11.4. Повышение надежности вычислительных средств

Надежность вычислительных средств во многом определяет такие ее важнейшие показатели, как производительность, готовность, стоимость эксплуатации, достоверность решения задачи. От надежности зависит эффективность вычислительных средств и их качество.

Между тем инженер обычно располагает ограниченными возможностями, позволяющими создавать высоконадежные вычислительные комплексы. Это объясняется тем, что повышение надежности известными инженеру методами достигается за счет ухудшения других показателей качества, таких, например, как вес, габариты, стоимость. Обоснуем это положение.

Показатели надежности любого технического устройства, в том числе и вычислительного средства, зависят от числа элементов и их надежности, времени функционирования, вида избыточности и ее кратности, восстанавливаемости.

Решить проблему надежности вычислительной техники путем совершенствования ее элементной базы или варьирования временем ее функционирования практически невозможно. В этом легко убедиться, анализируя надежность вычислительного средства по такому показателю, как вероятность безотказной работы в течение времени *t.* Если предположить, что справедлив экспоненциальный закон надежности и отсутствует избыточность, то вероятность безотказной работы в течение времени *t* определяется выражением 1—*Nht,* где *N* — число элементов; λ — средняя интенсивность отказа элементов; / — время работы вычислительного средства.

На практике считают, что если некоторое событие совершается с вероятностью 0,997, то это событие достоверно. Тогда можно считать, что вычислительное средство абсолютно надежно, если Λ^λí^0,003. Это означает, что практически оно не будет отказывать в течение времени í<0,003/(Λ/λ).

Элементы современных вычислительных машин и систем .весьма надежны, интенсивности их отказов находятся в пределах 10^^-Ш^М/ч. Число элементов современных ЦВМ достигает нескольких десятков и сотен тысяч. Тогда время безотказной работы ЦВМ в указанном выше смысле составляет лишь единицы часов. Так как существенно уменьшить число элементов практически невозможно при современных принципах построения ЦВМ и систем, то для достижения абсолютно надежной работы машин в течение сотен часов необходимо уменьшить интенсивность отказов элементов на два-три порядка. Современная технология изготовления и приме* няемые материалы не позволяют создать элементы с такой высокой надежностью.

Теоретически можно создать сколь угодно надежную ВС путем введения избыточности в ее структуру и структуру математического обеспечения. В соответствии с принятой в настоящее время терминологией видами избыточности сложных систем являются: нагрузочная, временная, структурная, информационная. Рассмотрим их возможности, достоинства и недостатки.

Нагрузочная избыточность может быть реализована на практике при облегчении механических, тепловых, электрических и других нагрузок элементов» Уменьшение указанных нагрузок возможно за счет увеличения габаритов самих элементов или введения дополнительных конструкций. Этот метод может существенно повысить надежность механических или энергетических устройств, которая во многом определяется механической или электрической прочностью.

Существенно повысить этим методом надежность средств вычислительной техники не удается. Это объясняется следующим. Вычислительные средства предназначены для преобразования не энергии из одного вида в другой, а информации в соответствии с заданным алго-

ритмом. Так как для преобразования информации большие потери энергии не нужны, то элементы электроники современных ЦВМ находятся в слабо нагруженных ре-жимах и дальнейшее их облегчение практически не ведет к существенному уменьшению интенсивности отказов, а значит, и вероятности безотказной работы. . / Опыт эксплуатации электронной техники показывает, что интенсивность отказов элементов при ее хранении примерно на порядок ниже, чем при работе в реальных условиях эксплуатации. Это означает, что нагрузочная избыточность в пределе может снизить произведение *Nit* не более, чем в десять раз. А это означает, что такой метод дает возможность создавать вычислительную технику, работающую безотказно практически лишь в течение десятков часов, что не решает проблемы надежности вычислительных систем.

