труб и оптимального расположения защитных устройств от разрушения блуждающими токами электрифицированных железных дорог; в основе модели лежит новая теория электрических цепей с утечкой. Модель состояла из двух соединенных основных частей, на границах которых задается потенциал, пропорциональный реальному. Трубопровод, изоляция и близлежащие слои грунта моделировались цепной схемой из продольных резисторов и поперечных проводимостей. Остальная часть грунта моделировалась электрической ванной (трехмерное поле, удовлетворяющее уравнению Лапласа). Для увеличения точности моделирования применена ванна с минимально-искажающими стенками.

Не "вошедшие" в ванну остальные ветви трубопровода моделируются резисторами. Поле моделируется методом наложения, т.е. поля для каждого, отдельно представляемого источника суммируются. Станции катодной защиты представляются источниками тока, а дренажи – проводниками между узлами цепной схемы. Поле всей сети из-за ограниченности размеров модели моделируется участками. Путем изменения расположения защитных устройств и сопоставления выполненных измерений оператор выбирает оптимальный вариант расположения. Измерение данных осуществляется автоматически [6, 9]. Модель использовалась в Институте ГИПРОГАЗ для исследовательских и проектных работ.

В Днепропетровском горном институте (ДГИ) под руководством профессора Ф.А. Абрамова разработана теория электрического моделирования вентиляционных сетей шахт, на основе которой построен ряд электрических моделей. Там же создана серия приборов ППРВС ДГИ, пригодных для расчета водопроводных, газовых и теплофикационных сетей.

В 1929 году С.А. Гершгорин (Москва) предложил метод сеточного электрического моделирования для решения дифференциальных уравнений в частных производных, основанный на конечноразностной аппроксимации дифференциальных уравнений алгебраическими. Эта операция заключается в аналитической замене частных производных конечным числом разностей значений функций в близких точках, связывающих характеристики полей. Вся моделируемая область разбивается на элементарные участки и для каждого из них строится электрическая схема замещения из RC или LC

элементов. Сеточные модели-аналоги могут служить для исследования динамических процессов в системах с распределенными параметрами. Программирование задач, решаемых на сеточных электроинтеграторах, и их постановка для решения на цифровых ЭВМ встречали в то время значительные трудности.

Появление на Украине аналоговых машин сеточного типа связано с созданием в 1945 году первой в Украине лаборатории электрического моделирования при Киевском государственном университете (КГУ) и с именем руководителя лаборатории Вадима Евгеньевича Дьяченко, под чьим руководством в 1946–1948 годах разработано и построено семейство уникальных вычислительных машин – электроинтеграторов КГУ (В.Е. Дьяченко, Н.А. Танцюра). Это электроинтеграторы сеточного типа, предназначенные для решения уравнений эллиптического типа в частных производных с граничными условиями 1, 2 и 3-го рода, а также уравнений типа Лапласа, Пуассона бигармонических уравнений теории упругости, уравнений распространения тепла, моделирования температурных полей, осесимметричных задач теории упругости и т.д.

Вычислительной средой модели является аналоговая сетка, исполненная на магазинах сопротивлений, содержащая 1200 узлов и обладающая свойством гибкой комутации по любой схеме – плоская или пространственная сетка, гибкая цепочка, выделение части магазинов для стоков, двойная сетка и т.д. Количество граничных узлов – до 200. Своеобразие модели состоит в высокой точности задания параметров и измерения результата (до 0,1%), что достигнуто благодаря введению двойных делителей напряжения, четырехдекадных сопротивлений сетки, измерительных устройств компенсационного типа и дублирования решений.

