

История создания и применения ГВС-100

А.А. Менн

Введение.

Первые работы по созданию Гибридной вычислительной системы, которые несколько позже переросли в проект ГВС-100, начались в 1968 году. Инициаторами проекта стали сотрудники двух лабораторий Института автоматики и телемеханики (ИАТ) АН СССР (с 1969 года Институт проблем управления), образовавшиеся из лаборатории, которую возглавлял директор ИАТ академик В.А. Трапезников. Трапезников в это время оставил руководство лабораторией, т.к. совмещал работу руководителя Института с должностью первого заместителя Государственного комитета по науке и технике (ГКНТ). Трапезников поддержал идею объединения в единую вычислительную систему аналоговой и цифровой вычислительной машин, поскольку советская промышленность и Институт в частности столкнулись с проблемами резкого усложнения систем управления многими технологическими процессами. Для управления стали широко применяться цифровые контроллеры и управляющие ЭВМ. Требовалось найти техническое решение для отработки алгоритмов и практической реализации систем управления объектами, динамическое поведение которых на имевшихся тогда цифровых машинах не удавалось моделировать в реальном масштабе времени. Поэтому задачи моделирования объектов планировалось возложить на аналоговые машины (АВМ) с тем, чтобы исследуемые алгоритмы управления программировать на цифровой части ГВС. Передача управляющих воздействий на АВМ и получение сигналов обратной связи осуществлялись через многоканальные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Советская электронная промышленность к началу 70-х годов прошлого века начала отставать от ведущих стран мира. Именно поэтому В.А. Трапезников от имени ГКНТ предложил организовать совместную разработку и опытную реализацию ГВС-100 (HRS-100) Институту проблем управления и Институту Михаила Пупина СФРЮ. Институт Михаила Пупина обладал большим опытом разработки вычислительных элементов как аналоговых, так и цифровых машин, используя недоступную в то время в СССР электронную базу ведущих компаний мира.

С другой стороны, в Советском Союзе имелись серьезные научные исследования в области построения разнородных вычислительных систем и оценки их вычислительного потенциала [1], а главное, в области разработки вычислительных методов и методик организации вычислительного процесса для моделирования и управления объектами, имеющими различную физическую природу [2,3,4,5].

Работы по проектированию ГВС-100 возглавил Борис Яковлевич Коган. С югославской стороны работы курировали заместитель директора Института Пупина Петер Врбавец и руководитель отдела вычислительной техники Георгий Константинов.



На фотографии в первом ряду: П. Врбавец и Б. Коган, во втором ряду, слева направо: Г.Константинов, А.Казьмин – заместитель Б.Когана по лаборатории, А. Менн – разработчик транслятора с Ассемблера, системы внутренней диагностики ГВС и системы отладки программ на гибридной вычислительной системе, югославские разработчики С. Ойданич, Д. Христович, М. Грушка, Ч. Миленкович.

К сожалению, на фото отсутствуют С. Марьянович, который совместно с Ю. Петренко и Э. Альперовичем внесли огромный вклад в разработку высокоточных усилителей и решающих элементов аналоговой подсистемы, а также разработчик системы параллельной логики и селектора быстрого доступа к регуляторам коэффициентов АВМ Н. Михайлов, разработчик системы управления внешними накопителями В. Лысиков, разработчики трансляторов с языков высокого уровня (Fortran, Nitran) А. Усков и В. Деца, разработчик базовых элементов операционной системы ГВС С. Виленкин.

Структурные принципы построения ГВС-100.

Перед разработчиками ГВС-100 был поставлен ряд новых задач как для аналоговых, так и цифровых подсистем:

- При моделировании одной и той же системы часто бывает необходимо одновременно исследовать быстропротекающие и инерционные процессы. Поэтому вычислительные элементы АВМ должны были сочетать высокую точность для воспроизведения медленно изменяющихся процессов с высоким быстродействием для моделирования скоротечных процессов. В отдельных случаях совместить точность и быстродействие не удавалось. Поэтому в АВМ присутствовали два типа решающих элементов: более высокочастотные и более точные. В первую очередь это касалось нелинейных решающих элементов: множителей и функциональных преобразователей.
- Цифровая компонента (ЦВМ) должна была моделировать сразу множество цифровых контроллеров, каждый из которых отвечал за регулирование отдельных переменных величин технологического процесса. Поскольку параллельных цифровых систем в то время не существовало, универсальная ЭВМ

должна была быстро переключаться с вычислительного процесса, имитирующего один контроллер, на другой. Поэтому для реализации быстрого переключения между вычислительными процессами была разработана специальная уникальная система прерываний. Эта система имела значительно больший, чем обычно, объем сверхоперативной памяти на полупроводниковых регистрах, где с большой скоростью запоминались, а затем восстанавливались параметры прерываемых процессов. Дополнительно были встроены специальные таймеры, которые можно было программировать на интервалы переключения с одного вычислительного процесса на другой.