Одним из рациональных способов повышения вероятности правильного решения задачи за заданное время является введение временной избыточности. Технически это достигается повышением производительности средств вычислительной техники. Если требуется решить задачу за заданное время t_a, а вычислительная система позволяет ее решить при отсутствии отказов за время $t_p < t_3$, то разность $(t_a - t_p X)$ является избыточным временем, которое может быть использовано для борьбы с отказами, возникающими в процессе решения задачи. За счет избыточного времени можно либо восстановить отказавшее устройство, если'возник внезапный отказ, либо "исправить ошибки вычислений, если возник сбой. Чем выше производительность ЦВМ или ВС, тем больше избыточное время, а значит, выше вероятность правильного решения задачи.

Использование временной избыточности для борьбы с отказами ограничено. Это объясняется следующими двумя обстоятельствами:

— восстановление отказавшего устройства обычно требует значительного времени, а это означает, что для повышения вероятности правильного решения задачи за время, близкое к среднему времени восстановления, ЦВМ и ВС должны обладать значительной избыточностью;

— стремление к использованию временной избыточности не по прямому назначению, а для решения дополнительных задач неизбежно приводит к уменьшению

объема временной избыточности, а значит, и ее эффективности.

Использование временной избыточности для борьбы со сбоями может существенно повысить вероятность правильного решения задачи. В этом случае временная избыточность используется для исключения ошибочного решения путем повторных вычислений и сравнения результатов. Повторение вычислений может осуществляться по одним и тем же или разным алгоритмам. Могут использоваться также другие способы контроля правильности решения задачи (контрольные соотношения, тесты).

Следует иметь в виду, что введение временной избыточности фактически не ведет к повышению надежности средств вычислительной техники, так как число ее отказов и сбоев за заданное время не уменьшается. Скорее, наоборот, с повышением производительности при прочих равных условиях число отказов и сбоев увеличивается за счет возрастания электрических нагрузок динамического типа. Введение временной избыточности повышает не надежность вычислительной техники, а достоверность правильного решения задачи, в конечном итоге она позволяет с высокой достоверностью решать задачи на недостаточно надежных ЦВМ.

Наиболее рациональным способом использования временной избыточности для борьбы со сбоями является создание бессбойного математического обеспечения ВС, а также специальных языков программирования, позволяющих создавать программы, защищенные от сбоев. Так как вычислительные системы состоят из большого числа ЦВМ или процессоров и имеют общую память, то при случайном потоке заявок они неизбежно обладают временной избыточностью.

Технически реализовать избыточность ВС можно двумя путями: либо повышением быстродействия технических средств ВС, либо увеличением числа ЦВМ или ее устройств. Первый способ не позволяет существенно повысить временную избыточность, так как с ее увеличением возрастает количество сбоев. Кроме того, увеличение быстродействия имеет свои пределы, определяемые физическими свойствами элементов электроники. Второй способ теоретически не имеет ограничений и связан с необходимостью введения структурной избыточности.

Наиболее мощным средством повышения надежности

средств вычислительной техники, и в частности, вычислительных систем является резервирование или, точнее, структурная избыточность.

Покажем это на[1] примере общего резервирования с постоянно включенным резервом. Для этого случая выражения для вероятности безотказной работы $P(t)$, коэффициента готовности K_m и наработки на отказ t_{cv} имеют вид:

$$P(t)=\frac{4(\lambda/\mu)^2}{\beta}\left(\frac{e^{-s_1 t}}{\alpha-\beta}-\frac{e^{-s_2 t}}{\alpha+\beta}\right), \quad (11.1)$$

$$K_г=\frac{1+2\lambda/\mu}{1+2\lambda/\mu+2(\lambda/\mu)^2}, \quad (11.2)$$

$$t_{ср}=t_{сро}\left(1+\frac{\mu}{2\lambda}\right), \quad (11.3)$$

где λ —интенсивность отказов одной ЦВМ; μ —интенсивность восстановления одной ЦВМ;

$$\alpha=1+3\frac{\lambda}{\mu};\ \beta=\sqrt{1+6\frac{\lambda}{\mu}+\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2};$$

tcvo — наработка на отказ одной ЦВМ;

$$s_1=\frac{\mu}{2}(-\alpha+\beta);\ s_2=\frac{\mu}{2}(-\alpha-\beta).$$

Формулы получены по методике, изложенной в гл. 7, в предположении, что восстанавливает дублированную систему одна обслуживающая бригада.

