

## Часть 4.

### Основы встроенного контроля скоростных следящих приводов.

#### 4.1 Основы методологии ВСК скоростных следящих приводов исполнительных механизмов современных воздушных судов.

Основное внимание при разработке систем ВСК скоростных следящих приводов (ССП) авиационной техники направлено на устранение последствий активных отказов приводов, связанных с возникновением внезапных отказов элементов. Это обусловлено несколькими причинами.

1. Широкое внедрение цифровой электроники как в каналы управления (КУ), так и в каналы контроля (КК) сделали такие виды отказов преобладающими что связано со сбоями в передаче дискретных сигналов, “опрокидыванием” (самопроизвольным изменением знака выходной величины) операционных усилителей, повреждениями в системе передачи сигналов (нарушения пайки, обрывы проводов и др.), а также нарушением температурных режимов кристаллов.
2. Постепенные отказы, связанные с износом трущихся частей (щетки, муфты, редукторы), более доступны для обнаружения и не приводят к активным отказам. Большинство их может быть выявлено или в процессе плановых регламентных проверок, или с помощью тест-контроля систем в процессе предполетной подготовки.
3. Именно внезапные отказы чаще всего могут привести к быстро развивающимся переходным процессам, перемещающим исполнительные механизмы с максимальными скоростями к крайним положениям, что может привести к серьезным осложнениям полета.

В то же время именно широкое внедрение электроники (в том числе – силовой) в состав современного привода позволяет создать эффективные способы обнаружения и ликвидации последствий отказов.

Дело в том, что современные следящие привода чаще всего оборудованы вентильными ЭД с электронными коллекторами, в состав которых входят логические устройства управления силовым ПК. Это и позволяет в составе системы управления приводом путем незначительных усложнений схемы сформировать эффективные меры контроля.

Одним из важных требований к формированию КК является автономность его работы по отношению к КУ. Это, с одной стороны, уменьшает возможность появления отказов привода, вызванных работой самого КК и, с другой стороны, позволяет повысить достоверность КК. Важен также и вопрос о выборе способа определения отказа.

Дело в том, что использование одних и тех же сигналов, например ДПР, в обоих контурах привело бы к ложной информации в виду одинакового воздействия отказов ДПР как на КУ, так и КК.

Однако, полная автономность КК от КУ привела бы к значительному увеличению аппаратных затрат в системе.

Одним из компромиссных решений этого противоречия может быть использование одних и тех же исходных сигналов ДПР, но в различных комбинациях для КК и КУ. Это обычно требует более детального рассмотрения физических процессов, происходящих в элементах привода. Так, анализ работы индуктивных ДПР (см. раздел 1.2) с трехфазной обмоткой, фазы которой смещены в пространстве на  $120^0$  электрических, показывает, что в нормально работающей системе в КУ физически реализуются не все возможные теоретические сочетания ДПР, поэтому избыточные сочетания сигналов могут быть использованы в КК для диагностики отказов.

Действительно (см. рис.1.2.3 и табл.4.1.1) в трехфазном ДПР из восьми сочетаний ( $2^3=8$ ) логических значений переменных (0 или 1) физически при нормальной работе реализуются только 6 комбинаций.

Сочетания сигналов ДПР в 1-ой и 8-ой строках не реализуются при нормальной работе системы, поэтому их появление говорит о наличии в ней неисправностей, т.е. они могут быть использованы для диагностики отказов. Так, в разделе 4.5 это условие используется для разработки алгоритма проверки целостности цепей ДПР, определения порядка чередования фаз и действительного направления вращения ЭД.

