**Лекция 2 [1]**

**КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

**Условия работоспособности**

**Область работоспособности.** Электроэнергетическое оборудование состоит из конечного числа элементов, и соответственно в нем может возникнуть конечное число дефектов. Разделение множества состояний на подмножества работоспособных и неработоспособных определяет условие работоспособности, т.е. условие, при выполнении которого электроэнергетическое оборудование может выполнять возложенные на него функции.

Следует отметить, что понятие ***работоспособность***содержит некоторую неопределенность, связанную с тем, что между абсолютной работоспособностью элемента ЭУ, когда все диагностические признаки имеют номинальное значение, и абсолютной неработоспособностью, когда ЭО совершенно не способно работать (пробой изоляции, обрыв проводов, их замыкание на землю), лежит конечное число промежуточных состояний, при которых ЭУ способна выполнять некоторую работу, но с пониженной производительностью или с ухудшением качества.

Не всегда очевидна граница между работоспособным и нерабо­тоспособным состояниями. Не ясно также, при каких значениях ди­агностических признаков элементов ЭУ должна считаться неработо­способной и подвергаться восстановлению. Превышение допустимых значений напряжения приводит к снижению надежности работы электроустановок. Повышение тока нагрузки приводит к чрезмерному перегреву всех аппаратов, кабелей, обмоток силовых трансформаторов и электрических машин, включенных в эту электрическую цепь. В результате перегрева электрооборудования возможен пробой изоляции с последующим замыканием токоведущих частей между собой или на землю.

В общем случае объект может находиться в конечном множествесостояний

S=(s1,….sj,…sp).

Каждому состоянию соответствует определенное значение какого-либо диагностического признака (рис. 1).

Ξ=(ξ1,…,ξj,…,ξr)

Причем *p=r*, если существует однозначное соответствие, а в общем случае *р≠r.*

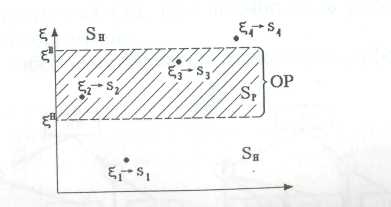


Рис. 1. Связь значений диагностического параметра и состояний энергетического оборудования

***Область работоспособности*** определяется как область изменения диагностических параметров, ограниченная их допустимыми значениями, в которой объект работоспособен.

Допустимые нижние ξ н или верхние ξв значения ξдоп можно определить из анализа диагностической модели или воспользоваться приближенным расчетом:

ξдоп= ξпр ± Δξ ; ξдоп = ξном × к ,

где Δξ - запас относительно предельного значения параметра ξпр ; ξном - номинальное значение диагностического параметра; к - ко­эффициент запаса.

**Условия работоспособности на параметры.** Наиболее часто используемые для контроля работоспособности электрооборудования параметры приведены в табл. 1.

Кроме того, в качестве параметров могут использоваться: индуктивность и резонансная частота обмоток силовых трансформаторов и электрических машин, потенциалы, сопротивление изоляции элементов ЭУ, уровень напряженности электромагнитного поля, интенсивность частичных разрядов.

Таблица 1



Условия работоспособности по одному параметру непрерывных объектов задаются неравенствами, которые ограничивают его зна­чения с одной или двух сторон:

*ξi* >*ξi"* (Rи>300 МОм, сопротивление изоляции более 300 МОм, измеренное при температуре 18-20°С);

*ξi* < *ξi" (tgδ* <2,5%, тангенс угла диэлектрических потерь меньше 2,5%);

где *ξi* - текущее значение, *ξi"* - наименьшее, *ξi"* - наибольшее до­пустимое значение диагностических параметров.