Формулы для $P_0(t)$, *Kто, tcpo* нерезервированной ЦВМ . имеют вид:

$$P_0(t)=e^{-\lambda t};\ K_{г0}=\frac{1}{1+\lambda/\mu};\ t_{ср0}=\frac{1}{\lambda}. \quad (11.4)$$

Сравним резервированную и нерезервированную системы по указанным выше показателям.

Зависимость выигрыша надежности резервированной ЦВМ" по коэффициенту простоя от λ/μ имеет вид:

$$G_{K_п}=\frac{1-K_{г0}}{1-K_г}=\frac{1-2\lambda/\mu+2(\lambda/\mu)^2}{(2\lambda/\mu)(1+\lambda/\mu)}. \quad (11.5)$$

Эта зависимость приведена на рис. 11.1. Из рисунка и выражения (11.5) видно, что при малых λ/μ выигрыш $G_{Kп}$ может быть сколь угодно велик, с ростом λ/μ он уменьшается и в пределе стремится к единице. Таким образом, уменьшая λ/μ, можно добиться сколь угодно

большого выигрыша надежности. Так, например, при λ/μ=О,1 коэффициент простоя дублированной системы примерно в 5,5 раза меньше, чем нерезервированной,, а при λ/μ=0,01 —более чем в 50 раз.

Из (11.3) видно, что наработка на отказ растет линейно с ростом отношения μ/λ. Так, например, при λ/μ=0,1 наработка на отказ дублированной системы в 6 раз, а при λ/μ=0,01—в 51 раз выше, чем нерезервированной системы.

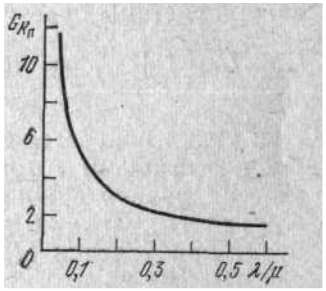

Рис. 11.1. Зависимость от λ/μ выигрыша надежности дублированной системы по коэффициенту простоя

На рис. 11.2 приведены зависимости вероятности безотказной работы от произведения *Ы.* Из этих зависимостей видно, что резервирование с восстановлением позволяет существенно повысить надежность средств вычислительной техники при высокой ее ремонтопригодности. Так, например, при *%t=l* вероятность безотказной работы нерезервированной системы равна 0,37, дублированной без восстановления — 0,6, а дублированной с восстановлением—0,95 при λ/μ=0,01 и 0,995 при λ/μ=0,001.

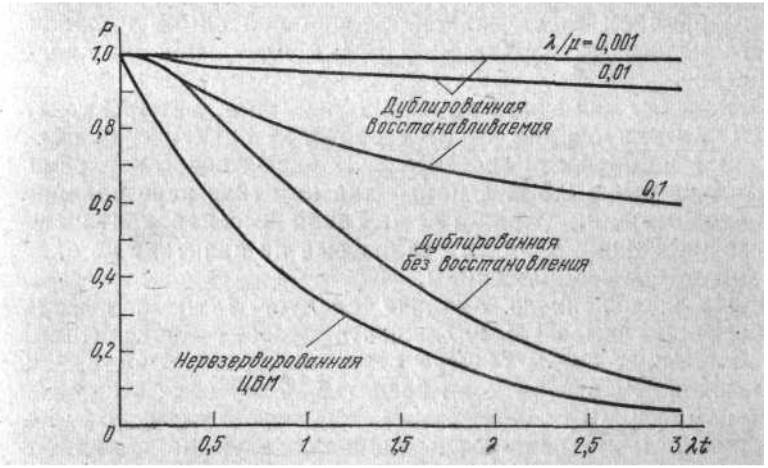

Рис. 11.2. Зависимости вероятности безотказной работы нерезервированной и дублированной ЦВМ от произведения *-м*

Несмотря на высокую эффективность резервирования с восстановлением, оно не может решить проблему надежности при дублировании ЦВМ. Наработка на отказ современных ЦВМ не превышает нескольких сот часов, а среднее время восстановления не меньше 0,5 ч. Тогда интенсивность отказов $\lambda=1/i_{O}\rho$—0,01—0,004 1/ч, а $\lambda/\mu=$ =0,005—0,002.

