

3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

При анализе факторов, влияющих на надежность, выявлено, что надежность объектов закладывается при проектировании и конструировании, реализуется при изготовлении и снижается при эксплуатации. Поэтому естественным является рассмотрение методов повышения надежности на этих трех этапах жизненного цикла АС.

Напомним, что надежность является комплексным, сложным свойством, состоящим в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Следовательно, и методы повышения надежности должны рассматриваться с позиции повышения этих четырех составляющих надежность свойств.

3.1. Классификация методов повышения надежности

Все способы повышения надежности КТС принципиально основываются на следующих методах:

- резервирование;
- уменьшение интенсивности отказов элементов системы;
- сокращение времени непрерывной работы системы;
- уменьшение времени восстановления элементов системы;
- выбор рациональной периодичности и объема контроля, диагностики и обслуживания систем.

Реализация указанных методов может осуществляться при проектировании и конструировании, изготовлении и в процессе эксплуатации оборудования.

Очевидно, что надежность систем в основном закладывается при проектировании, конструировании и изготовлении. От работы проектировщика и конструктора, в первую очередь, зависит, как будет работать оборудование в тех или иных условиях эксплуатации. Из этого вовсе не следует, что организация процесса эксплуатации не влияет на надежность объекта. При эксплуатации обслуживающий персонал может существенным образом изменить надежность системы, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

В процессе проектирования и конструирования используются *схемные и конструктивные способы* повышения надежности систем.

Схемные способы включают в себя:

- создание схем с минимально необходимым числом элементов;
- применение резервирования элементов;
- разработку схем, не допускающих последствий отказов элементов;
- оптимизацию последовательности работы элементов схемы;
- предварительный расчет надежности проектируемой схемы.

Уменьшение числа элементов при прочих равных условиях приводит к увеличению вероятности безотказной работы системы, а также благоприятно сказывается на ее массе, габаритах и стоимости. Однако при этом необходимо помнить, что сокращение числа элементов не должно увеличивать коэффициент нагрузки у оставшихся элементов, в противном случае эффект может быть прямо противоположным.

При создании схем с ограниченным последствием отказов применяется включение в схемы специальных защитных и предохранительных устройств, которые предотвращают аварийные последствия отказов.

Под оптимизацией последовательности работы элементов схемы понимается согласование тактов автоматической работы схем не только по времени, но и по достижении тем или иным параметром заданного значения.

В число *конструктивных способов* повышения надежности входит:

- использование элементов с малой величиной интенсивности отказов при заданных условиях эксплуатации;
- обеспечение благоприятного режима работы элементов;
- рациональный выбор совокупности контрольных параметров;
- рациональный выбор допусков на изменение основных параметров элементов и систем;
- защита элементов от вибраций и ударов;
- унификация элементов и систем;
- разработка эксплуатационной документации с учетом опыта применения системы, подобной конструируемой;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции (применение встроенных контрольных устройств, автоматизация контроля и индикация неисправностей, удобство подходов для обслуживания и ремонта).

Среди способов повышения надежности при производстве основными являются следующие:

- совершенствование технологии и организации производства, его автоматизация;
- применение инструментальных методов контроля качества продукции при статистически обоснованных выборках;
- тренировка элементов и систем.

Перечисленные способы повышения надежности должны применяться в совокупности с учетом влияния каждого из них на работоспособность системы. В тех случаях, когда меры противоречивы, нужно принимать компромиссное решение.

Способы повышения надежности систем, применяемые в эксплуатации, могут быть разбиты на две группы. В первую группу входят все изложенные методы. На основе изучения опыта эксплуатации инженер-эксплуатационник имеет возможность разработать ряд рекомендаций для проектировщиков и конструкторов, направленных на улучшение качества систем (изменение схемы, замена элементов, изменение конструкции, материалов и т.п.). Эти рекомендации согласовываются с конструкторами и вводятся специальными указаниями (доработками).

Однако нельзя считать, что в эксплуатации только устраняются ошибки конструктора и производства, хотя доля таких ошибок еще велика.

Вторая группа мероприятий, повышающих качество систем при эксплуатации, относится к воздействию обслуживающего персонала. К этим мероприятиям относятся:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- применение инструментальных методов контроля технического состояния систем;
- обоснование объема и сроков проведения профилактических мероприятий, основанных на применении методов теории надежности;
- обоснование сроков службы элементов и состава запасных резервов;
- разработка и внедрение способов прогнозирования неисправностей.