В большинстве случаев на диагностические параметры задаются двухсторонние ограничения вида:

*ξi" < ξi < ξiв* (*Iн*<1< 1,25*Iн* - ток нагрузки трансформатора);

**Условия работоспособности на характеристики**. Если в качестве ДП используется характеристика, то оценить состояние элементов ЭУ можно или по нескольким показателям характеристики, или по отклонению текущей характеристики от номинальной. Если в каче­стве диагностических признаков, например, силовых трансформато­ров или системы трансформатор - линия электропередачи исполь­зуются показатели интенсивности высокочастотных излучений y=f(x),где x и y - соответственно входная и выходная переменные, то условия работоспособности определяются величиной отклонения текущей характеристики *f*(х) объекта от номинальной φ(x). При этом необходимо установить количественный критерий, который позволял бы оценивать сходство и различие этих характеристик.

**Степень работоспособности**

Поскольку заданные конструктором параметры не могут быть точно достигнуты при изготовлении, элемент ЭУ может оказаться в работоспособном состоянии, но с различным запасом работоспособности. Это объясняется, с одной стороны, неточностью изготов­ления элементов, а с другой - самой постановкой задач, поскольку на практике оказывается допустимой некоторая неточность в выполнении рабочих функций. Для проверяемых признаков (параметров и характеристик) вводятся эксплуатационные допуски, пред­ставляющие собой установленные опытным путем или расчетом допустимые границы изменения. Этим объясняется введение понятия ***области работоспособности***и рассмотрение подмножества работо­способных состояний *Sp.* Однако не все состояния в подмножестве *Sp* равноценны.

Можно предположить, что чем дальше состояние *si* от границы области работоспособности нижней *ξi"* или верхней *ξib*, тем меньше вероятность того, что объект потеряет работоспособность в ближайшее время. Удаление значений признака *xi* от границы области работоспособности увеличивает ***запас его работоспособности****.* Наоборот, приближение значения диагностического признака к границе области работоспособности уменьшает запас работоспособности (рис.2.).

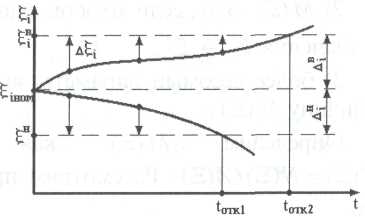
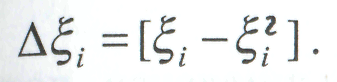


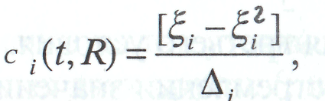
Рис.2. Определение запаса работоспособности

Запас работоспособности Δξi. через текущее зна­ние ξi и граничное (нижнее или верхнее) ξiг может вычислен следующим:



При такой оценке можно ввести диагноз типа "отлично", "хо­рошо", "удовлетворительно".

В связи с тем, что размерности и допустимые отклонения ДП могут быть различны при технической реализации количественной оценки изменения работоспособного состояния, удобнее пользо­ваться понятием степень работоспособности, которая является без­размерной величиной. Ее можно определить по одному параметру следующим образом



где Δi - допуск (область работоспособности) на i-й диагностический параметр в области изменения; t - время; R - режим работы.

В этом случае степень работоспособности изменяется в пределах [1,0]. Если умножить на 100, то степень работоспособности оценивается в процентах.

Характер изменения работоспособности виден из рис.3.

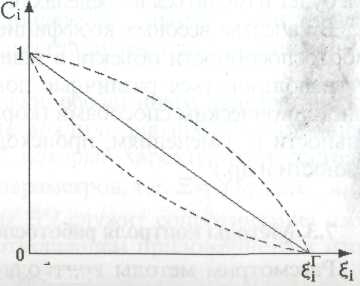
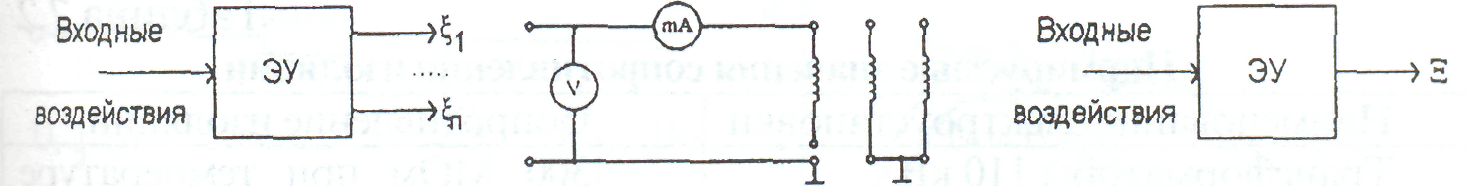


Рис. 3. Характер изменения степени работоспособности

**Методы контроля работоспособности**

Рассмотрим методы контроля работоспособности, основанные на оценивании реакции элементов ЭУ на рабочие и тестовые воздействия.



