

## НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Л. Г. Малахов

Киев

В связи с быстрым ростом цифровой техники и внедрением ее в системы автоматического регулирования и управления (САРИУ) возник ряд проблем, связанных с анализом и синтезом этих систем. Введение

в САРИУ цифровых блоков и элементов превращает их из непрерывных в дискретные, к которым не всегда применим математический аппарат, хорошо разработанный для непрерывных систем. Специфические особенности дискретных систем требуют иного математического аппарата, иных методов расчета и исследования. Все это чрезвычайно усложняет аналитическое исследование, делает его громоздким и неудобным. Наличие разностных уравнений, описывающих дискретные системы, приводит к тому, что в ходе анализа и синтеза мы сталкиваемся не с конечными функциями своих аргументов, а с бесконечными рядами, что

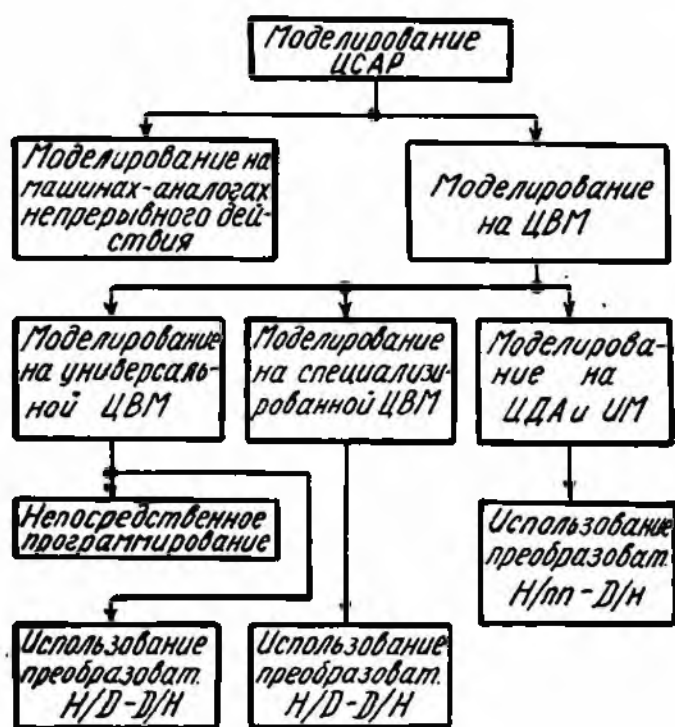


Рис. 1.

делает расчеты еще более неудобными. В связи с этим особую важность при исследовании дискретных систем приобретают экспериментальные методы, наиболее удобным из которых является моделирование.

Довольно широкий класс цифровых систем (в него входят цифровые следящие системы, цифровые автопилоты и другие цифровые регуляторы) может быть моделирован основными способами, изображенными на рис. 1.

Наиболее полно отображаются характеристики реальных систем при физическом моделировании, однако ему присущ существенный недостаток, заключающийся в том, что данная модель соответствует в об-

шем случае ограниченному числу объектов моделирования. В результате реализация модели для каждой новой исследуемой системы оказывается весьма сложной и дорогостоящей. Однако для моделирования узкого класса однотипных систем этот метод может быть с успехом применен. При моделировании цифровых фильтров, входящих в цифровую систему автоматического регулирования (ЦСАР), методам физического моделирования соответствуют способы моделирования на специализированной цифровой вычислительной машине или на цифровом дифференциальном анализаторе в соответствии с физической сущностью работы моделируемого фильтра.

Описание ЦСАР математическими уравнениями является в общем случае сложной задачей, поэтому при составлении алгоритма модели широко используются упрощения, что в конечном итоге приводит к появлению погрешностей результатов моделирования. В этом основной недостаток математического моделирования.

Рассмотрим основные способы моделирования ЦСАР.

### 1. Моделирование ЦСАР на моделирующей машине непрерывного действия

Применение этого способа моделирования предполагает перенесение хорошо разработанных методов моделирования непрерывных систем на дискретные системы. В основу способа положены следующие основные гипотезы:

1. ЦСАР может быть сведена к импульсной САР.

2. В ходе преобразования информации в ЦСАР не происходит квантование по уровню.

3. Передаточная функция цифрового фильтра, входящего в ЦСАР, может быть заменена эквивалентной передаточной функцией непрерывной системы.