Ряд мероприятий по повышению надежности систем относится к категории организационных, например:

- постановка широких экспериментальных исследований надежности объектов на всех этапах их разработки, изготовления и эксплуатации;
- создание единой системы информации о работоспособности объектов;
- обоснование, выбор и включение в ТЗ норм надежности;
- организация доработок и рекламационная практика.

Очевидно, что приведенный перечень путей по повышению надежности объектов представляет собой весьма широкий комплекс мероприятий, в том числе требующих проведения в государственном масштабе.

3.2. Резервирование

В настоящее время резервирование является одним из самых распространенных и наиболее эффективных способов повышения характеристик надежности систем.

В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 «Надежность в технике. Термины и определения» *резервированием* называется применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов. При этом неисправный элемент заменяется исправным.

Резервирование непременно связано с введением *избыточности* – дополнительными средствами и возможности, сверхминимально необходимыми для обеспечения системы требуемым уровнем надежности. Задачей введения избыточности является обеспечение нормального функционирования объекта после возникновения отказа в его элементах.

Однако резервирование ведет к усложнению систем, увеличению их массы и стоимости. Поэтому перед конструктором стоит вопрос, каким образом зарезервировать систему, чтобы при допустимой массе, стоимости и габаритах получить максимальный выигрыш надежности.

При этом в настоящее время за критерий качества системы в смысле ее надежности принимается следующий: система считается абсолютно надежной, если отказ одного любого элемента не приводит к отказу всей системы. Реализация этого критерия на практике осуществляется путем поэлементного или поблочного резервирования.

Основные свойства резервирования:

1. Интенсивность отказов резервированной системы всегда начинается с нуля независимо от интенсивности отказов нерезервируемой системы. По мере увеличения времени эксплуатации системы, интенсивность отказов резервированной системы асимптотически стремится к интенсивности отказов нерезервированной системы. При *резервировании с дробной кратностью* интенсивность отказов резервированной системы при определенных значениях m и t может быть больше интенсивности отказов нерезервированной системы. Это означает, что система, у которой применено резервирование с дробной кратностью, может быть менее надежной, чем нерезервированная.

2. Выигрыш надежности по вероятности отказа тем больше, чем меньше интенсивность отказов нерезервированной системы, т.е. чем более надежная система резервируется. Это основное противоречие всякого резервирования. Оно приводит к тому, что для повышения надежности систем длительного использования необходима высокая кратность резервирования.

3. При схемной реализации любого резервирования, кроме *скользящего*, значительное увеличение массы системы приводит к менее значительному увеличению средней наработки до отказа.

3.3. Уменьшения интенсивности отказов элементов системы

Эффективными методами уменьшения интенсивности отказов элементов систем являются:

- применение наиболее надежных элементов;
- отбраковка («выжигание») малонадежных элементов системы;
- облегчение режимов работы элементов.

Выбор наиболее надежных элементов. При проектировании и конструировании систем недопустимо применение элементов с устаревшими характеристиками. Необходимо производить тщательный отбор даже среди рекомендованных типов элементов. С этой целью разрабатываются специальные нормы надежности элементов и систем.

В зависимости от назначения оборудования и количества входящих в системы элементов требуются различные уровни надежности элементов.

Кроме этого, при выборе элементов необходимо учитывать реальные условия эксплуатации системы. Значения интенсивностей отказов элементов, определенные в лабораторных (заводских) условиях, нуждаются в обязательной корректировке на действительные условия работы.

Отбраковка («выжигание») малонадежных элементов системы. Уменьшить интенсивность отказов можно путем отбраковки или «выжигания» элементов, имеющих конструктивные и производственные дефекты. Для этого осуществляется тщательная тренировка элементов системы в тяжелых условиях работы. Идея метода выжигания дефектных элементов состоит в исключении начального участка λ -характеристики (рисунок 3.1).

Численные значения КН времени выжигания определяются путем проведения специальных испытаний элементов при различных коэффициентах нагрузки и на основании статистических данных об отказах этих элементов.