- Очень часто возникала потребность быстро получить хотя бы приближенные значения исследуемых величин, чтобы затем с течением времени их уточнить. Это потребовало большого количества каналов (64 канала) аналого-цифрового преобразователя (АЦП), позволявшего квазипараллельно, с большим быстродействием снимать и сохранять параметры, чтобы затем посредством цифровой машины получать более точные решения, требующие большего времени вычисления по сравнению с реальным. Иногда преобразования дискретной информации в аналоговую и дискретизация аналоговой (ЦАП) должны производиться в процессе работы ГВС практически все время, что потребовало полной автоматизации их работы. Автоматизация, в частности, предусматривала возможность осуществлять автоматический запуск преобразования АЦП и ЦАП либо в зависимости от достижения пороговых значений величин, либо по запрограммированным квантам времени.
- К АВМ, работающей в составе гибридной вычислительной системы, были предъявлены повышенные требования по быстродействию не только самих решающих элементов, но и элементов системы управления. Особенно это относится к времени настройки модели. Например, при решении итерационных задач часто приходится менять коэффициенты дифференциальных уравнений, набранных на АВМ. Очевидно, в АВМ в этом случае должен быть соответствующий по быстродействию селектор. Селектор был впервые применен в АВМ. Помимо выбора потенциометров, чтобы задать с их помощью нужное значение коэффициента, селектор позволял обеспечивать выбор решающих элементов, которые должны были подключаться к АЦП.
- Для объектов, модель которых описывается уравнениями в частных производных, например, при моделировании нестационарных режимов течения газа, кроме АВМ к цифровой части можно было подключать аналоговые резисторные сетки. Методы решения таких задач на ГВС отработывали В. Назарова и К. Кениг.

Структурная схема ГВС-100 показана на рис. 1.

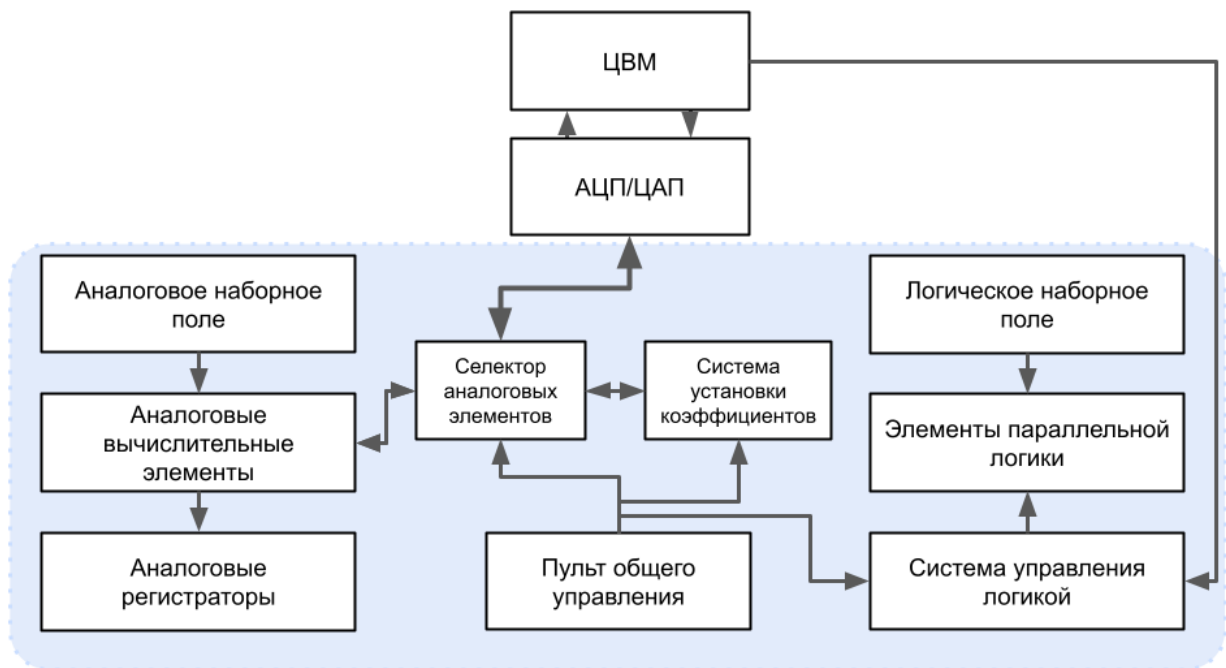


Рис. 1. Структурная схема ГВС-100.