Принципиальным является вопрос о выборе величины текущей скорости, уровень которой следует принять за граничную ( $\omega_k$ ), превышение которой говорило бы об активном отказе. Дело в том, что в регулируемом следящем приводе скорость в нормальных рабочих режимах под действием управляющего сигнала практически может изменяться во всем диапазоне  $\omega=0 \dots \omega_{\max}$ . И в качестве признака ошибки должна быть использована разница  $\Delta\omega$  требуемой и действительной текущей скоростью привода. Желания повысить точность фиксации отказа, то есть устремление  $\Delta\omega \rightarrow 0$  входит в противоречие с требованием минимизации возможности выдачи ложных сигналов и отказов нормально функционирующей системы. При этом наибольший ущерб системе могут нанести отказы при больших сигналах управления (больших  $\omega$ ), поэтому естественно желание разработчиков повысить уровень фиксируемой  $\omega_k$ . В то же время следует иметь в виду, что разброс естественных механических характеристик привода, на которую он переходит в случае активного отказа, достаточно велик при различных уровнях питающего напряжения и величины  $M_c$  (см. рис 4.4.1). Этот разброс еще более увеличивается при учете возможности работы в аварийных режимах с пониженным до 18В питающим напряжением, когда уровень естественного  $\omega_{\max}^{18} < \omega_{\text{текущая}}$  нормально работающего привода при значительных сигналах управления (рис 4.4.1). Компромиссное решение заключается в выборе такой величины  $\omega_k$  на скоростной характеристики нормально работающего привода, которая не превышала бы естественного максимума скорости активного отказа  $\omega_{\text{ест}}$  при учитываемом в расчетах минимальном напряжении питания ( $U_{\min}=24В$  в

нормальных условиях и  $U_{\min} \geq 18\text{В}$  в аварийных). На рисунке 4.4.1 этот уровень выбран как  $\omega_k$  при  $U_{\text{вх}} = 7\text{В}$ . Детальный расчет этих режимов дан в разделе 4.4. Важно также разработать эффективные схемы электронной реализации самих способов фиксации повышенных скоростей привода, превышающих критическую. Здесь, в разделе 4.4. используется оригинальный метод, основанный на принципе формирования напряжения обратной связи, уровень которого определяется частотой следования на оси времени калиброванных импульсов  $A_{\text{ки}}$  (см. рис. 2.1.2) в зависимости от скорости привода. Факт «слипания» этих импульсов и принимается за сигнал о превышении расчетной скорости.

Вопросы оптимизации объема контроля современных автоматических систем управления являются достаточно сложными и связаны с рассмотрением многофакторных критериев оптимальности с учетом массы, КПД, стоимости, надежности, и др. показателей систем, приводящим в конечном итоге к различным затратам на проектирование, разработку и эксплуатацию приводов в составе ВС. Задача минимизации суммарных затрат на весь жизненный цикл систем решаются проведением целого ряда мероприятий по оптимизации параметров как силовой части привода, так и систем его управления в процессе разработки реальных систем.

Далее рассматриваются эти вопросы на примере скоростных следящих приводов современных самолетов класса Ту-204 и Ил-96-300, оборудованных вентильными ДПТ.

Таблица 4.1.1

Физически реализуемые сочетания сигналов ДПР и их использование в КУ и КК.

NN	ДА	ДВ	ДС	Возможность использования в каналах	
				КУ	КК
1	0	0	0	-	+
2	0	0	1	+	-
3	0	1	0	+	-
4	0	1	1	+	-
5	1	0	0	+	-
6	1	0	1	+	-
7	1	1	0	+	-
8	1	1	1	-	+