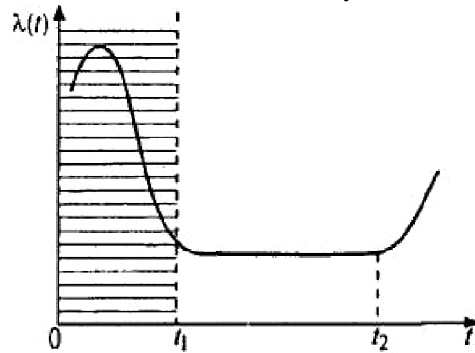


Рисунок 3.1 λ -характеристика с исключением периода приработки

Облегчение режимов работы элементов. Снижение нагрузки элементов, уменьшение их тепловых, вибрационных и других режимов приводит к уменьшению вероятности появления отказа. Поэтому облегчение режимов работы является одним из возможных путей повышения надежности оборудования. В подавляющем большинстве современных систем элементы работают в разгруженном режиме. Изменение интенсивности отказов в номинальном (кривая 1) и недогруженном (кривая 2) режимах работы элементов показано на рисунке 3.2.

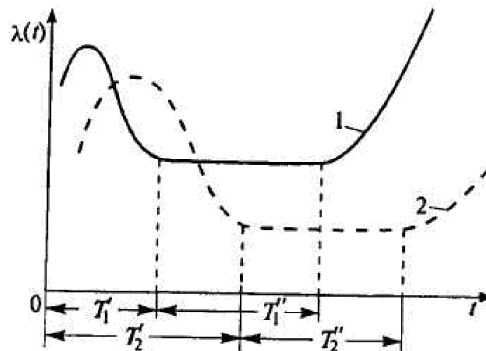


Рисунок 3.2 λ -характеристики систем с различной нагрузкой

Из рисунка видно, что при разгруженном режиме работы элементов интенсивность отказов в течение периода нормальной эксплуатации T_2' по-прежнему остается постоянной; ее величина уменьшается по сравнению с интенсивностью отказов при номинальном режиме работы, а длительности периодов приработки T_2 и нормальной эксплуатации увеличиваются.

3.4. Сокращение времени непрерывной работы и восстановления

При экспоненциальном распределении времени появления отказов значения λ и t входят в виде произведений. Это означает, что сокращение времени работы системы эквивалентно уменьшению интенсивности отказов. Поэтому, если при проектировании систем имеются возможности сокращения времени непрерывной работы, то с точки зрения повышения надежности указанные возможности необходимо реализовать.

Для подавляющего числа оборудования сложной системы весьма важным является такое их свойство, как готовность к действию. Готовность системы к выполнению своих функций, как известно, характеризуется *коэффициентом готовности*.

Уменьшение времени восстановления T_B при прочих равных условиях позволяет увеличить вероятность исправного состояния изделия в любой момент времени, т.е. повысить готовность системы.

Время восстановления T_B работоспособности объекта после отказа зависит от множества факторов. Уменьшение каждой из составляющих времени восстановления достигается широким комплексом мероприятий, применяемых как в процессе создания системы, так и при ее эксплуатации.

Мероприятия по улучшению восстанавливаемости систем на этапе их создания в основном сводятся к следующим:

- автоматизация процесса обнаружения неисправностей;
- автоматизация контроля основных параметров и режимов работы системы;
- резервирование;
- рациональное конструирование (блочная конструкция, доступность и удобство монтажа и т. п.);
- разработка рациональной эксплуатационной документации.

Эти факторы влияют на следующие показатели:

- среднее время пребывания объекта в ожидании ремонта и его проведения;
- среднее время доставки запасных элементов;
- среднее время удовлетворения рекламаций;
- потребное количество запасных элементов, которое необходимо иметь в запасном резерве и др.

Усилия обслуживающего персонала должны быть направлены на проведение наиболее эффективных мероприятий по повышению восстанавливаемости систем, основными из которых являются:

- повышение квалификации обслуживающего персонала и приобретение ими устойчивых навыков поиска и замены отказавших элементов;
- обоснование рациональной периодичности и объема профилактических мероприятий;
- определение оптимального состава запасного резерва;
- обоснование и разработка оперативной системы снабжения;
- совершенствование методов эксплуатации и систем учета и отчетности;
- усовершенствование эксплуатационной документации.

3.5. Выбор рациональной периодичности и объема контроля и обслуживания систем

Поддержание требуемого уровня надежности элементов и систем – это одна из основных задач по обеспечению высокой безопасности и живучести

сложных систем. Среди мероприятий по повышению надежности при эксплуатации оборудования сложных систем важное место отводится техническому обслуживанию.