В состав машины входит 4 сетки, содержащих по 300 узлов, устройство для включения емкостных и омических истоков, устройство для задания электрических полей на двухступенчатых потенциометрах, моделирующих граничные условия с точностью до 0,05%, измерительное устройство на потенциометрической схеме с применением двойных декад, а также автоматическое измерительное устройство. Имеется телетайп, печатающий результативные напряжения, снимаемые с узлов. Возможно расширение объемов сетки и добавление новых приборов и устройств, а также передача информации на ЭВМ, для чего предусмотрено устройство передачи данных. Параметры представляются сопротивлениями в диапазоне 1 Ом .. 11.1 кОм, применение – напряжениями 0.001 .. 10 В. Напряжения в узлах измеряются с точностью до единицы четвертого знака. Потребляемая мощность 300 Вт [10].

На электроинтеграторе решен ряд важных народнохозяйственных задач – расчет плотины Каховской ГЭС, расчет конструкций Бориспольского аэровокзала, конструкций газовых турбин ЦКТИ им. Ползунова (Ленинград) и др. в 1946 году был создан второй экземпляр, изготовленный в 1947 году, передан в Институт гидрологии АН УССР. Второй и третий экземпляры

имели точность до 0,1%. Большая работа по расчету пластин на электроинтеграторе была проведена Л.И. Дятловицким (Институт гидрологии АН УССР). Он же занимался разработкой моделей для решения бигармонических уравнений.

С начала 60-х годов разработка сеточных электроинтеграторов проводится в институте математики АН УССР (А.Г. Тарапон), где впоследствии было создано семейство электроинтеграторов – ДМ, ДМ-2/65, ДМ-3/66, ДМ-4, БУСЭ-70 и другие математические машины.

Например, сеточная модель постоянного тока ДМ-3/66, в которой впервые применены автоматический опрос узлов сеточных секций и два запоминающих делителя напряжения, фиксирующих предыдущий по времени шаг решения, разработана и построена в 1966 году. На модели исследуются и рассчитываются стационарные и нестационарные тепловые (и другие) поля, описываемые эллиптическими и параболическими уравнениями с граничными условиями первого, второго и третьего рода. Модель состоит из сеточных секций, выполненных на переменных и постоянных резисторах и содержащих 80 типовых узлов, четырех активных делителей напряжения для задания граничных условий, блока коммутации и индикации, собранного на базе двух шаговых искателей ШИ-50 и релейных переключателей, автоматически подключающего измерительное устройство к узлам, резисторам и т.д. Секционная конструкция из полностью автономных малогабаритных секций допускает совместное соединение необходимого числа (неограниченно) для решения двух-, трехмерных и более сложных задач и работу нескольких человек. Переменные представляются напряжениями в диапазоне 0..30 В, устанавливаемыми и измеряемыми с точностью до 0.1% в любой точке [11, 5]. Модель ДМ-3/66 является наиболее удачным образцом [11, 5] из семейства сеточных электроинтеграторов Института математики АН УССР.

В конце 50-х годов исследования в области электрического и электронного моделирования начинают проводиться также в стенах вновь организованного Вычислительного центра (ВЦ АН УССР, позднее преобразованного в Институт кибернетики) и Киевского института гражданской авиации (КИИГА) под руководством Георгия Евгеньевича Пухова.

Многочисленные исследования в области аналоговой вычислительной техники были обобщены (начиная с 1957 г.) в трудах Киевской школы электромоделирования (Г.Е. Пухов, Б.А. Борковский, А.Е. Степанов, А.Ф. Верлань, Г.И. Грездов и др). В результате были выработаны новые принципы синтеза моделей и разработан целый ряд электронных математических машин. Так, Г.Е. Пухов предложил для построения моделирующих устройств более общий, по сравнению с критериями подобия, принцип эквивалентности, благодаря которому стало возможным создавать квазианалоговые (неуправляемые и управляемые) модели, разработал вопросы моделирования краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений

в частных производных. Им также предложены схемы обратимых моделей и новый метод так называемого динамического моделирования [1, 2].

