Л. В. Цукерник (Институт электродинамики АН УССР)

О методах сравнения и апробации программ решения на ЦВМ сложных задач анализа режимов электроэнергетических систем

Быстро расширяющееся применение ЦВМ для решения сложных научно-технических (технико-экономических) задач и связанная с этим интенсивная разработка соответствующих программ расчетов вызывают острую необходимость развития и систематизации методов сравнения и апробации программ с установлением нормативного порядка проведения этой важной работы. При отсутствии таких методов систематизации возникает опасность получения значительного ущерба от использования результатов расчетов по программам, которые дают неверные решения (алгоритм составлен правильно, но его программная реализация ошибочна) или решения, погрешность которых для различных условий неизвестна даже в предположении отсутствия погрешности в исходных данных (алгоритм программы использует приближенные методы, допустимость применения которых для сложных задач не проверена).

В настоящее время в литературе и в практике работы различных организаций имеют место произвольные необоснованные оценки программ расчетов на ЦВМ, в особенности при сравнении программ, предназначенных для решения задач одинакового типа. Предлагаемые методы сравнения и апробации программ расчетов на ЦВМ основываются на следующем.

Разработка и использование библиотеки типовых контрольных задач. Необходимо разработать типовые контрольные задачи для расчетов, имеющих большое значение и широкое использование. Такая работа может проводиться по инициативе заинтересованных организаций или по поручению соответствующих ведомств. Авторы-разработчики рассылают разработанные проекты по отдельным группам задач заинтересованным организациям и созывают совещания для их обсуждения. Каждая типовая контрольная задача должна состоять из двух частей. В первую часть включаются сравнительно простые контрольные примеры, по которым приводятся все необходимые исходные данные и соответствующие, тщательно проверенные результаты расчетов, выполненных авторами, разрабатывающими задачи. Первая часть типовых контрольных

задач, которую в дальнейшем будем называть «образцовой», непосредственно используется для обязательной проверки всех программ, относящихся к задачам данного типа. В случае получения неудовлетворительного результата проверки программы по образцовой части контрольной задачи дальнейшая проверка не проводится.

Во вторую часть типовых контрольных задач, которую в дальнейшем будем называть «модифицируемой», включаются только достаточно подробные указания по составлению сложных контрольных заданий, по которым в ряде случаев могут отсутствовать результаты предварительно выполненных эталонных расчетов.

Модифицируемая часть должна содержать указания для составления следующих контрольных заданий.

1. Наиболее характерные (по содержанию) варианты заданий, удовлетворяющие такому требованию, при котором идентичные задания могут быть рассчитаны по всем проверяемым одновременно программам, предназначенным для решения задач одинакового типа. Если имеется уже ранее проверенная программа или программа, успешно применяемая для практических расчетов, необходимо, чтобы указанные выше задания могли быть рассчитаны и по одной из таких программ для непосредственного сравнения результатов.

2. Аналогичные по характерности содержания задания, но соответствующие предельной сложности и предельному объему задач, решаемых по проверяемым программам (согласно инструкциям по применению этих программ). Если составление и расчет контрольных заданий предельной сложности и предельного объема слишком затруднены (в особенности для программ, использующих внешнюю память ЦВМ), допускается снижение сложности и объема заданий до приемлемого вида, что отмечается в выводах по проверке программ. Для программ, использующих только оперативную память ЦВМ, желательна, как правило, проверка их предельных параметров. Непосредственное сравнение результатов расчета по разным программам для контрольных заданий большой или предельной сложности (и объема) осуществляется лишь в тех случаях, если программы допускают идентичные (или достаточно близкие) задания. Но проверка программ в отношении сложных и больших заданий должна подтвердить работоспособность программ.

В указаниях по составлению заданий должны содержаться также рекомендации по выбору исходных данных.

В процессе проверки или сравнения программ может возникнуть мотивированное предложение о дополнении ранее составлен-

ных контрольных задач другими задачами, удовлетворяющими изложенным выше требованиям. Такое предложение, если оно содержит конкретно составленные «образцовые» задачи с результатами их решения, которые могут быть сравнительно легко проверены, или «модифицированные» задания, следует принять. Мотивировка предложения должна пояснить, какие вопросы будут дополнительно выяснены при проверке программ с помощью предлагаемых контрольных заданий.