В ходе подготовки к набору задачи на машине-аналоге производятся структурные преобразования исходной схемы, в результате которых ЦСАР сводится структурно к двум основным частям: идеальному импульсному элементу и приведенной непрерывной части. В последнюю входят передаточные функции запоминающего элемента, эквивалентная передаточная функция цифрового фильтра, передаточная функция непрерывной части ЦСАР. В простейшем случае свернутая структурная схема модели ЦСАР представлена на рис. 2.

При реализации модели в качестве дополнительного устройства к стандартной моделирующей установке непрерывного типа добавляется ключ и запоминающее устройство (фиксатор), которые легко реализуются с помощью реле и операционных усилителей.

К преимуществам описываемого способа моделирования следует отнести простоту реализации модели, отсутствие прецизионных преобразователей информации, высокое быстродействие и простоту сопряжения с реальной аппаратурой моделируемой ЦСАР. К недостаткам его относятся:

а) низкая точность решения задач (что характерно для машин-аналогов непрерывного действия универсального назначения. При моделировании ЦСАР этот недостаток усугубляется вносимыми систематическими ошибками, возникающими при переходе от передаточных функций цифрового фильтра к эквивалентным передаточным функциям, а также ошибками квантования, зависящими от периода квантования и вида входного сигнала);

б) ограниченность логических возможностей, существенно уменьшающая круг решаемых задач;

в) при наборе задачи на машине-аналоге непрерывного действия значительную трудность представляет учет динамических свойств преобразователей информации, входящих в моделируемую ЦСАР, а также влияние квантования по уровню, что, безусловно, искажает результаты моделирования.

Однако, несмотря на перечисленные недостатки, способ моделирования ЦСАР на машине-аналоге непрерывного действия нуждается в дальнейшем изучении и отработке благодаря простоте реализации модели.

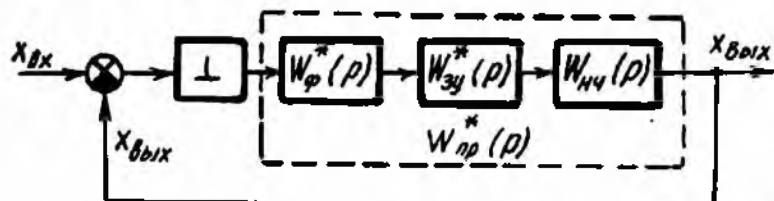


Рис. 2.

## 2. Моделирование ЦСАР на универсальной цифровой вычислительной машине

Принципиальная неограниченность вычислительных и логических возможностей ЦВМ позволяет использовать их для моделирования сложных систем автоматического регулирования, в том числе самонастраивающихся и других, содержащих в своих алгоритмах операции, которые не воспроизводятся на машинах-аналогах непрерывного действия или дают при воспроизведении значительные ошибки. Точность вычислений на ЦВМ практически не ограничена. Вместе с тем относительно низкое быстродействие накладывает ограничения на совместную работу ЦВМ и реальной части моделируемой системы, ибо вносимое машиной запаздывание может сильно изменить динамические характеристики модели и существенно исказить конечный результат. Вследствие этого при использовании ЦВМ, как составной части моделирующей установки, приходится принимать меры для компенсации запаздывания или устранения его последствий.

Возможны два пути использования универсальных ЦВМ для моделирования ЦСАР:

- а) моделирование непосредственным программированием;
- б) моделирование с использованием преобразователей информации и включением в схему моделирования реальной аппаратуры системы (датчиков, исполнительных элементов и др.).

Моделирование ЦСАР непосредственным программированием на ЦВМ, по сути дела, не отличается от обычного решения задач на ЦВМ. В ЦВМ вводят алгоритм моделируемой системы  $P^*(q)$ , задаются исходными данными переменных параметров  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , начальными условиями  $F_0, \lambda_0, C_0, \dots$ , задают входной сигнал в виде последовательности значений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и возмущающие воздействия в виде последовательности чисел, меняющихся по заданному закону  $M_1, M_2, \dots, M_n$  (рис. 3).

Этот способ моделирования исключает возможность включения в схему моделирования реальной аппаратуры системы, кроме того, при моделировании сложных ЦСАР сказывается конечность памяти ЦВМ, что ограничивает возможности задания входного сигнала, возмущений

и других величин. К числу недостатков следует отнести сложность составления программы и ее неуниверсальность.