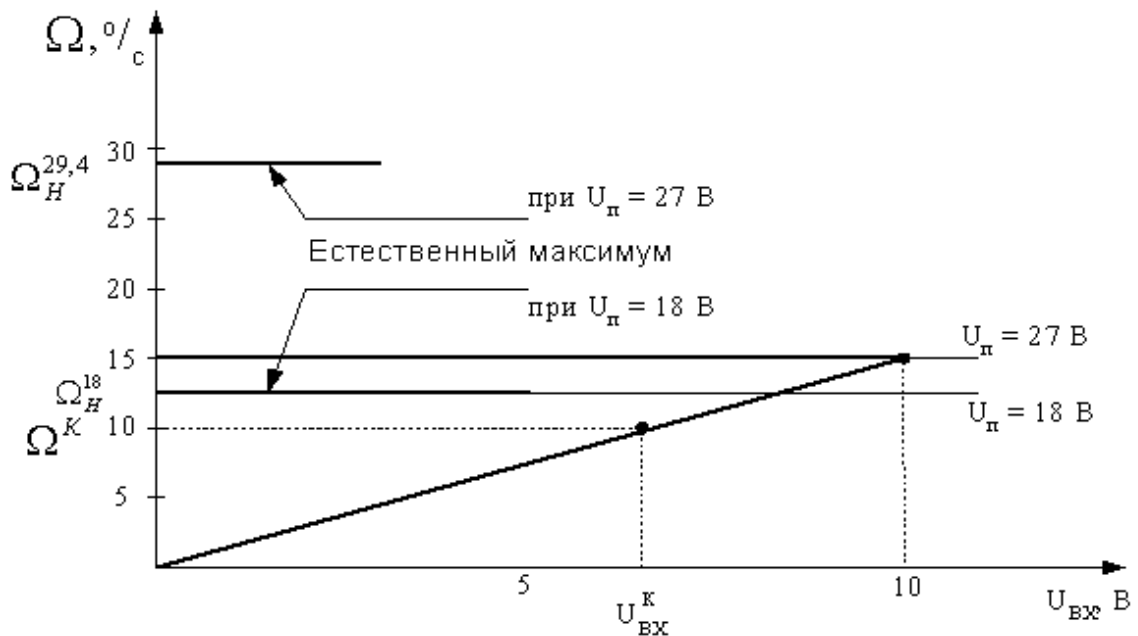


Рис.4.1.1 Выбор контрольной скорости  $\Omega^k=10^{\circ}/с$  при  $U_{вх}^k = 7В$ .

## 4.2 Требования ЕНЛГС к системам встроенного контроля

Анализ требований проводится в соответствии нормам ЕНЛГС и действующим ГОСТ.

К самолетным приводам предъявляются высокие требования по надежности, которые в полной мере относятся к рассматриваемым здесь скоростным приводам автоматов тяги АД типа ПРТ.

При этом ВСК БО должны быть спроектированы таким образом, чтобы во всех ожидаемых условиях эксплуатации на 1 час полета:

- катастрофическая ситуация, вызванная необнаруженными ВСК отказами БО и собственно отказами ВСК, не могла быть отнесена к событиям более частым, чем практически невероятные (вероятность менее  $10^{-10}$ ),

- аварийная ситуация, вызванная теми же причинами, не могла быть отнесена к событиям более частым, чем крайне маловероятные (вероятность в диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-9}$ ),

- опасная ситуация, вызванная теми же причинами, не могла быть отнесена к событиям более частым, чем маловероятные (вероятность в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^{-7}$ ),

- усложнение условий полета, вызванное теми же причинами, не могло быть отнесено к событиям более частым, чем умеренно вероятные (вероятность в диапазоне  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$ )

Примечание. Расчет показателей надежности производится по ОСТ 100132-84 и ОСТ 100448-92 с учетом требования НЛГС.

Существует два основных способа достижения заданной надежности. Первый способ заключается в использовании высоконадежных элементов с индивидуальным подбором их параметров, второй – путем дублирования имеющихся в наличии элементов. Для привода жизненноважных ИМ в авиации чаще всего используются механизмы повышенной надежности (МПН). Для выявления возможных отказов и отключения отказавших каналов, привода оборудуются средствами встроенного контроля. ВСК, работающая параллельно каналам, снижает его надежность, но в целом надежность привода повышается. Это требует предъявления обоснованных требований к надежности ВСК и каналов привода.

Рассмотрим характерные из них для рассматриваемых приводов.

Для функциональных систем самолета, отказ элементов которых может служить непосредственной причиной возникновения опасных ситуаций, должны быть предусмотрены средства контроля их состояния. При этом в качестве контролируемого параметра системы выбирать такой параметр, отклонение которого от нормированного значения не сопровождается возникновением неисправности, а предупреждает о ее приближении.

Элементы системы контроля и регистрации размещены на объектах контроля или встроенные в них, не должны заметно снижать безотказность этих объектов.

Вероятность ложных сигналов автоматизированного контроля должна быть сведена к минимуму.

#### Общие требования ЕНЛГС к ВСК БО

1. Должна быть предусмотрена возможность контроля привода на земле исправности привода. Способы и методы контроля должны быть изложены в эксплуатационной документации.

2. Если в качестве способа обеспечения безопасности автоматического управления самолетом используется контроль отказов, то в конструкции должны быть предусмотрены средства контроля, обеспечивающие выдачу информации об отказах, приводящих к возникновению отказных состояний системы.

3. Должно быть предусмотрено средство, обеспечивающее невозможность включения рабочего режима привода до готовности или при отказе взаимодействующего оборудования, которое выдает (снимает) соответствующие сигналы исправности (готовности).

4. При снятии одного или нескольких сигналов исправности взаимодействующего оборудования или при возникновении отказа в приводе, имеющем устройство контроля, должно быть обеспечено автоматическое переключение привода на работу с исправным каналом с сохранением текущего режима САУ или автоматическое отключение привода.