Под *техническим обслуживанием* (ТО) понимается комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение отказов. К основным задачам ТО относятся предупреждение ускоренного износа, коррозии и старения; поддержание основных технических характеристик оборудования на заданном уровне; продление межремонтных сроков эксплуатации оборудования.

Основу ТО составляют *профилактические работы* и *регламентные проверки*. Профилактические работы (профилактика) проводятся периодически с целью выявления ненадежных, отказавших или неисправных элементов, а также для установления причин, способствующих возникновению отказов.

Планирование профилактики зависит от того, насколько вероятны ожидаемые отказы различной природы. Если отказы – редкие события и носят характер внезапных отказов, то не имеет смысла проводить частые плановые замены элементов системы, поскольку заменяемый элемент не будет менее надежен, чем новый, и замена его может привести не к повышению, а к снижению надежности. При постепенных отказах плановая замена элементов может существенно повысить надежность системы, если замена своевременна, – преждевременная замена экономически невыгодна, а запаздывание в замене не предупреждает отказа. Таким образом, разработка стратегии профилактических работ (выбор сроков, объема, последовательности, глубины и тщательности) зависит от характера потока отказов и восстановления, вида отказов, требований к надежности и экономической целесообразности.

Кроме безотказности на выбор длительности промежутка времени между циклами профилактических работ оказывают влияние следующие факторы: период эксплуатации и характер применения оборудования; долговечность элементов; стоимость; характер возможных последствий отказов.

Время профилактической проверки работоспособности оборудования назначается, исходя из следующих соображений:

1. При нормальном периоде эксплуатации, когда $\lambda(t) = \text{const}$ и известно значение допустимого снижения надежности, время профилактики t_{np} выбирается с учетом того, чтобы вероятность появления отказа не превышала допустимого значения Q_{don} :

$$Q(t) \leq Q_{don} = 1 - e^{-\lambda t}; \quad t_{np} \leq -\frac{\ln(1 - Q_{don})}{\lambda}.$$

2. Для определения времени календарного обслуживания оборудования, работающего длительно в непрерывном режиме и ориентированного на замену элементов, выработавших ресурс, предварительно оценивается средняя наработка до отказа T_{cp} и среднеквадратическое отклонение наработки $\sigma_{T_{cp}}(t)$ (рисунок 3.3).

Тогда: $t_{np} = T_{cp} - n\sigma_{T_{cp}}(t)$, где число n выбирается таким, чтобы вероятность отказа была меньше допустимой вероятности.

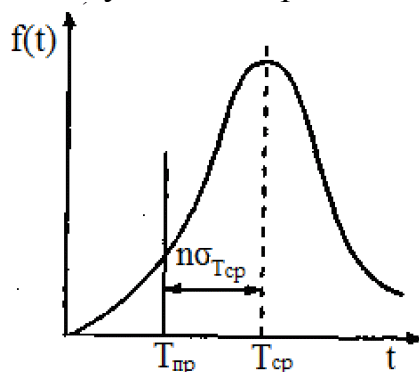


Рисунок 3.3 – Определение времени профилактических работ по f -характеристике

3. На λ -характеристиках оборудования в различные моменты времени могут появляться кратковременные повышения интенсивности «всплески», характеризующие различный ресурс элементов. Естественно, что в такие моменты целесообразно проведение профилактики соответствующего объема.

4 Для систем, работающих в дежурном режиме (системы управления и защиты, системы безопасности), весьма важно, чтобы профилактика не снижала обобщенный показатель надежности:

$$R = K_{ТИ} P(t),$$

где $K_{ТИ}$ – коэффициент технического использования.

5. Работы по техническому обслуживанию сложных систем в процессе эксплуатации можно осуществлять в зависимости от фактического состояния системы. Организация такого ТО получила название эксплуатации по состоянию. При эксплуатации оборудования по состоянию используется более глубокая информация о техническом состоянии системы, чем при календарном ТО, при котором в основу эксплуатации системы закладывается информация только о моментах отказов системы.

3.6. Классификация методов резервирования систем

Достигнутый в настоящее время уровень надежности элементной базы электроники, радиотехники, механических элементов, электротехники характеризуется значениями интенсивности отказов $\lambda = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ 1/ч. В ближайшем будущем следует ожидать повышения этого уровня до $\lambda = 10^{-8}$ 1/ч. Это даст возможность поднять наработку на отказ системы, состоящей из $N = 10^6$ элементов, до значения 100 ч, что явно недостаточно. Необходимая надежность сложных систем может быть достигнута только при использовании различных видов резервирования.