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Рис. 4. Метод контро­ля работоспособности объекта | Рис.5. Метод кон­троля состояния изоляции | Рис.6. Метод кон­троля работоспособ­ности объекта |

**Метод, основанный на контроле совокупности диагностических параметров** Ξ = (ξ1,...,ξi,...,ξn) (рис.4). Для реализации этого мето­да должна быть выбрана минимальная совокупность ДП и на них заданы допустимые пределы изменения, при которых ЭУ сохраняет работоспособность.

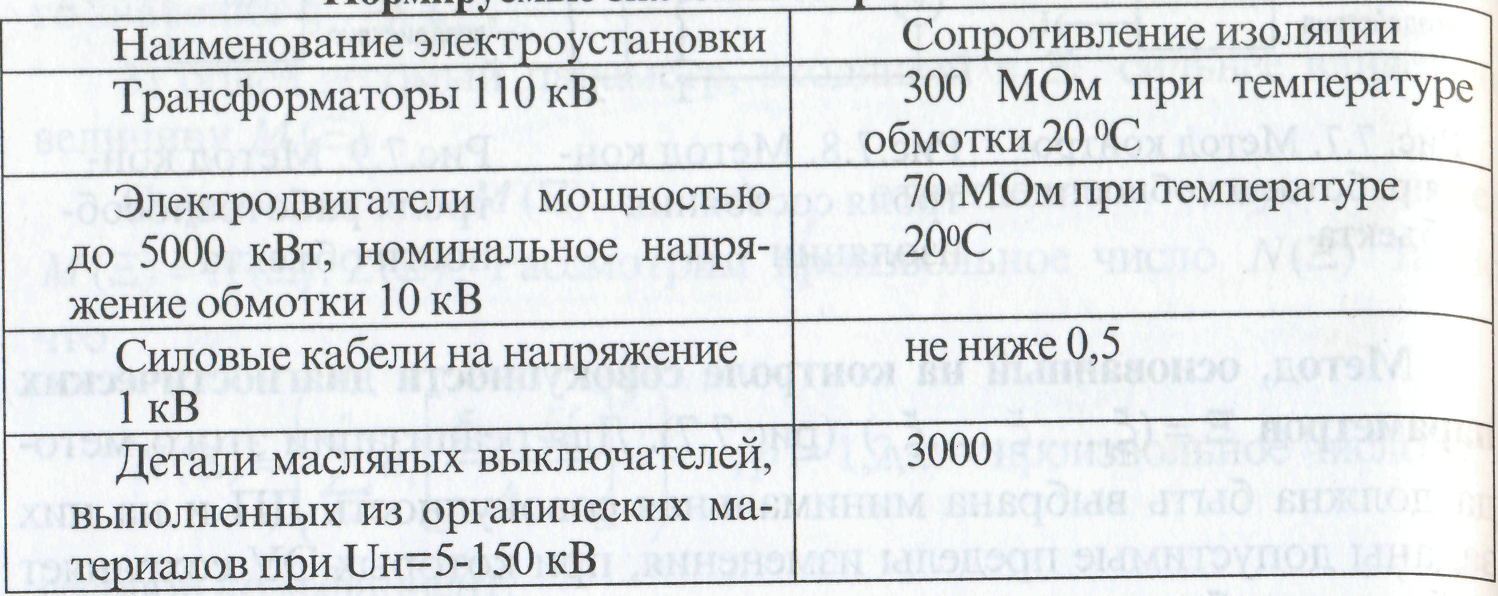
В этом случае необходимо измерить каждый ДП и сравнить с установленным допуском Δi. Операцию сравнения может осуществ­лять ТСД или человек - оператор. Если значение каждого ξi укла­дывается в установленные пределы, т.е. ξ i€ Δi, то оборудование при­знается работоспособным и формулируется диагноз "годен", "рабо­тоспособен". В качестве входных воздействий используются рабочие или тестовые сигналы.