При отсутствии сигналов исправности должна быть обеспечена блокировка включения неисправного режима работы.

5. При параллельной схеме включения в приводе должно быть предусмотрено устройство “пересиливания” (при этом допускается отключение САУ). Величина усилия (момента), прикладываемого к выходному звену для “пересиливания”, должна быть оговорена в эксплуатационной документации САУ.

6. Все задачи эксплуатационного бортового контроля оборудования ЛА на всех видах ТО (кроме регламентных работ) и в полете должны решаться с помощью системы средств встроенного контроля без использования КПА.

Для решения всего перечня задач эксплуатационного контроля БО на борту ЛА наряду с системой средств контроля должны использоваться общесамолетные системы индикации и сигнализации и бортовое устройство регистрации (БУР).

7. При проведении периодических (регламентных) работ в дополнение к системе средств встроенного контроля могут применяться внешние средства контроля:

-контрольно–проверочная аппаратура (КПА), средства измерения общего назначения и наземные автоматизированные системы контроля (НАСК).

8. Контроль на оперативных формах ТО при подготовке ЛА к полету.

При проведении автоматизированного контроля на оперативных этапах подготовки к полету начальным моментом должно являться задание

техническим персоналом непосредственно (или экипажем дистанционно) режима наземного расширенного контроля.

9. По получении сигнала режима “Контроль” все модули, системы, устройства и агрегаты комплексов БО, в том числе и ПРТ, должны сначала осуществлять самоконтроль с одновременной выдачей тестовых значений выходных параметров, а по окончании самоконтроля осуществить оценку исправности входных каналов связи (наличие поступления информации и ее достоверности) и по совокупности проверок сформировать и выдать во ВСУТ результаты контроля в виде сигнала “Исправность”. Выдача контрольных значений параметрической информации должна осуществляться до момента снятия режима “Контроль”

10. Для контроля в полете ВСК отдельных систем, модулей, устройств и агрегатов комплексов БО, в том числе ПРТ, должны осуществлять непрерывный автоматический контроль собственной работоспособности и выдавать информацию в центральные ЦВМ комплекса и вычислительных систем о своем состоянии в виде сигнала “Готовность1” и “Готовность2” каналов ПРТ.

11. ВСК привода должен проводиться с момента включения питания непрерывно. Автоматический контроль работоспособности системы осуществляется в основном путем имитации контрольного значения входного сигнала с дальнейшей его обработкой, преобразованием и сравнением на выходе с заранее известными величинами с формированием и выдачей контрольной информации о наличии отказов оборудования.

12. ВСК должны принимать внешний управляющий сигнал (команду) режима “Контроль” и переходить на осуществление наземного (расширенного) контроля системы с определением ее работоспособности и исправности входных каналов связи, а также обеспечивать выдачу контрольных значений выходных параметров, а в случае выявления неисправности - сообщений об отказах.

13. ВСК систем должны запоминать и индицировать информацию об обнаруженных отказах блоков. Необходимо при этом предусмотреть возможность возврата указанных устройств с памятью об отказе в исходное состояние.

14. Полнота контроля систем с помощью ВСК в рабочем режиме должна быть не менее 0,9, а в режиме наземного расширенного контроля – не менее 0,95.

15. Обнаружение места отказов с помощью ВСК систем должно осуществляться с глубиной до конструктивно-сменного блока, модуля, устройства агрегата и/или линии связи с вероятностью не менее 0,9,

16. ВСК привода должны продолжать правильно функционировать после перерывов питания, временные и амплитудные характеристики которых оговорены в ГОСТ 19705-81.

## 4.3 Алгоритм ВСК скоростных следящих приводов

### 4.3.1 Основные технические характеристики скоростных следящих приводов автоматов тяги авиадвигателей самолетов Ту-204 и Ил-96-300

Рассмотрим сначала особенности работы приводов и их взаимодействие со средствами контроля.

В рассматриваемых приводах, в которых скорость выходного вала пропорциональна величине и соответствует знаку входного сигнала, принята двухканальная структура. Каналы работают одновременно через дифференциал на один выходной вал с половинными скоростями и контролируются "своим" ВСК. При выходе одного из них из строя он отключается с помощью ВСК, а крутизна скоростной характеристики и скорость исправного канала увеличивается вдвое.