Теория аналогового моделирования, основывающаяся на математическом подобии уравнений объекта и модели, к 1953 году сформировалась окончательно. К этому времени уже стало ясно, что не для любых объектов моделирования могут быть получены аналоговые модели. Затруднения в построении моделей были в значительной степени устранены в результате развития теории квазианалогового моделирования, основы которой разработаны в Институте кибернетики АН УССР и Киевском институте инженеров гражданской авиации (КИИГА). Принцип квазианалогового моделирования был предложен Г.Е. Пуховым и Б.А. Борковским в 1959 году (Известия ВУЗов, серия электромеханическая). Его сущность сводится к следующему.

Аналогии могут быть простыми (прямыми), когда состояние моделирующих цепей описывается уравнениями, подобными уравнениям объекта (принцип подобия), и сложными (или квазианалогиями), когда состояние цепей описывается некоторыми другими уравнениями, эквивалентными первым в отношении получаемого результата (принцип эквивалентности). Квазианалоговые модели каких-либо уравнений (А) – это модели прямой аналогии каких-либо уравнений (Б), хотя бы частично не подобных уравнениям (А) и таких, чтобы при выполнении условий эквивалентности все или некоторые из неизвестных уравнений (Б) совпали бы с точностью до постоянных множителей с неизвестными исходных уравнений (А).

В общем случае условия эквивалентности таковы, что для их реализации необходимо использовать полученные в моделирующей цепи величины, для чего организуется процесс управления (уравновешивания), осуществляемый в моделях при помощи обратной связи между получаемыми в квазианалоге и вводимыми в него управляющими величинами. Такие управляемые модели называются квазианалоговыми моделями второго рода. Условия эквивалентности могут быть такими, что для их реализации в моделирующей цепи потребуется использования получаемых в ней величин. Такие неуправляемые (неуравновешиваемые) модели, не охватываемые обратными связями, по своим свойствам не отличаются от моделей прямой аналогии и названы квазианалоговыми моделями первого ряда.

Известно несколько видов аналоговых и квазианалоговых математических машин; к одному из них относятся аналоговые машины, предназначенные для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Принцип квазианалогового моделирования положен в основу целой плеяды созданных на Украине аналоговых вычислительных машин и устройств – сеточных электроинтеграторов, моделей бигармонических задач, специализированных квазианалоговых электрических моделей (среди которых следует отметить семейство моделей ЭМСС), счетно-решающих устройств и т.д., предназначенных для решения задач математической физики, теории стержневых систем и алгебраических уравнений.

Из числа сеточных электрических моделей алгебраических уравнений следует отметить экспериментальную первую отечественную квазианалоговую электрическую модель систем линейных алгебраических уравнений "МАУ", решавшую системы уравнений до 15 порядка. Это модель типа уравновешиваемой электрической сетки с ручным уравновешиванием, разработанная и построенная в 1959 г. в КИИГА. В состав модели входила сетка из 240 ячеек (каждая из них построена на переменном резисторе, задающем коэффициент и двух резисторах арифметического устройства), 15 источников тока, моделирующих искомые переменные, измерительный прибор. Арифметическое устройство (АУ) выполняло суммирование произведений, группа из 16 ячеек объединялась одним АУ. В каждые 15 ячеек подводился ток от одного источника. Искомые переменные представлялись токами 1 .. 1000 мА, погрешность решения в значительной мере зависела от матрицы решаемого уравнения. Модель выполнена в форме стенда [1, 2].

Следующая удачная модель класса МАУ, созданная в КИИГА – это сеточная электрическая модель МАУ-2Э, применявшаяся для учебной цели. На модели решалась система из четырех уравнений с четырьмя неизвестными.

В ВЦ АН УССР путем параллельных исследований к началу 60-х годов было так же разработано и построено семейство моделей алгебраических уравнений (МАУ). Это модели МАУ-1, МАУ-2, МАУ-3, МАУ-3Э. Все они представляют собой уравновешиваемые сеточные модели постоянного тока с жесткой структурой для квазианалогового моделирования, отличающиеся в основном величиной порядка решаемых на них систем линейных алгебраических уравнений. Так, на модели МАУ-3 можно было решать системы алгебраических уравнений до 20 порядка.