На рис. 1 выделены основные элементы АВМ. В гибридную систему допускалось подключать до 7 АВМ, объединяемых общим пультом управления.

ЦВМ, кроме оригинальной системы прерываний, включавшей 32 канала, и специальной шины обмена данными с АЦП и ЦАП, была разработана по традиционной для того времени схеме и имела средние характеристики по объему памяти и быстродействию:

- Одноадресные команды;
- Оперативная память с общим полем хранения программ и данных с длиной поля 36 бит (32 бита данных, 1 бит четности, 3 бита защита ячеек команд, идентифицирующих команды операционной системы и до 7-ми приложений);
- Оперативная память была построена на модулях с магнитным сердечником и обладала быстродействием доступа 0,9 мкс;
- 32 разрядная длина полей для работы с данными с плавающей запятой;
- Внешняя память включала 8 модулей CDC 9432D дисковых накопителей со съемными носителями. Общая вместимость внешней памяти была равна 6,144,000 32 разрядных слов;
- Среднее время доступа к внешним данным – 100 мс;
- Периферийные устройства включали считыватель перфокарт (до 300 карт в мин), телетайп и скоростной принтер (до 700 строк/мин, 132 символа в строке).

Разработке интерфейса между ЦВМ и АВМ уделялось особое внимание, так как он по быстродействию и функционалу должен был подстраиваться под особенности любых контроллеров управления технологическими процессами для обмена логическими и аналоговыми сигналами. Интерфейс включал:

- Аналогово-цифровое преобразование, которое осуществлялось 64 канальным 14-битным аналого-цифровым преобразователем со скоростью до 70000 отсчетов/с;
- Коммутатор АЦП;
- Цифро-аналоговое преобразование, которое выполняли 16 независимых 14-битных устройств. Типичное цифро-аналоговое преобразование занимало 2 мкс;
- 16-битный тактовый генератор 100 мкс;
- 8 линий прерывания для переключения вычислительного процесса в ЦВМ;
- 32 линии передачи логических сигналов.

АВМ системы ГВС-100 содержала все элементы, необходимые для автономного решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений. Основные блоки АВМ:

- Аналоговые решающие элементы. Линейные аналоговые компьютерные элементы обеспечивали точность 0,01% в статическом режиме и 0,1% в динамическом режиме на частотах сигналов до 1 кГц. Точность нелинейных элементов была немногим лучше 0,1%;
- Параллельные логические элементы, обеспечивавшие решение итерационных задач;
- Система управляемых электронных потенциометров для установки коэффициентов дифференциальных уравнений;
- Сменное наборное поле для коммутации аналоговых и логических элементов;
- Селектор, коммутировавший выходы и входы решающих элементов со входами и выходами аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей;
- Внешние устройства АВМ: плоттер, многоканальный самописец и трехцветный осциллограф.

На фотографии ниже представлен общий вид одной из трех выпущенных ГВС-100.



Программное обеспечение ГВС-100 не отличалось большим разнообразием. Была разработана однозадачная операционная система, хотя структура ЦВМ предполагала мультизадачность. Впрочем, это не было большим ограничением поскольку природа АВМ предполагает однозадачность. Были разработаны два транслятора для языков: Ассемблер и Фортран. Специально для ГВС было сделано расширение стандартного Фортрана – HYTRAN. HYTRAN позволял программировать обмен информацией между АВМ и ЦВМ за счет обращения к специально созданной библиотеке макросов (в терминологии сегодняшнего дня к библиотеке скриптов).

Самым оригинальным элементом программного обеспечения был гибридный отладчик. Отладчик позволял отслеживать ход выполнения операций одновременно в цифровой и аналоговой частях ГВС. Это был первый в мире инструмент с подобной функциональностью, который многократно ускорял подготовку задач к решению.

Применение ГВС-100.

В Институте проблем управления ГВС-100 использовали для исследований в ряде перспективных направлений:

- Ф. Гулько и Ж. Новосельцева отработывали систему управления посадкой самолетов на палубу кораблей в ситуации сильного волнения, при котором необходимо постоянно менять траекторию захода на посадку. С помощью ГВС была разработана новая методика посадки и даны рекомендации по изменению формы представления информации на мониторе пилота.
- Б. Коган, А. Петров, В. Зыков обнаружили существование спиральных волн в модели сердечной мышцы. Позднее эти результаты были полностью подтверждены в ходе физиологических экспериментов. С помощью ГВС-100, механизмы возникновения и существования стационарных спиральных волн изучались на математической модели.