**Метод, основанный на контроле обобщенного диагностического параметра** (рис.5). Врезультате анализа диагностической модели может быть найден параметр *X,* который характеризует состояние ЭУ в целом и зависит от других параметров, т.е. Ξ = *f*(ξ1,...,ξi,...,ξn).

Примером такого параметра для ЭУ служит сопротивление изоля­ции *Ru* (табл.2.), являющееся отношением приложенного к изоля­ции напряжения U к току утечки *1ут* ,т.е.

*Ru=f(U,Iyт)****.***

Таблица 2



Ток утечки состоит из поверхностных и объемных токов в изо­ляции. Например, для трансформаторов текущие значения *Ru* необходимо сравнить с результатом предыдущих измерений.

Уменьшение *Ru* обмоток свидетельствует об увлажнении или старении изоляции обмоток.

Метод заключается в измерении текущего значения Ξ и сравне­нии его с допустимым отклонением ΔΞ. Если Ξ **€** ΔΞ, то объект признается работоспособным, в противном случае - неработоспо­собным.

**Метод, основанный на оценивании частотных характеристик.** На вход ЭУ, например, электрической машины, подается тест в виде си­нусоидального сигнала в диапазоне частот f1...fn. По выходной реакции строятся амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики, которые сравниваются с граничными значениями (маской) при интегральной оценке отклонения характеристик. Кон­троль работоспособности ЭУ по частотным характеристикам воз­можен в определенных точках *(f1,f2,f3).* В этом случае нет необходи­мости снимать всю характеристику, а работоспособность оценивает­ся по реакции ЭУ на сигнал этих частот. Тест при этом резко сокра­щается. У работоспособной ЭУ характеристика или ее значения в характерных точках должны находиться в установленных пределах - в области работоспособности.

**Метод** **сравнения реакции ЭУ и эквивалентной модели** (рис.7). Этот метод находит применение при рабочем диагности­ровании сложных динамических объектов. При этом эквивалентная модель (ЭМ) может быть представлена физической моделью (ана­логичным объектом) и математической моделью (эквивалентным описанием).

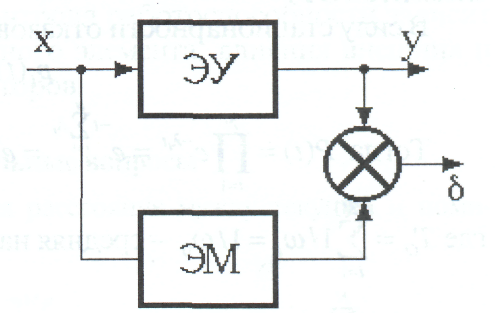
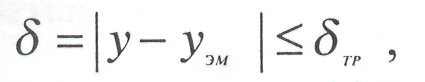


Рис.7. Метод контроля работоспособности объекта

На вход элемента ЭУ и его модели подается один и тот же входной сигнал *х,* изменяю­щийся во времени. На выходе сравнивается реакция элемента ЭУ и ЭМ. Условием работо­способности является



где *δТР -* требуемое значение разности (в идеальном случае при адекватном описании ЭУ и работоспособном ее состоянии *δ*=0).

Основные недостатки метода: трудности создания модели, адекватной объекту; избыточность, так как требуется модель того же порядка, что и объект.