Дальнейшее развитие сеточных средств квазианалогового моделирования в КИИГА выразилось в разработке семейства специализированных квазианалоговых сеточных моделей "КСМ" (КСМ-2 .. КСМ-5), предназначенных для решения краевых задач математической физики и бигармонических уравнений, встречающихся при расчете прочности авиационных конструкций. Рассмотрим КСМ-3.

Модель КСМ-3 предназначена для решения дифференциальных уравнений вариационного метода Власова применительно к задачам изгиба и кручения призматических и круговых цилиндрических оболочек, причем изгиб аппроксимируется тремя, а кручение – двумя функциями при числе расчетных сечений до двадцати, что эквивалентно решению системы из пяти дифференциальных уравнений второго порядка. КСМ-3 разработана в 1961 году, в ее состав входит электрическая квазианалоговая сеточная модель на переменных резисторах, образующая ряд последовательных цепочек сопротивления. Количество узлов сетки 100. Многоцелевое АУ позволяет осуществлять связь между последовательными цепочками переменных сопротивлений, моделирующими отдельные дифференциальные уравнения в системе, контролирует точность и служит для проведения измерений.

Граничные условия задаются 12 источниками напряжения. Переменные представляются токами до $\pm 1,5$ мА, напряжениями до ± 10 В, а параметры – сопротивлениями 50 Ом .. 40 кОм. Относительная погрешность 2..3%, время наработки на отказ до 150 часов. Машина передана для эксплуатации в Московский НИИ экспериментального проектирования жилищ [12].

В Институте кибернетики АН УССР под руководством Г.Е. Пухова и В.В. Васильева была разработана теория и методика построения математических моделей-аналогов для решения экономических задач линейного программирования. На этой основе созданы машины МКЗП, ОПТИМУМ, АСОР, ПОЛЕТ, ОЛП, ОРИОН и др. на базе сеточной модели. Так, в 1963 году создана экспериментальная первая отечественная специализированная модель, предназначенная для решения транспортной задачи линейного программирования МКЗП (модель кратчайшего задания пути). Основным решающим элементом модели являлся электрический аналог транспортной ветви, состоящий из полупроводникового диода, источника эдс и источника тока – так называемый "аналог Денниса".

Специализированная машина, предназначена для решения транспортной задачи линейного программирования и построения на основе модели МКЗП в том же году ("Оптимум-1"), была первой отечественной вычислительной машиной подобного назначения. Типология сети модели, построенной по диодной аналогии Денниса, подобна реальной сети транспортных перевозок. В состав модели входило 15 аналоговых ветвей, коммутирующий элемент – шаговый искатель, подключающий измерительный прибор и др., 25 ламповых источника тока, моделирующих запасы (m-точек) и потребности (n-точек) и мнемосхема транспортной сети, выполненная на тиратронах МТХ-90. Метод моделирования сетей – квазианалоговый, максимальный размер матрицы транспортной задачи $m+n = 10 \times 15$, коэффициенты целевой функции представляются напряжениями в диапазоне 0 .. 10 В, запасы и потребности – токами 0.1 .. 4.5 мА. Максимальная относительная погрешность нахождения линейной формы – до 3%, при применении схемы компенсации погрешности (за счет неидеальности диодов) – до 0.5%. Машина изготовлена в виде лабораторного макета. Она предназначена для использования в небольших транспортных учреждениях при оперативном планировании перевозок [13]. Более совершенный вариант машины ("Оптимум-2") выпускался серийно заводом "Электроизмеритель" с 1965 года.

Специализированная электронная математическая модель, предназначенная для расчета и визуального отображения графиков сетевого планирования, разработана и построена в 1946 году. Она названа "АСОР-1" по аббревиатуре наименования "Автоматическая система организации работ". Машина дает возможность определить конфигурацию и длину критического пути, вычислить временные характеристики небольших и укрупненных сетей, а также обеспечивает выполнение оперативного анализа изменений в сетевом графике. Типология электронной модели, на которой строится принцип

работы машины, подобна рассчитываемому сетевому графику. Модель представляет собой диодную аналогию Денниса, выполненную на полупроводниковых решающих элементах, моделирующих работы, и схемах совпадения, моделирующих события. Решающие и индикационные элементы мнемосхемы набираются вручную на наборном поле.