Существуют разнообразные методы резервирования. Их целесообразно разделять по следующим признакам (рис. 3.4): вид резервирования, способ соединения элементов, кратность резервирования, способ включения резерва, режим работы резерва, восстанавливаемость резерва.

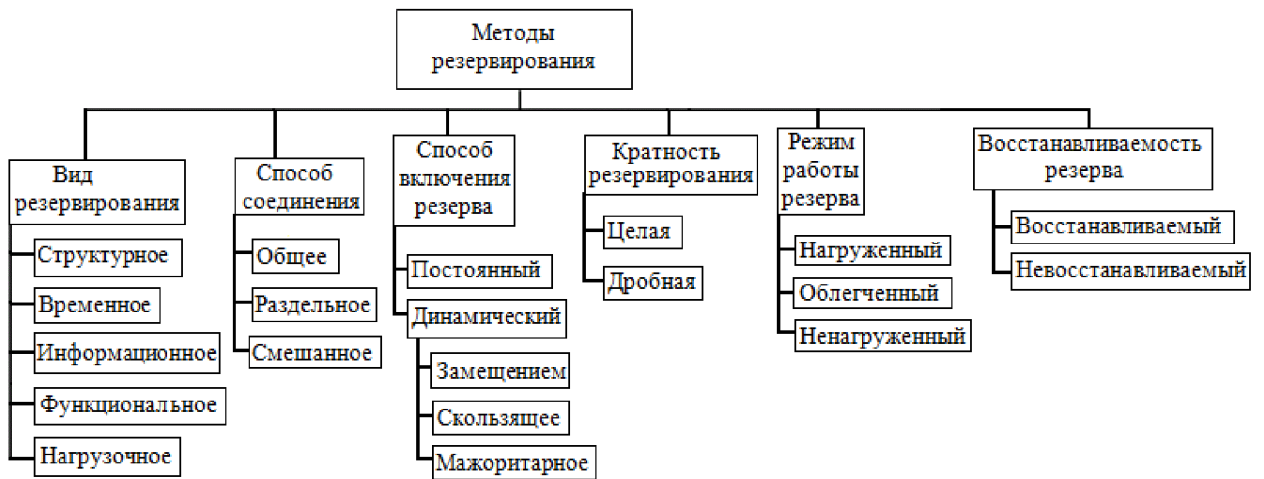


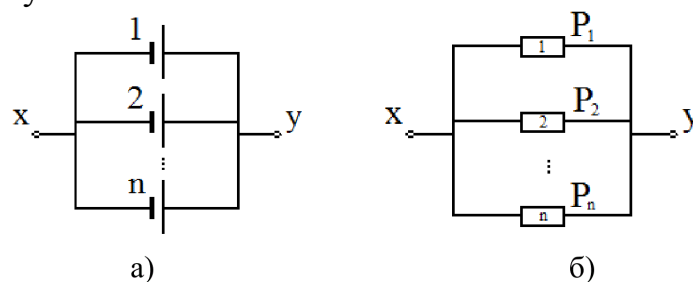
Рис. 3.4 – Классификация методов резервирования систем

Структурное резервирование, иногда называемое аппаратным (элементным, схемным), предусматривает применение резервных элементов структуры объекта. Суть структурного резервирования заключается в том, что в минимально необходимый вариант объекта вводятся дополнительные элементы. Элементы резервированной системы носят следующие названия.

Основной элемент – элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов. *Резервный элемент* – элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Определение основного элемента не связано с понятием минимальности основной структуры объекта, поскольку элемент, являющийся основным в одних режимах эксплуатации, может служить резервным в других условиях. Резервируемый элемент – основной элемент, на случай отказа, которого в объекте предусмотрен резервный элемент.

На рис. 3.5 приведена схема соединения основных и резервных элементов, так называемым параллельным соединением элементов. Системой с параллельным соединением элементов называется такая система, которая отказывает только в случае отказа всех ее элементов.



а – принципиальная схема, б – расчетная схема

Рис. 3.5 – Пример параллельного соединения элементов

Временное резервирование связано с использованием резервов времени. При этом предполагается, что на выполнение объектом необходимой работы отводится время, заведомо большее минимально необходимого. Резервы времени могут создаваться за счет повышения производительности объекта, инерционности его элементов и т.д.