**ПОИСК ДЕФЕКТОВ**

**Признаки и методы обнаружения дефектов**

Наличие дефекта - свидетельство того, что в работе ОД произошли нежелательные изменения, которые привели к нарушению его работо­способности или снижению ее степени. Отказ объекта - простейший вид признака наличия дефекта. Отказ ОД означает, что-либо он весь, либо его часть не работает и, следовательно, не подает "признаков жизни". Так, отсутствие напряжения на распределительном щите на электро­станции указывает на ее полный отказ.

Математически признак наличия дефекта можно представить в сле­дующем виде:

нарушение работоспособности по параметрам |*ξiH0M-ξi*|≥Δi; по характеристикам |f(х) -φ(х)| > Δ;

резкое снижение степени работоспособности, т.е. переход из со­стояния Si в состояние Sj в области работоспособности Sp: si —» sj € Sp;

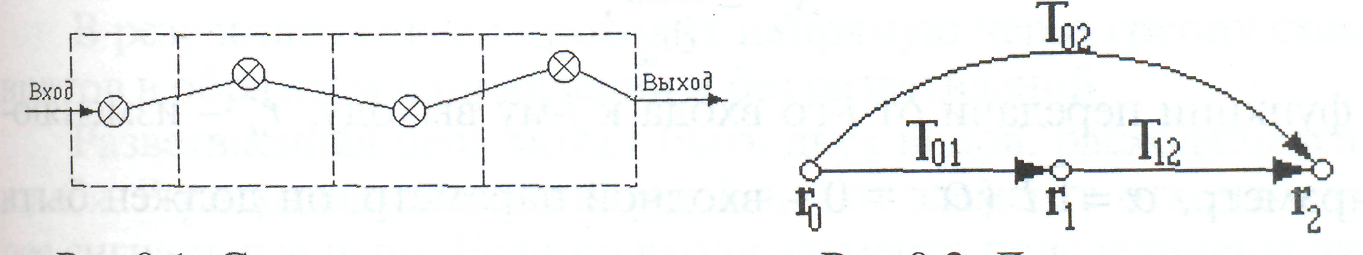
отказ одной из структурных единиц сложного объекта с переходом ОД из работоспособных состояний Sр=(1,1,...,1) в Sн=(0,1,1,...1);

**Все методы обнаружения дефектов можно разделить на три группы: осмотра, индикации и поиска.**

Если известно, что ОД отказал, вначале необходимо выполнить ви­зуальный осмотр элементов ЭУ. При этом можно обнаружить наруше­ния контактных соединений, обрывы проводов, разрушение изоляторов и т.д.

Автоматическая индикация в настоящее время находит примене­ние для различных ОД. В этом случае в объекте размещается опреде­ленное количество датчиков в соответствии с требуемой глубиной, ко­торые сигнализируют о возникновения дефекта. Такими датчиками могут быть термопары, термореле, регистраторы токов к.з. и другие элементы, реагирующие на перегрузки, сверхтоки.

В объектах, которые могут быть представлены как системы с по­следовательной обработкой информации (рис. 8), возникший дефект может быть обнаружен путем индикации прохождения сигнала.



|  |  |
| --- | --- |
| Рис.8. Схема индикации про хождения сигнала в объекте | Диаграмма прохождения сигналов |

Поиск дефекта ведется путем построения умозаключений, состоя­щих в непрерывном сужении области поиска местонахождения дефекта, принятия логических решений и выполнения рациональных проверок. Такой подход сокращает количество проверок, что не только экономит время, но и сводит к минимуму вероятность ошибок. Для выбора по­следовательности проверок необходимо знать, как те или иные дефекты влияют на состояние ОД. Достигнуть этой цели можно двумя путями: моделированием дефектов; анализом диагностической модели ОД.

**Алгоритмы поиска дефектов**

Решение задачи поиска возникшего дефекта в отличие от задачи контроля работоспособности, как правило, требует более длительного анализа ОД или его модели. При этом степень детализации определяется заданной глубиной поиска дефекта, т.е. указанием части объекта (структурной единицы), с точностью до которой находится место дефекта. Таким образом, если задана глубина поиска дефекта, то объект диагностирования может быть представлен множеством из N взаимосвязанных частей - структурных единиц (СЕ).