В состав машины входит 200 решающих элементов, исполненных на транзисторах (эквивалентных последовательно соединенными источником напряжения, диоду и индикатору тока), 140 схем совпадения, наборное поле, блок световой индикации (мнемосхема, обеспечивающая высвечивание конфигурации сетевого графика, критического пути, замкнутых контуров и отсутствия пути между двумя событиями). Максимальное число работ одного пути – до 30, диапазон изменения продолжительности работы 0 .. 50 единиц. Характеристики графика воспроизводятся напряжениями 0 .. 10 В, максимальная относительная погрешность определения продолжительности работы $\pm 0.5\%$, длины критического пути – до 1% (при наличии равнокритических участков – до 5%). Предусмотрена возможность агрегирования нескольких машин при решении более сложных задач с подключением внешних устройств визуального отображения [13]. Серийный (заводской вариант) машины, отличающийся компоновкой и конструктивом – "Ритм-1" – выпускается с 1966 года Житомирским заводом "Электроизмеритель".

Бытующее суждение о том, что модели-аналоги и сеточные электроинтеграторы исчерпали все свои возможности, нельзя считать обоснованным: в научных учреждениях страны продолжается их разработка. Они находят свое применение в случаях преимущественно исследовательского характера, отличающихся нестрогой требовательностью в вопросе точности решения при достаточно высоком требовании к наглядности модели, возможности эвристического ее изменения и к быстрдействию (например, при изучении процессов, алгоритм которых еще не отработан) и для цели управления малыми системами (например, локальными устройствами систем автоматического управления), в которых применять сложные цифровые устройства не целесообразно. Недостатки описанных в статье математических машин (громоздкость схем, трудность в автоматизации ввода и вывода данных, узкий класс решаемых задач) устраняются при переходе к моделирующим машинам с переменной структурой, вычисления в которых осуществляются последовательно с помощью аналогового арифметического устройства в соответствии с выбранной программой решений и запоминанием промежуточных и конечных результатов.

Подобные математические машины используют в качестве аналоговых процессоров-подпрограмм в составе универсальных электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ). Это вызвано тем, что при решении больших систем уравнений аналоговые процессы превышают по быстрдействию мощные ЭЦВМ (например, возможности БЭСМ-6): количество арифметических действий в матричных алгоритмах обычно измеряется числом мульти-

пликативных операций, число которых для решения системы $Ax=f$ (n -го порядка) с помощью, например, гауссовского метода исключения, имеет вид полинома от n , в котором главный член равен $\frac{1}{3}n^3$ и, следовательно вместе с возрастанием порядка возрастает время решения задачи на ЭЦВМ [14]. А время решения на аналоговом процессоре определяется лишь переходным процессом в электрической цепи и не зависит от порядка системы уравнений. Важно при этом также учесть соотношение стоимости аналоговых (непрерывных) и цифровых машин.

В заключении следует отметить приоритетную роль отечественных ученых В.Л. Кирпичева, М.В. Кирпичева, Н.Е. Жуковского и Н.Н. Павловского в формировании теории подобия и принципов построения моделей-аналогов. Большой труд в дело развития аналогового моделирования вложен сотрудниками лаборатории В.Е. Дьяченко, группой моделирования, возглавляемой П.Ф. Фильчиковым и учеными Днепропетровской ячейки электромеханической аналогии. Особо важная заслуга в развитии аналогового моделирования и в выработке новых принципов построения математических машин принадлежит ученым киевской школы, возглавляемой Георгием Евгеньевичем Пуховым, а также ученым зарождающихся ячеек аналогового моделирования в других городах, дающих новую жизнь аналоговой технике в создаваемых больших гибридных вычислительных комплексах, за которыми, по видимому, будущее вычислительной техники.