Библиотека типовых задач должна находиться в головных вычислительных центрах и систематически пополняться в результате накопления опыта проверки и использования программ. В частности, после того как по «модифицированным» контрольным заданиям, не имевшим ранее результатов расчета, такие результаты будут получены (например, при проверке соответствующей программы), их следует включить в библиотеку типовых задач.

Библиотека типовых задач должна быть доступна для всех заинтересованных организаций.

Организация проверки и сравнения программ расчетов на ЦВМ. Проверка и сравнение программ расчетов на ЦВМ должны систематически осуществляться головными вычислительными центрами при участии представителей организаций, разработавших программы. Предварительно, после окончания разработки программ, эти организации обязаны провести их проверку, пользуясь библиотекой типовых задач. Проверка производится комиссией, назначаемой руководителем организации, причем в комиссию, по взаимному согласованию, могут включаться представители других заинтересованных организаций.

Передаваемые для проверки и сравнения программы (с дополнительными материалами) должны быть подготовлены в соответствии с инструкцией по оформлению алгоритмов, программ и инструктивно-методических материалов, представляемых в Государственный фонд алгоритмов и программ.

Перфокарты или перфоленты программ и исходных данных контрольных задач представляются организацией, разработавшей программу. Независимо от этого, одна из организаций, участвующих в проверке программ, должна подготовить на основе текста программ и контрольных задач второй комплект перфокарт или перфолент. После сверки этих комплектов, выяснения и устранения возможных недоразумений и ошибок перфокарты или перфоленты передаются комиссией для расчетов на ЦВМ.

Расчеты на ЦВМ контрольных заданий, по которым нет ранее полученных результатов, дублируются до получения двух одина-

ковых результатов по каждой проверяемой программе. Дублировать расчеты желательно в разные дни или на других ЦВМ.

Все этапы проверки программ, контрольные задания и выводы комиссии фиксируются в протоколе (отчете). В нем же указывается организация, которой поручается хранение проверенных программ, перфокарт, перфолент и результатов контрольных расчетов; вторые экземпляры хранятся у организации, разработавшей программу.

Кроме того, для каждого контрольного задания в протоколе фиксируется машинное время, затраченное на решение задачи с подразделением, если возможно, на время ввода, счета и выдачи результатов. При оценке различных программ с достаточно конкретной мотивировкой могут также сравниваться сложность подготовки исходных данных; отклонение в решении идентичных заданий; форма выдачи результатов; работа за пультом ЦВМ при использовании программы; использование внешней памяти ЦВМ и предельные параметры программ.

Отзывы об уже имеющемся опыте практического применения программы, представленные комиссии по ее проверке, приводятся в приложении к протоколу (отчету).

Разработка и использование эталонных программ расчетов на ЦВМ. Программы расчетов на ЦВМ, предназначенные для решения типовых задач (или группы типовых задач) наиболее точными методами, разработанными ко времени создания этих программ и тщательно проверенными в соответствии с предлагаемыми рекомендациями, можно назвать «эталонными» с обязательным указанием ограничений в отношении рассматриваемых задач.

Эталонные программы даже при рациональной программной реализации принятых для них методов расчета могут оказаться малопригодными для широкого применения, например, из-за небольших предельных параметров решаемых задач, а в случае больших предельных параметров — из-за необходимости сравнительно большого машинного времени расчета на ЦВМ, сравнительно сложной подготовки исходных данных и т. п. Основное назначение этих программ — выяснение возможности внесения различных упрощений в методы решения сложных задач, а также обеспечение контрольных расчетов и возможности накопления для библиотеки типовых задач эталонных решений, используемых при проверке программ расчетов для ЦВМ в соответствии с настоящими рекомендациями.

Ориентировочный перечень заданий для разработки эталонных программ составляется одновременно с разработкой типовых за-

дач. Заинтересованные организации могут разрабатывать эталонные программы по собственной инициативе.

Большое значение имеет тщательная проверка эталонных программ, которая, по существу, может являться в ряде случаев специальной научно-исследовательской работой. Она предварительно может выполняться организацией, разрабатывающей программу, совместно с головным вычислительным центром или другой авторитетной организацией, а в заключительной стадии работы — комиссией, составленной из представителей нескольких заинтересованных организаций, которая выносит заключение о целесообразной области применения эталонной программы.