Наиболее перспективен второй путь использования ЦЗМ — моделирование с использованием преобразователей информации и включением

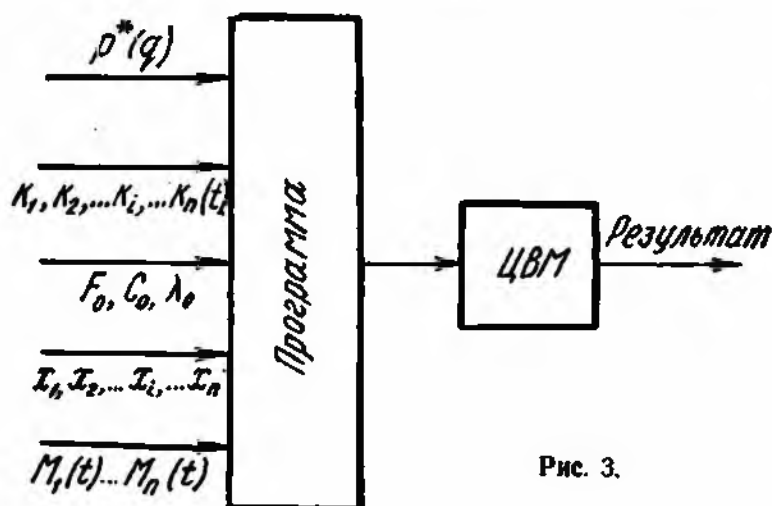


Рис. 3.

в схему моделирования реальной аппаратуры системы. В этом случае ЦВМ является составной частью моделирующей системы, в которую могут входить преобразователи информации, машина-аналог непрерывного действия, реальная аппаратура ЦСАР, индикаторные устройства и другие элементы.

Моделирующая система может быть построена по замкнутой или разомкнутой схеме. Схема моделирующей установки замкнутого типа в общем виде представлена на рис. 4. Работа схемы происходит следующим образом. В ЦВМ вводят программу, содержащую алгоритм работы системы и заданные начальные и граничные условия. После включения информации от датчиков ЦСАР поступает в коммутатор, который в заданной последовательности разделяет поток информации от датчиков по соответствующим каналам. Информация преобразовывается кодирующим преобразователем (Н/Д) в цифровую форму и подается в ЦВМ, где обрабатывается в соответствии с заданной программой. С выхода ЦВМ информация (в виде результатов решения задач) поступает в декодирующий преобразователь (Д/Н), преобразуется в аналоговую форму, затем распределяется по

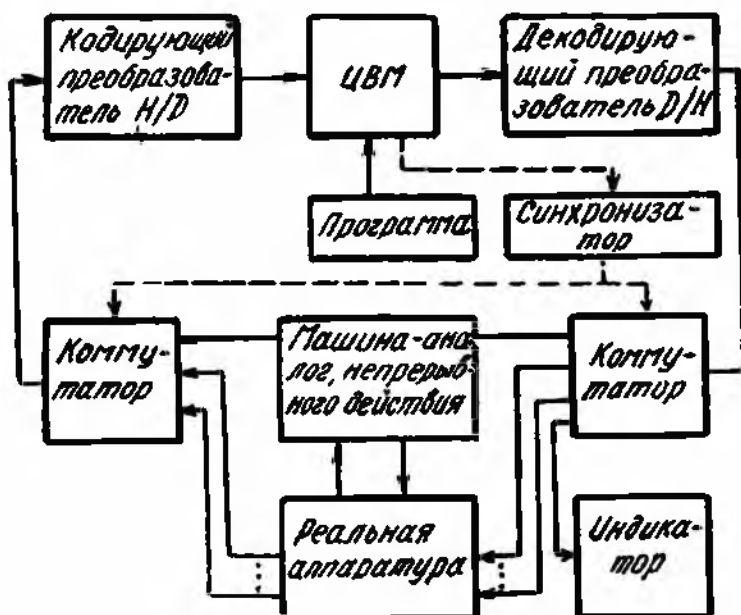


Рис. 4.

Машина-аналог, непрерывного действия, затем распределяется по

соответствующим каналам. Часть задач решается машиной непрерывного действия. Результаты моделирования выводятся на индикаторные устройства. Работа коммутаторов управляется синхронизатором, который работает в соответствии с тактом, задаваемым ЦВМ.