В целом статья содержит средства познавательного характера в деле пропаганды приоритетной роли отечественных ученых в мировой вычислительной науке и технике. Практичный ее аспект определяется потребностями учета исторического опыта при изучении технических прототипов, путей целесообразной реализации забытых идей на современном уровне прогресса, устранении повторных открытий.

Таблица 1.

Класс и наименование машины (устройства)	Окончание разработки
1. Модели прямой аналогии на сплошных средах	
ЭГДА	1947
ЭГДА-3	1949
ЭГДА-6	1951
ЭГДА-7	1956
ЭГДА-9/60	1960
ЭДН-1	1961
ЭГДА-10/62	1962
ЭИНП	1963
ЭГДА-11	1966
ЭИНП-3/66	1966
ЭИНП-ИМ1	1968
ИКММ-12	1972
Математические модели-аналоги	
Электрическая модель поезда	1950

МКЗП	1963
ОПТИМУМ-1	1963
ОПТИМУМ-1Д	1964
Модель поля токов подземных трубопроводов	1964
Электромеханическая модель маятника	1964
ОПТИМУМ-2	1965
АСОР-1	1965
РИТМ-1	1966
ПОЛЕТ	1968
ОРИОН-70	1970
Сеточные электроинтеграторы	
КГУ	1946
МАУ	1959
МАУ-1	1960
МАУ-2Э	1960
КСМ-1	1960
КСМ-2	1960
КСМ-3	1961
МАУ-3Э	1961
ЭМОС-8	1962
КСМ-4	1963
ДМ	1964
ДМ-2/65	1965
КСМ-5	1965
ДМ-3/66	1966
ДМ-4	1968
БУСЭ-70	1970

Литература и источники

1. История отечественной математики Т. 2 [в 4-х т.]. – К.: "Наукова думка", 1970.
2. Пухов Г.Е. Электрическое моделирование стержневых и тонкостенных конструкций / Г.Е. Пухов. – К.: Изд-во АН УССР, 1960.
3. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге / П.Ф. Фильчаков, В.И. Панчишин. – К., Изд-во АН УССР, 1961.
4. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И. Доклады 4-й межвузовской конференции по применению физико-математического моделирования в различных отраслях техники Сб. №1. / П.Ф. Фильчаков, В.И. Панчишин. – М.: МВССО РСФСР, МЭИ, 1962.
5. Тарапон А.Г. Математическая физика. – 1968. – Вып. 6.
6. Тозони О.В. Математические модели для расчета электрических и магнитных полей / О.В. Тозони. – К.: Изд-во "Наукова думка", 1964.
7. Лазарян В.А., Лапкин Б.Д. Техника железных дорог. – 1951.– №6.

8. Самойленко Ю.И. Электромагнитное управление объектами с распределенными параметрами: Автореф. дисс. / Ю.И. Самойленко. – К.: Институт кибернетики АН УССР, 1970.
9. Тозони О.В. Математическое моделирование и электрические цепи. Вып. 1. / О.В. Тозони.– К., Изд-во АН УССР, 1963.
10. Дьяченко В.Е., Танцюра Н.А. Электрическое моделирование / В.Е. Дьяченко, Н.А. Танцюра. – М.: Изд-во АН СССР, 1952.
11. Применение вычислительной техники при гидрологических исследованиях / [Сорокин А.Н., Сытников В.Е., Тарапон А.Г. и др.]. – М.: Изд-во "Недра", 1969.
12. Самусь В.М. Моделирование тонкостенных авиационных конструкций. Автореферат дисс. / В.М. Самусь. – К.: Киевский институт инженеров гражданской авиации, 1960.
13. Решение задач оптимального планирования на электронных моделях / [Васильев В.В., Клепикова А.Н. и др.]. – К., Наукова думка, 1966.
14. Мишутин В.Г., Проскурин Е.А. Аналого-цифровые вычислительные процессоры / В.Г. Мишутин, Е.А. Проскурин. – К.: ИК АН УССР, 1973.