При этих показателях наработка на отказ дублированной системы будет:

$$t_{ср}=t_{ср0}\left(1+\frac{\mu}{2\lambda}\right)=(10\,000-62\,500)\ \text{ч}.$$

При таких показателях надежности и ремонтопригодности коэффициент готовности достигает величины, практически равной единице. Однако вероятность безотказной работы, равная 0,997, на основании (11.1) и рис. 11.2 будет при условии λí=&0,1, τ. е. в течение времени $t=$ =0,1/λ=10—25 ч, что примерно на два порядка ниже, чем требуется в ряде прикладных задач управления важными техническими объектами.

Решить проблему надежности путем уменьшения времени восстановления вряд ли возможно. Анализ выражения (11.1) показывает, что для. достижения вероятности безотказной работы, равной 0,997, в течение $t=$ =1000 ч среднее время восстановления машины не должно превышать 10 мин. Вряд ли возможно добиться такого времени восстановления даже при самой высокой организации эксплуатации ЦВМ и идеальной их диагностике.

Расчеты показывают, что только при четырехкратном резервировании удается добиться практически идеальной надежности системы, если время восстановления ЦВМ не выше 0,5 ч, а наработка на отказ нерезервированной машины равна 100 ч. Такая высокая кратность резервирования вряд ли реализуема на практике по экономическим соображениям.

Из проведенного анализа следует важный вывод: обеспечить высокую надежность средств вычислительной техники путем общего резервирования с постоянно включенным резервом не представляется возможным по экономическим соображениям. Расчеты показывают, что общее резервирование замещением также не позволяет добиться высокой надежности средств вычислительной техники. Следует иметь в виду, что такой метод неэффективен .еще и потому, что он снижает производительность ЦВМ, так как резервные машины не участвуют в вычислительном процессе.

Весьма эффективным методом борьбы со сбоями является резервирование с дробной кратностью т=1/2 (мажоритарное резервирование). Однако такой метод не позволяет создать высоконадежную вычислительную систему потому, что он малоэффективен в отношении отказов. Наработка на отказ системы, резервированной по принципу два из трех (т=1/2), выражается формулой

$$t_{ср}=t_{ср0}\ (1/2+\mu/6\lambda). \qquad (11.6)$$

Формула легко выводится по методике гл. 7.

Сравнивая (11.6) с (11.3), видим, что наработка на отказ при мажоритарном резервировании два из трех примерно в три раза меньше, чем при простом дублировании;- меньше также коэффициент готовности и вероятность безотказной работы. Таким образом мажоритарное резервирование экономически оказывается менее выгодным, чем общее резервирование с постоянно включенным резервом, а поэтому не дает возможности решить проблему надежности вычислительной техники.

Известно [76], что наибольший эффект дает раздельное резервирование на уровне элементов (деталей). Если предположить, что все элементы равнонадежны, то наработка на отказ дублированной системы при одной обслуживающей бригаде будет выражаться формулой

$$t_{ср}=\frac{1}{\lambda}\sum_{i=0}^{n}\left(\frac{\mu}{\lambda_0}\right)^{i}\prod_{k=1}^{i}\frac{1}{2k}\Bigg/\sum_{i=0}^{n-1}\left(\frac{\mu}{\lambda_0}\right)^{i}(n-i)\prod_{k=1}^{i}\frac{1}{2k}, \qquad (11.7)$$

где λо-—интенсивность отказов элемента; η — число элементов нерезервированной ЦВМ; μ — интенсивность восстановления элемента ЦВМ.

Формула получена нами по методике гл. 7. При расчетах по (11.7) необходимо принимать $\prod_{*=1}^{0}1/2k=1$.