Поиск дефекта или состояния, в котором находится объект, выпол­няется по алгоритму, включающему определенную совокупность про­верок. Проверкой называется оценивание состояния структурной едини­цы по ее выходу или выходу объекта в целом. При этом множество со­стояний в общем случае больше числа проверок, поскольку при выпол­нении одной проверки может быть найдено больше одного дефекта. Каждая проверка требует определенных затрат. При построении алго­ритма поиска дефекта стараются выбрать такую последовательность проверок, которая позволяет найти дефект с наименьшими затратами.

Для построения алгоритмов поиска дефектов могут использоваться функциональные (структурные) схемы. Термин "функциональный" оз­начает, что узел выполняет определенную функцию. Узлы соединены между собой таким образом, что отдельные функции выполняемые в определенной последовательности, реализуют задачу, стоящую перед данной установкой, системой в соответствии с ее назначением.

Функциональная схема представляет собой графическое изображе­ние входящих в нее узлов и соответствующих сигнальных трактов. Следует иметь в виду, что нет никакой связи между расположением функ­циональных узлов на схеме и их физическим расположением в конст­рукции оборудования.

Сигналы в схемах электрооборудования проходят по сигнальным цепям двух видов: последовательные и разветвленные. Последовательная цепь (рис.9) включает в себя группу схем (каскадов), соединенных так, что выход одной схемы соединен со входом другой схемы.

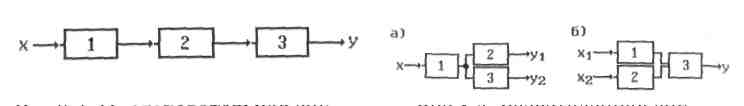


Рис.9. Последовательная сиг- Рис.10. Разветвленная сиг-

нальная цепь нальная цепь

В результате сигнал проходит напрямую через группу схем без возвратов в обратном направлении и без разветвлений.

Разветвленная цепь может быть двух видов: расходящаяся и сходящаяся. В расходящейся цепи (рис.10,а) от элемента отходят две или более сигнальные цепи. Если ко входу элемента подсоединены две и более сигнальные цепи, то это сходящаяся цепь (рис.10,б). В ходе первой проверки в этом случае следует попытаться установить, в какой из цепей возник дефект. Это позволит исключить из рассмотрения одну из сигнальных цепей, находящуюся в работоспособном состоянии.

В связи с тем, что современные электрические системы автоматики содержат сотни компонентов, проверка каждого из них с целью поиска дефекта потребует значительных временных затрат. Масштабы задачи поиска можно уменьшить в несколько раз, если проверять не каждый элемент, а лишь выходной сигнал каждой схемы (каскада). Однако про­ведение этого числа проверок тоже является делом весьма трудоемким. Разбив рассматриваемые схемы на СЕ (их может быть несколько десят­ков), можно сократить число проверок, доведя до приемлемого уровня.

Поскольку каждая проверка делит пространство состояний на две части (включающая и не включающая искомое состояние), в результате выполнения последовательности проверок поиск приводит к опреде­ленному состоянию, соответствующему обнаружению СЕ, которая от­казала. Последовательность выполнения проверок при поиске дефекта может быть представлена в виде графа (дерева), где вершинами являют­ся проверки, а ветви указывают направление перехода в зависимости от результата проверки, конечные вершины - обнаруживаемые дефекты.

После того как выполнена первая проверка, встает вопрос: «Куда дальше двигаться?» Ответ на него зависит от результатов первой про­верки. Здесь только два возможных результата: удовлетворительная (+) и неудовлетворительная (-) работа проверяемой СЕ. В последнем случае СЕ либо совсем не работает, либо работает с ухудшенными характеристиками. В любом случае полученный результат укажет на вид следую­щей необходимой проверки.