Библиотека эталонных программ создается в тех же организациях, в которых создается библиотека типовых задач. Эта библиотека систематически дополняется, в особенности материалами по опыту использования программ.

На основе практического использования и проверки обычных программ расчетов на ЦВМ могут даваться рекомендации о возможности применения этих программ (в полном объеме или в определенной части алгоритма) в качестве эталонных. Эти решения должны выноситься авторитетными комиссиями по проверке программ.

Методика построения типовых задач анализа режимов энергосистем. Рассмотрим конкретные методические рекомендации для построения типовых задач анализа режимов энергосистем, охватывающих группы программ расчетов на ЦВМ установившихся электрических режимов, статической и динамической устойчивости (электромеханических переходных процессов) и токов короткого замыкания.

Образцовые части соответствующих типовых задач, включая их решения, могут быть легко получены для сравнительно простых схем энергосистемы: например, для двух синхронных генераторов (станции) с местными нагрузками, работающих через линию электропередачи на приемную систему, состоящую из нагрузки и станции, в расчетах устойчивости и переходных процессов, или электрической сети с двумя-тремя замкнутыми контурами — в расчетах установившихся электрических режимов и токов короткого замыкания.

Усложнение расчетных схем в модифицируемой части типовых задач может быть получено следующим образом.

Для расчетов устойчивости и переходных процессов простая образцовая схема используется как звено сложной схемы, состоящей из ряда аналогичных (идентичных) звеньев, соединенных

между собой в одной точке. Такой точкой в расчетах динамической устойчивости и переходных процессов является место приложения возмущения (например, короткого замыкания) в простой образцовой схеме. В расчетах статической устойчивости общей точкой является узел сети, в котором соединены для параллельной работы две передающие станции исходной простой схемы. Станция приемной системы в сложной схеме представляется одной машиной, мощность которой увеличивается пропорционально числу соединяемых образцовых звеньев и соответственно пересчитываются ее параметры (сопротивления, постоянная инерции и др.). Таким образом, получается сложная система с внутригрупповой симметрией [9], для которой групповое и внутригрупповое движение, а следовательно, условия устойчивости и переходный процесс должны быть идентичны тому, что было рассчитано для исходной простой образцовой схемы. Это позволяет легко проверить, правильно ли работает соответствующая программа расчета на ЦВМ при переходе от простой контрольной задачи к задаче предельного или промежуточного (по сложности расчетной схемы) объема.

На основе теории подобия [1] возможны и другие способы усложнения расчетных схем, составляемых из простых звеньев, параметры которых могут изменяться при условии сохранения соответствующих критериев подобия. При этом условия устойчивости и переходный процесс сложной системы будут определяться показателями, рассчитанными для сравнительно простых исходных звеньев.

Аналогично, достаточно очевидными способами, может быть осуществлено симметричное или несимметричное усложнение расчетных схем с использованием простых исходных звеньев для модифицируемой части типовых задач при проверке программ расчета на ЦВМ установившихся режимов и токов короткого замыкания электрических сетей. Однако описанный метод наращивания расчетных схем, хотя и дает возможность проверить программы для схем предельного объема, не позволяет все же внести в контрольное задание некоторые усложнения в расчетные условия, которые не могут быть предусмотрены в исходных простых схемах, так как они связаны со спецификой сложных заданий (некоторые вопросы оптимизации режимов и схем, автоматизации многовариантных расчетов и т. п.). Для этих случаев весьма эффективным является метод проверки модифицированной части типовых задач с помощью двух и более программ, составленных по принципиально различным алгоритмам. Так, для расчетов установившихся режимов уже имеются программы, использующие в алгоритме итерационные

методы решения уравнений узловых напряжений [3, 6] или уравнений токов и напряжений сети с условно разомкнутыми и затем замкнутыми контурами [10], для расчета токов короткого замыкания также есть программы, использующие в алгоритме различные методы решения контурных или узловых уравнений или метод наращивания схемы сети [5, 7, 8]. Большое разнообразие алгоритмов зарубежных программ расчетов на ЦВМ охарактеризовано в обзоре [2].