Из (11.7) видно, что наработка на отказ поэлементно дублированной ЦВМ имеет порядок $/_{оо}=\eta/_{0}\rho\mu/(2\lambda)$, т. е. больше в η раз по сравнению с дублированной си-

стемой. Так как число элементов η современных ЦВМ велико (сотни тысяч), то наработка на отказ восстанавливаемой ЦВМ с поэлементным дублированием соизмерима с долговечностью машины. Расчеты показывают, что вероятность безотказной работы такой ЦВМ настолько высока, что машину можно считать идеально надежной в течение времени, равного тысячам часов.

Использование поэлементного резервирования для обеспечения надежности ЦВМ, несмотря на его высокую эффективность, крайне затруднительно. Это объясняется тем, что его техническая реализация практически невозможна при использовании современных элементов электроники. Электротехнические элементы имеют два характера отказов, поэтому при их последовательном или параллельном соединении повышается надежность от одного вида отказов (например, типа обрыва) и понижается от другого (короткого замыкания). Кроме того, при отказе элемента параллельного или последовательного соединения изменяется его основной параметр (сопротивление, емкость, коэффициент усиления и т. п.). Все это требует создания последовательно-параллельных или специальных мостиковых схем, которые в отношении надежности всегда представляют собой схемы с дробной кратностью резервирования. Выше было показано, что эффективность таких схем значительно ниже, чем схем с поэлементным резервированием. Следует также иметь в виду, что найти место неисправности мостиковых схем весьма затруднительно, поэтому может возрасти среднее время их восстановления, что крайне нежелательно. Чтобы этого не произошло, приходится резервировать не элементы, а узлы, что ведет к существенному снижению эффективности раздельного резервирования.

Из рассмотрения общих методов обеспечения надежности можно сделать следующий важный вывод: ни один из известных и широко используемых методов повышения надежности сложных систем не позволяет создать практически абсолютно надежные вычислительные машины и системы. Решить проблему надежности ВС можно иным путем.

Пусть вычислительная машина состоит из η равно--надежных элементов, каждый из которых имеет интенсивность отказов λ. И пусть машина сконструирована таким образом, что отказ / ее элементов не ведет к отказу всей машины. Предполагается, что восстановление

отказавших элементов с интенсивностью μ возможно в процессе работы машины. Тогда наработка на отказ такой ЦВМ выражается формулой:

$$t_{ср}=\frac{1}{(n-l)\lambda}\sum_{i=0}^{l}\frac{(n-l)!}{(n-l+i)!}\left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{i}. \qquad (11.8)$$

Так как $1/(\eta\lambda)$—наработка на отказ неизбыточной ЦВМ, то при малых / выигрыш надежности избыточной машины будет

$$G_{t_{ср}}=\frac{t_{ср}}{t_{ср0}}=\sum_{i=0}^{l}\frac{(n-l)!}{(n-l+i)!}\left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{i}. \qquad (11.9)$$

В практически важных случаях $\mu/\lambda>1$, тогда ^f ^ ^*α[μ/(ηλ)]K* Так как для современных ЦВМ отношение $\mu/(\eta\lambda)$^100, то уже при /=2 или 3 наработка на отказ избыточной ЦВМ или ВС будет иметь значение, близкое к идеальной долговечности машины или системы, т. е. близкое к идеальной надежности ЦВМ.

Из проведенного анализа видно, что для достижения практически идеальной надежности вычислительной системы Достаточно так ее сконструировать, чтобы отказ двух-трех элементов не приводил к ее отказу. При этом отказавшие элементы должны восстанавливаться в процессе работы ВС. Среднее время восстановления должно быть порядка нескольких десятков минут. Практически реализовать этот метод можно созданием ЦВМ с изменяющейся логической структурой ее автоматов и элементов памяти.

Итак, путями построения практически абсолютно надежных вычислительных машин и систем могут быть:

— введение структурной избыточности с помощью построения узлов, устройств и машин с изменяющейся логической структурой при возникновении отказов эле ментов;

— ремонт отказавших элементов (узлов, устройств) без нарушения функционирования ВС;

— создание бессбойного математического обеспече ния и программ, защищенных от сбоев.

Указанные перспективные методы могут быть реализованы в ближайшем будущем и дадут возможность решить проблему надежности средств вычислительной техники, и в частности, вычислительных систем.