**Алгоритмы поиска дефектов могут быть трех видов: последова­тельные, параллельные и комбинированные.**

При последовательном поиске каждая проверка выделяет в пространстве поиска один дефект. Удовлетворить это условие можно для ОД, представленного в виде последовательной схемы соединения СЕ, когда известно, что на вход подается сигнал, а по выходному сигналу можно определить наличие в ОД дефекта двумя путями: от начала к концу и от конца к началу. Проиллюстрируем алгоритм поиска дефекта на примере ОД. представленного на рис.11,а.



Рис.11 Алгоритм поиска дефектов

В первом случае необходимо выполнить проверку *π1* в точке А, по­скольку она позволит исключить из рассмотрения сразу один элемент СЕ 1. Если сигнал в допустимых пределах, то проверку *π2* следует вы­полнить в точке В, которая позволит определить состояние СЕ 2. Если результат проверки отрицательный, то дефект в данном элементе. Если положительный, то необходимо выполнить проверку *π3* в точке С. Ес­ли результат проверки положительный, то дефект - в СЕ 4, в противном случае - дефект в СЕ 3. Алгоритм поиска представлен на рис.11,б.

Во втором случае (от конца к началу), если результат проверки *π1* в точке С отрицательный, то следующую проверку *π2* необходимо вы­полнить в точке В. При положительном результате дефект СЕЗ, при от­рицательном выполняется проверка *π3*. По результатам этой проверки отыскивается дефект либо в СЕ 1, либо в СЕ 2 (рис.11,в).

Число проверок N для обнаружения всех дефектов ОД определяется соотношением N= *n*-l; **n**- число СЕ объекта.

При *параллельном поиске* ОД разбивается каждой проверкой на две равные или почти равные части, если соответственно в ОД четное или нечетное число СЕ.

Так, для ОД из четырех СЕ (рис.12,а) при реализации параллельно­го поиска первая проверка π1 выполняется в точке В. Если результат отрицательный, то следующая проверка π2 выполняется в точке А, в результате чего определяется место нахождения дефекта (СЕ 1 или СЕ 2). В противном случае назначается проверка π3 в точке С, позволяющая определить дефект в СЕ 3 или СЕ 4. Алгоритм приведен на рис.8.6,б.

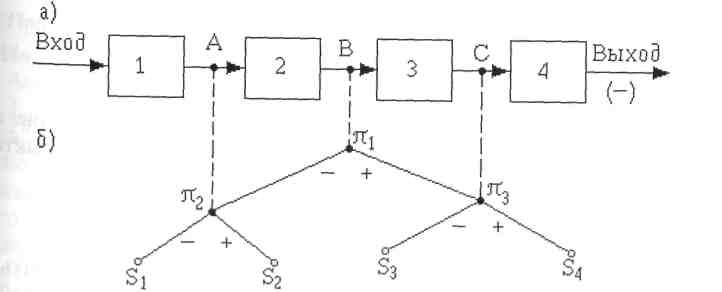


Рис.12. Алгоритм поиска дефектов

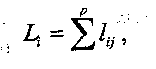
Число проверок N, необходимых для нахождения всех дефектов че­рез число СЕ, можем определить по формуле:

*N*=[log2*n*] - целая часть.

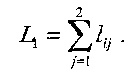
При n = 4 требуется две проверки, при n = 8 - три проверки.

При *комбинированном поиске* имеет место сочетание последователь­ного и параллельного алгоритмов.

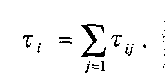
По алгоритму поиска дефекта в виде дерева можно определить суммарную длину ветвей достижения искомого дефекта.



где Lij- длина i-й ветви, р - число ветвей от начала поиска до искомого дефекта. Например, для графа, представленного на рис.11,б,



Если в качестве *l*ij рассматривать время τij, то, воспользовавшись формулой для Li, можно определить время τi , затрачиваемое на поиск i-го дефекта.



Алгоритмы поиска дефектов могут быть построены на основе ана­лиза структуры объекта или использования показателей, характери­зующих надежность СЕ.

**Литература.**

1. **Калявин В.П., Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика элементов электроустановок. Йошкар-Ола, Марийский госуниверситет, 2000. - 369 с.**