Информационное резервирование – это резервирование с применением избыточности информации. Примерами информационного резервирования являются многократная передача одного и того же сообщения по каналу связи; применение при передаче информации по каналам связи различных кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки, которые появляются в результате отказов аппаратуры и влияния помех; введение избыточных информационных символов при обработке, передаче и отображении информации. Избыток информации позволяет в той или иной мере компенсировать искажения передаваемой информации или устранять их.

Функциональное резервирование – резервирование, при котором заданная функция может выполняться различными способами и техническими средствами. Например, функция передачи информации в АСУ может выполняться с использованием радиоканалов, телеграфа, телефона и других средств связи. Поэтому обычные усредненные показатели надежности (средняя наработка на отказ, вероятность безотказной работы и т.п.) становятся малоинформативными и недостаточно пригодными для использования в данном случае. Наиболее подходящие показатели для оценки функциональной надежности: вероятность выполнения данной функции, среднее время выполнения функции, коэффициент готовности для выполнения данной функции.

Нагрузочное резервирование – это резервирование с применением нагрузочных резервов. Нагрузочное резервирование, прежде всего, заключается в обеспечении оптимальных запасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки. При других способах нагрузочного резервирования возможно введение дополнительных защитных или разгружающих элементов.

Перечисленные виды резервирования могут быть применены либо к системе в целом, либо к отдельным элементам системы или к их группам. В первом случае резервирование называется общим, во втором – раздельным. Сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте называется *смешанным*.

По способу включения резервных элементов различают постоянное, динамическое, резервирование замещением, скользящее и мажоритарное резервирование.

Постоянное резервирование – это резервирование без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента. В случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих в действие резервный элемент, а также отсутствует перерыв в работе (рис. 3.6 – 3.8). Постоянное резервирование в простейшем случае представляет собой параллельное соединение элементов без переключающих устройств.

Динамическое резервирование – это резервирование с перестройкой структуры объекта при возникновении отказа его элемента. Динамическое резервирование имеет ряд разновидностей.

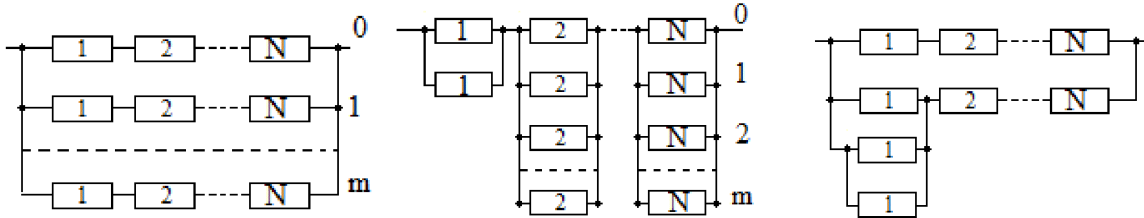


Рис. 3.6. Общее резервирование с постоянно включенным резервом

Рис. 3.7. Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом

Рис. 3.8. Смешанное резервирование с постоянно включенным резервом

Резервирование замещением – это динамическое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента. Включение резерва замещением (рис. 3.9, 3.10) обладает следующими преимуществами:

- не нарушает режима работы резерва;
- сохраняет в большей степени надежность резервных элементов, так как при работе основных элементов они находятся в нерабочем состоянии;
- позволяет использовать резервный элемент на несколько основных элементов.

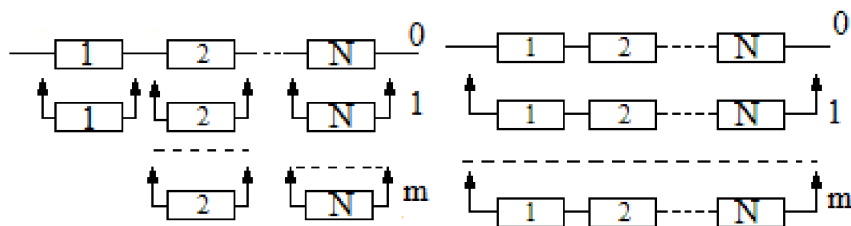


Рис. 3.9. Общее резервирование с включением резерва замещением

Рис. 3.10. Раздельное резервирование с включением резерва замещением

Существенным недостатком резервирования замещением является необходимость наличия переключающих устройств. При раздельном резервировании число переключающих устройств равно числу основных элементов, что может сильно понизить надежность всей системы. Поэтому резервировать замещением выгодно крупные узлы или всю систему, а во всех других случаях – при высокой надежности переключающих устройств.