Использование для моделирования реальной физической системы только ЦВМ может привести к искажению динамических характеристик моделируемой системы и нарушить условия подобия, поэтому при моделировании сложных систем желательно применять аналого-цифровые комплексы с распределением задач между ЦВМ и машинами-аналогами непрерывного действия.

Моделирование ЦСАР с помощью специализированных ЦВМ в принципе ничем не отличается от моделирования с помощью универсальных ЦВМ, однако область их применения значительно уже (это связано со спецификой специализированных ЦВМ).

Вместе с тем следует отметить, что в случае применения специализированных ЦВМ в моделирующих установках можно практически как угодно близко удовлетворить требованиям физического моделирования, что существенно повышает достоверность полученных результатов. Создание специализированных ЦВМ для каждой разрабатываемой схемы экономически невыгодно, так как требует больших затрат материальных средств и времени. Применение моделирующих установок со специализированными ЦВМ практически оправдано только в тех случаях, когда моделируемые системы физически мало отличаются одна от другой, а их алгоритмы имеют сходную логику.

В любом контуре моделирования новая информация не создается, а лишь преобразуется, поэтому наличие преобразователей информации является одним из условий применения ЦВМ в контуре моделирования. Применение же преобразователей приводит не только к аппаратному усложнению моделирующей установки, но и к ограничению точности работы.

Квантование сигнала приводит к появлению ошибки квантования и оказывает влияние на динамические характеристики системы. Этим влиянием можно пренебречь лишь в случае ограниченности спектра сигнала и при выполнении условия, вытекающего из теоремы Котельникова:

$$T < \frac{\pi}{\omega_m}, \quad (1)$$

где  $T$  — период квантования;

$\omega_m$  — максимальная гармоника сигнала.

В большинстве случаев условие (1) не выполняется и приходится учитывать влияние квантования на динамические характеристики модели.

При моделировании ЦСАР по схеме с преобразователями информации программа на ЦВМ занимает меньший объем памяти по сравнению со способом непосредственного программирования, что допускает возможность моделирования на одной и той же ЦВМ более сложных ЦСАР.

### 3. Условия нормального функционирования модели ЦСАР, использующей ЦВМ

Как упоминалось выше, одним из недостатков современных ЦВМ является относительно низкое быстродействие, которое вызывает запаздывание выходного сигнала и искажение динамических характеристик модели. Это обстоятельство накладывает некоторые ограничения на

моделирование в случае включения в контур моделирования реальной аппаратуры ЦСАР. Для устранения или компенсации вредного последствия вводимого ЦВМ запаздывания необходимо выполнять условия нормального функционирования модели.

На наш взгляд, основными методами удовлетворения условиям нормального функционирования модели, использующей ЦВМ, являются следующие:

а) моделирование ЦСАР в искусственном (машинном) масштабе времени;

б) статистическое предсказывание ожидаемого запаздывания по априорной информации и его последующий учет;

в) выработка ограничений, накладываемых на период квантования и цикл работы ЦВМ.

При моделировании в искусственном масштабе времени ЦВМ и включаемая в контур моделирования реальная аппаратура ЦСАР работают в одном масштабе времени, отличном от реального, причем значение масштабного коэффициента будет

$$M_t > 1, \quad (2)$$

где

$$M_t = \frac{t_m}{t_p}.$$

Здесь  $t_m$  — машинное время;

$t_p$  — реальное время.

Переход к машинному времени внесет искажение в спектр сигнала и полосу пропускания модели. Для получения достоверного результата необходимо привести к новому масштабу параметры моделируемой системы, изменив их в соответствии с масштабными коэффициентами:

$$\begin{aligned} K_1 M_k, K_2 M_k, \dots, K_l M_k, \dots, K_n M_k; \\ T_1 M_T, T_2 M_T, \dots, T_l M_T, \dots, T_n M_T; \\ \xi_1 M_\xi, \xi_2 M_\xi, \dots, \xi_l M_\xi, \dots, \xi_n M_\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $K_l$ ,  $T_l$ ,  $\xi_l$  — параметры моделируемой системы;

$M_k$ ,  $M_T$ ,  $M_\xi$  — соответствующие масштабные коэффициенты.

В этом случае полученные на выходе модели характеристики окажутся в реальном масштабе времени:  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ , ...,  $h_n(t)$ .