- А. Петров, И. Сирота, С. Кузьмин исследовали траектории и алгоритмы управления роботом на основе видеоинформации, что было одной из первых работ с автономными роботами.
- Институт Катализа СО АН СССР, где был установлен второй экземпляр ГВС-100, решал под руководством М. Слинько несколько сложных задач, в частности, моделирование процессов переноса в полимерном зерне, и осуществлял после модельных исследований подключение к цифровой подсистеме ГВС-100 экспериментальной установки для изучения процессов массопереноса от твердых частиц к жидкости. При подключении экспериментальной установки выявились архитектурные достоинства ГВС, так как трудоемкость подобных экспериментов на универсальных ЦВМ оказывалась несравнимо большей.
- Третий гибридный комплекс был установлен в Конструкторском бюро гражданской авиации. На базе этого комплекса под руководством А. Казьмина и А. Менна был создан тренажер для обучения летного состава взлету и посадке. Этот комплекс проработал более 10 лет для нескольких моделей самолетов.

Значение работ по ГВС-100 для будущего.

Работы над проектом ГВС-100 оказали частично прямое, но большей частью опосредованное влияние на дальнейшие работы в области вычислительной техники и моделирования. На идеях ГВС-100 был разработан и выпущен относительно большим тиражом (более 50 комплектов) гибридный комплекс ГВС-Русалка. В качестве цифровой подсистемы использовалась управляющая ЭВМ М-400. Эта ЭВМ обладала значительно более серьезным программным обеспечением по сравнению с ГВС-100, но функционал сопряжения с АВМ уступал по многим позициям. Архитектура ГВС-Русалка была близка к своему советско-югославскому предшественнику. Гибридные комплексы «Русалка» были установлены во многих КБ авиационного и космического профиля для обучения летного состава, отработки управления в экстремальных режимах работы, улучшения эргономики приборных панелей.

Работы по тренажерам оказались одними из первых в мире в привлекающей ныне всеобщее внимание тематике «цифровые двойники». Даже самые продвинутые математические модели не могут в точности повторять поведение физического объекта. Поэтому чем сложнее объект, управлению которым обучается оператор, тем меньше уверенности, что оператор, обучившийся на модели, не будет допускать ошибок в управлении физической системой. На ранних стадиях эры «цифровых двойников» самые квалифицированные пилоты, получившие представление об объекте на модели, а затем испытавшие реальный полет, давали рекомендации, как устранить несхожесть модели по своим физиологическим ощущениям. Обычно приближения добивались дополнительной настройкой модели на АВМ. Конечно, сегодня столь медленный итерационный процесс заменен на машинное обучение модели на основе реальных данных, получаемых от датчиков, установленных на физическом объекте. Но последовательность шагов доводки модели обучением «электронного двойника» сохранилась.

Еще одним важным наследием ГВС является подход к построению интерфейсов между разнородными вычислительными компонентами. На близком расстоянии до широкого практического применения находятся квантовые компьютеры.

Конструкторы квантовых процессоров уже не раз обращались к опыту сопряжения управляющих ЭВМ с аналоговыми машинами. Естественно, техника совершенно другая. Но набор вопросов, на которые приходится искать ответы в новых условиях, остался очень близким к ранее исследованным.

Литература.

1. Б. Я. Коган, А. А. Менн. «Об использовании потенциального быстрогодействия аналоговых вычислительных машин в гибридных вычислительных системах», Автомат. и телемеханика, 1976, выпуск 12, 143–155.
2. Е. Козловский «Кибернетика в бурении», Недра, Ленинград, 1972.
3. В. Зыков «Исследование циркуляции волн в двумерной возбудимой среде, методом математического моделирования на ГВС», Диссертация кандидата физико-математических наук, Москва, 1976.
4. M. Slinko. «The history of the development of mathematical modeling of catalytic processes and reactors». Theoretical foundations of chemical technology, 2007, vol. 41, no. 1, p. 16-34.
5. Б.Я. Коган, А.А. Петров, В.Б. Тулепбаев, И.Б. Тур, И.М. Сирота, С.А. Кузьмин, С.В. Шероколава «Гибридный моделирующий комплекс для полунатурных исследований систем управления адаптивными роботами. - Тез. докл. II Всес. совещ. по робототехническим системам. М.: Наука, 1981, с.131-132.
6. Б. Коган, А. Менн «ГВС-100, архитектура и принципы построения», ИПУ АН СССР, Москва, 1974.
7. М. Дудкин, А. Казьмин, А. Менн «Гибридный отладчик программ для ГВС-100», ИПУ АН СССР, Москва, 1974.