Скользящее резервирование – это резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе (рис. 3.11).

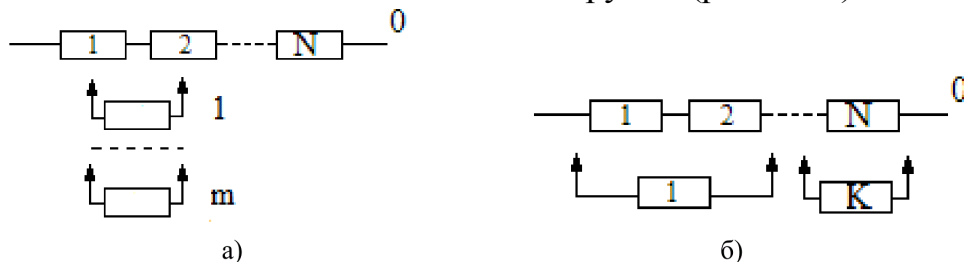


Рис. 3.11. Скользящее резервирование с однотипными а) и неоднотипными б) элементами

В системах управления нашло широкое применение *мажоритарное резервирование*. Этот способ основан на применении дополнительного элемента, называемого мажоритарным или логическим элементом. Логический элемент позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, то они считаются исправно работающими и их сигналы считаются истинными и проходят на выход устройства.

На рис. 3.12 изображено резервирование по принципу «2 из 3», т.е. любые два совпадающих результата из трех считаются истинными и проходят на выход устройства. По такому принципу построены многие схемы подсистем систем управления и защиты (СУЗ). Можно применять соотношения «3 из 5» и др. Главное достоинство этого метода – обеспечение повышения надежности при любых видах отказов элементов и повышение достоверности информационно-логических объектов.

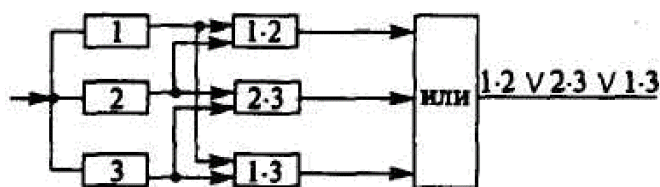


Рис. 3.12. Мажоритарное резервирование

Степень избыточности характеризуется *кратностью резервирования*.

Кратность резерва – это отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых основных элементов, выраженное несокращенной дробью. Резервирование с целой кратностью имеет место, когда один основной элемент резервируется одним или более резервными элементами.

Резервирование с дробной кратностью – это такое резервирование, когда два и более однотипных элементов резервируются одним и более резервными элементами (рис. 3.13). Наиболее распространенным вариантом резервирования с дробной кратностью является такой, когда число основных элементов превышает число резервных. Резервирование, кратность которого равна единице, называется *дублированием*.

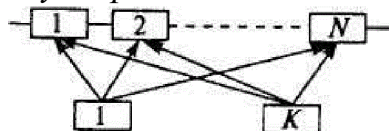


Рис. 3.13. Резервирование с дробной кратностью при нагруженном резерве

В зависимости от режима работы резерва различают нагруженный, облегченный и ненагруженный резервы.

Нагруженный резерв (горячий резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. При этом принимается, что элементы нагруженного резерва имеют тот же уровень безотказности, долговечности и сохраняемости, что и резервируемые ими основные элементы объекта.

Облегченный резерв (теплый резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной. Элементы облегченного резерва обладают, как правило, более высоким уровнем безотказности, долговечности и сохраняемости, чем основные элементы.

Ненагруженный резерв (холодный резерв) – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента. Для элементов ненагруженного резерва условно полагают, что они никогда не отказывают и не достигают предельного состояния.

Резервирование, при котором работоспособность любого одного или нескольких резервных элементов в случае возникновения отказов подлежит восстановлению при эксплуатации, называется *резервированием с восстановлением*, в противном случае имеет место *резервирование без восстановления*. Восстанавливаемость резерва обеспечивается при наличии контроля работоспособности элементов. При наличии резервирования это особенно важно, так как в этом случае число скрытых отказов может быть больше, чем при отсутствии резервирования. В идеальном варианте отказ любого элемента объекта обнаруживается без задержки, а отказавший элемент незамедлительно заменяется или ремонтируется.