Изменение параметров системы в соответствии с требованиями масштаба времени в реальной части системы может быть сопряжено со значительными техническими трудностями, поэтому более перспективным является другой путь, когда все масштабные преобразования и пересчет производятся вне контура моделирования. В этом случае полученные характеристики системы в машинном масштабе времени:  $h_1(t_m)$ ,  $h_2(t_m)$ , ...,  $h_n(t_m)$  трансформируются в истинные характеристики:  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ , ...,  $h_n(t)$  с помощью аналитической связи между параметрами системы и характерными участками характеристик системы. Пусть, например, характерной точке  $a_0$  на характеристике системы,  $h_1(t)$  соответствует параметр системы  $T_i$  и вместе с тем известно, что параметр  $T_i$  связан с координатой точки  $a_0$  зависимостью (рис. 5):

$$T_i = mt. \quad (4)$$

При переходе к новому масштабу времени  $M_t$  была получена измененная характеристика  $h_1(t_m)$  и регистрирующий прибор зафиксировал характерную точку  $a_1$  с координатой  $mt_m$ . Этой координате будет соответствовать истинное время  $m_1 t$ , причем:

$$mt = m_1 t_m \text{ и } \frac{m_1}{m} = M_t.$$

Зная координаты точки  $a_1$ , можно перенести ее в положение  $a_0$  на величину

$$\Delta = \frac{m_1 t}{M_1} (M_1 - 1) \quad (5)$$

и тем самым перейти от точки на характеристике  $h_i(t_m)$  к точке на характеристике  $h_i(t)$ .

Зависимость (5) характеризует простейший случай. Для получения общих зависимостей данный метод нуждается в полном аналитическом исследовании.

Второй из перечисленных методов удовлетворения условиям нормального функционирования модели заключается в том, что на

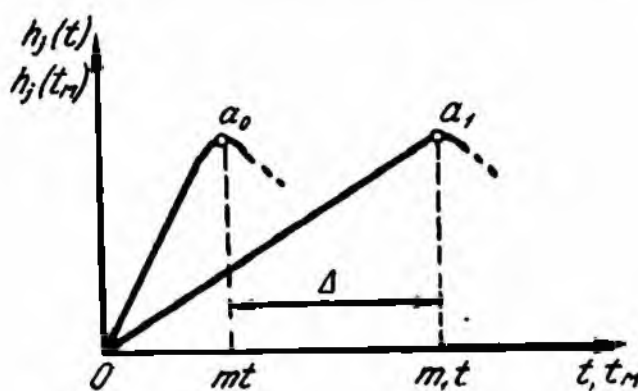


Рис. 5.

ЦВМ возлагаются функции предсказания решения по информации о ходе решения задачи в предыдущие моменты времени. Точность этого метода зависит от закона экстраполирования и вида сигнала.

При использовании третьего метода вырабатываются ограничения для периода квантования и цикла работы машины.

В этом случае одним из условий нормального функционирования модели является требование, чтобы ЦВМ работала в истинном масштабе времени. Естественно, что удовлетворение этому требованию зависит как от характеристик алгоритма модели, так и от параметров ЦВМ.

Возможность использования ЦВМ для моделирования конкретной задачи можно исследовать на основе анализа алгоритма модели, в частности, таких его характеристик, как: а) количество операций; б) объемность; в) связность.

В соответствии с характеристиками алгоритма можно привести параметры ЦВМ. Так, количеству операций соответствует производительность машины, объемности — мощность, связности — объем памяти и т. д. Сравнивая эти параметры, можно дать ответ на вопрос: способна ли машина моделировать данную систему?

Известно, что алгоритмирование одной и той же задачи — процесс неоднозначный, поэтому большое значение имеет задача выбора оптимального алгоритма модели.

Общая потеря времени в дискретной части контура моделирования может быть определена выражением

$$T_n = t_n + t_b + t_3 + t_1, \quad (6)$$

где  $t_n$  — время преобразования непрерывной величины в двоичный код;

$t_b$  — время ввода данных в ЦВМ;

$t_3$  — время обработки информации в ЦВМ;

$t_1$  — время преобразования кода в непрерывную величину.