Совпадение результатов расчетов по программам, построенным на основе совершенно различных алгоритмов, является достаточным критерием правильности работы программ. В случае расхождения результатов дополнительным анализом можно выяснить, находится ли расхождение в пределах различной точности расчетов, обеспечиваемой сравниваемыми программами, или расхождение связано с неправильной работой программ. При этом необходимо иметь в виду, что для некоторых задач в зависимости от применяемых алгоритмов расчета могут получаться различные решения, каждое из которых формально является правильным [4]. Программы оптимизации решения проектных или эксплуатационных задач целесообразно во всех случаях проверять прямым методом, т. е. получив при помощи исследуемой программы решение типовой задачи, определившее искомые оптимальные значения параметров, задать отклонения от этих оптимальных значений и убедиться, что соответствующая целевая функция параметров (расчетные затраты, расход топлива, потери в сети и т. п.) изменится в неблагоприятную сторону. Такие контрольные расчеты могут быть выполнены и не по тем программам, по которым рассчитывалась задача с оптимизацией решения, выполнение их в большинстве случаев не представляет затруднений.

При составлении модифицируемой части типовых задач для сравнения программ с различными алгоритмами следует учесть, что преимущества того или другого алгоритма могут быть связаны с особенностями задания. Например, при итерационном методе расчета потокораспределения или токов короткого замыкания и при прочих равных условиях программа, использующая метод узловых напряжений, будет требовать меньшего машинного времени при увеличении связанности сети (включение линий между узлами), а программа, использующая метод условного размыкания контуров сети,— при уменьшении связанности сети (отключение линий между узлами). Поэтому типовые задачи при сравнении таких программ должны предусматривать задания как с большой, так и с малой степенью связанности узлов в расчетной схеме сети.

Аналогично этому как для указанных, так и для других программ (например, расчета устойчивости) при разных алгоритмах степень симметрии расчетных схем энергосистемы может влиять неодинаково. В таких случаях типовые задачи также должны предусматривать два задания — с большей или меньшей степенью симметрии расчетных схем. Задание полностью симметричной схемы хотя и не будет соответствовать реальным системам, но может быть весьма полезным с точки зрения простоты определения контрольных результатов расчета.

Изложенные рекомендации позволяют в достаточной мере правильно решать практические вопросы, возникающие при составлении заданий для проверки и сравнения программ решения на ЦВМ широкого класса задач.

Литература

1. Веников В. А. Теория подобия и моделирование. «Высшая школа», М., 1966.
2. Веников Г. В., Строев В. А. Применение математических методов и средств вычислительной техники в проектировании и эксплуатации энергетических систем. «Энергия», М., 1965.
3. Качанова Н. А., Умедьян В. В.— Расчеты установившихся режимов сложных энергосистем (на вычислительной машине «Урал-2»).—Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и транспорт, 1963, 4.
4. Ковшар Л. Г., Коробчук К. В., Цукерник Л. В.— К вопросу об однозначности результатов и сходимости итерационного расчета установившегося электрического режима энергосистемы.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1966, 4.
5. Крылов В. А. и др. Расчет на ЦВМ трехфазных коротких замыканий итерационным методом узловых напряжений.— Энергетика и электрификация, 1967, 3.
6. Фазылов Х. Ф. Теория и методы расчета электрических систем. Изд-во АН УзССР, Ташкент, 1953.
7. Хрущова Е. В., Милях А. Н. Расчет токов короткого замыкания в сложных энергосистемах на цифровых вычислительных машинах. Изд-во АН УССР, К., 1962.
8. Хрущова Е. В., Крылов В. А., Ватулева Н. З. Применение ЦВМ для расчетов т.к.з. в сложных энергосистемах по параметрам узловой сети.— Электричество, 1964, 2.
9. Цукерник Л. В.— Устойчивость связанной системы автоматического регулирования при внутригрупповой симметрии.— Изв. АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика, 1959, 4.
10. Щербина Ю. В. Расчет оптимального распределения реактивных мощностей в электрических сетях энергосистем с помощью электронных цифровых вычислительных машин. Автореферат канд. дисс. КПИ, К., 1963.