Величина суммарного времени преобразования и времени ввода данных в машину зависит от места включения коммутатора каналов. При использовании коммутатора перед преобразователем, т. е. при последовательном преобразовании данных, суммарное время может быть записано в виде

$$t_{\text{сн}} = n(t_n + t_b), \quad (7)$$

где  $n$  — число каналов.

При установке коммутатора после преобразователя, т. е. при параллельном преобразовании, суммарное время может быть записано в виде

$$t_{\text{ср}} = nt_n + t_{\text{в}}. \quad (8)$$

Очевидно, что  $t_{\text{ср}} < t_{\text{сп}}$ , но параллельное преобразование связано с необходимостью иметь преобразователь на каждый канал, что усложняет систему.

Потери времени на обратное преобразование могут быть сведены к нулю при условии параллельной работы преобразователя с ЦВМ. В этом случае для времени цикла машины получим выражение

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{с}} + t_{\text{з}}. \quad (9)$$

Тогда условие нормального функционирования модели может быть записано в виде

$$T_{\text{ц}} = \Delta t, \quad (10)$$

где  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  — истинное время.

Работа ЦВМ по времени управляется тактовыми импульсами, следующими через отрезки времени  $T$ , причем для машин с синхронной системой управления  $T = \text{const}$ , а для машин с асинхронной системой управления  $T = \text{var}$ .

Очевидно, что условие нормального функционирования можно записать в виде неравенства

$$T_{\text{ц}} < T. \quad (11)$$

#### 4. Моделирование ЦСАР с помощью ЦДА

Цифровые дифференциальные анализаторы оперируют не с числами, а с их приращениями. Это обстоятельство определяет специфику их структуры и работы.

В схему моделирования с ЦДА включаются преобразователи информации, преобразующие непрерывные величины в потоки приращений.

С точки зрения введения алгоритма модели ЦДА относительно простые устройства. Вместе с тем по быстродействию ЦДА превосходят многие типы ЦВМ. Характерной особенностью ЦДА является то, что точность вычислений у них есть функция времени и увеличивается со временем решения. Вследствие этого при определении ограничений, необходимых для моделирования в истинном масштабе времени, нужно учитывать влияние этих ограничений на точность решения задач. В отношении логических возможностей ЦДА уступают ЦВМ. В настоящее время разработке ЦДА уделяется большое внимание. Применение ЦДА в моделировании представляет значительный интерес и требует самого тщательного изучения.

#### ВЫВОДЫ

1. Цифровые системы автоматического регулирования обладают рядом специфических особенностей, отличающих их от других систем автоматического регулирования. Наличие квантования сигнала и включение в схему цифрового фильтра затрудняет их аналитическое исследование поэтому особую важность приобретает моделирование.

2. Из рассмотренных способов моделирования ЦСАР наиболее полно отражают физику процессов, протекающих в системе, а также способы, основанные на использовании ЦВМ с преобразователями информации и включением в схему моделирования реальной аппаратуры ЦСАР.

3. В случае моделирования относительно несложных ЦСАР, когда не требуется высокая точность, может быть применен способ моделирования ЦСАР на машинах-аналогах непрерывного действия, как наиболее просто реализуемый.

4. Моделирующая установка, включающая в себя универсальную ЦВМ и преобразователи информации, может быть использована для моделирования сложных непрерывных систем автоматического регулирования, алгоритмы которых содержат операции, трудно реализуемые на машинах-аналогах непрерывного действия, или дающие при этом большие погрешности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Я. Коган. О принципе построения комбинированных вычислительных машин. АН СССР, М., 1962.
2. Б. Я. Коган. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. ГИФМЛ, М., 1963.
3. Л. Т. Кузин. Расчет и проектирование дискретных систем управления. Машгиз, М., 1962.
4. М. Л. Липатов. Исследование дискретных систем автоматического управления на электронных моделирующих установках непрерывного действия. «Вопросы радиоэлектроники», серия XII, вып. 7, 1963.
5. Н. Я. Ситко. Оценка цифровых корректирующих устройств из условия их реализации. Сб. «Автоматические системы со счетно-вычислительными устройствами». КВАНУ им. Кирова, 1964.
6. Юлиус Т. Ту. Цифровые и импульсные системы автоматического управления. Машгиз, М., 1964.
7. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. ГИФМЛ, М., 1963.
8. М. А. Шнайрман. Моделирование импульсных систем автоматического регулирования. Труды конференции по теории и применению дискретных автоматических систем. М., 1958.