Привод ПРТ имеет в своем составе два электронных канала управления, два бесконтактных ЭД типа ДБ-32-25-12 (двигатель бесконтактный, диаметр корпуса 32 мм, номинальная мощность - 25 Вт, номинальная частота вращения =12000 об/мин) и редуктор, имеющий два или четыре выходных вала по числу АД. Движения ЭД суммируются с помощью дифференциала. Каждый канал контролируется с помощью ВСК, обеспечивающей непрерывный контроль работоспособности в полёте и предполётный (наземный) контроль самого ВСК с помощью встроенных средств диагностики привода по командам "Тест" ("Т") и анализом сигнала ИСПРАВНОСТЬ привода, в вычислителе ВСУТ.

Привод ПРТ в случае выявления отказа снимает сигнал ИСПРАВНОСТЬ и обесточивает привод за время 0,2-0,3 с с момента возникновения отказа, отказ при этом запоминается.

Привод не имеет в своём составе специального датчика скорости выходного вала, а использует сигналы ДПР, частота которых прямо пропорциональна угловой скорости ЭД, а чередование фаз определяет направление его вращения. Формирование сигналов ДПР осуществляет ПК, откуда эти сигналы поступают в КУ и КК, где преобразуются в аналоговые сигналы, пропорциональные угловой скорости вращения ЭД (см. раздел 2).

При наличии управляющего сигнала в усилителе привода производится алгебраическое суммирование этого сигнала с сигналом обратной связи для получения сигнала ошибки (см. раздел 3).

Полученный в усилителе сигнал ошибки поступает на интегрирующий усилитель и далее на ШИМ – преобразователь (см. раздел 3.3).

Одновременно формируется сигнал направления вращения ЭД.

Эти сигналы поступают в ПК в виде логических сигналов управления, который по сигналам ШИМ - преобразователя, логического сигнала направления вращения и сигналам ДПР обеспечивает коммутацию фаз ЭД.



Сигналы ДПР помимо ПК используются также в КУ для формирования сигнала ОС по угловой скорости вращения ЭД. Вращение ЭД через редуктор и муфты электромеханизма передаётся на выходной вал.

При замыкании концевых выключателей ЭМ в одном из крайних положений логическая схема управления через ПК переводит ЭД в режим динамического торможения, и ЭД останавливается. То же самое происходит, если входной сигнал управления не превышает фиксированную зону нечувствительности порядка 0,25В.

Устройство встроенного непрерывного контроля обеспечивает слежение за текущим значением скорости и входным сигналом с формированием сигнала отказа и отключением силового питания канала управления в следующих случаях:

- активный отказ (вращение выходного вала при отсутствии входного сигнала управления или превышение максимальной расчётной скорости);
- отклонение значения скорости выходного вала от расчётного на 20-30 % от максимального значения;
- контроль в крайних положениях выходного вала при срабатывании концевых выключателей;
- контроль направления вращения ЭД;
- пассивный отказ (отсутствие движения выходного звена при наличии управляющего сигнала);
- контроль сигналов ДПР.

Привод ПРТ работает в двух режимах:

- "ПОДГОТОВКА" при поступлении в оба блока БУПРТ сигнала "f", когда оба исполнительных ЭД в каждом канале вращаются со скоростями, пропорциональными входному управляющему сигналу, все электромагнитные муфты сцепления отключены, и выходные валы механизма МРТ не перемещаются;

- "ОТРАБОТКА" при поступлении в каждый блок БУПРТ сигналов "f" и "m авт", когда все четыре электромагнитные муфты сцепления включаются, и выходные валы ЭМ начинают перемещаться с одинаковой угловой скоростью, пропорциональной величине входного управляющего сигнала, причем положительной полярности сигнала соответствует перемещение РУД в сторону увеличения тяги.

При снятии сигнала "f" на входе одного из блоков БУПРТ ЭД соответствующего канала ПРТ останавливается, что в исправном приводе не приводит к изменению заданной скорости и направления вращения выходного звена.

Пропадание сигнала "m авт" на одном из блоков БУПРТ в исправном приводе также не приводит к изменению заданной скорости и направления вращения выходного звена электромеханизма МРТ.

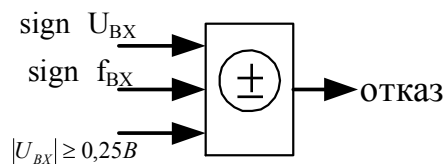
Пропадание сигнала "m авт" на обоих блоках БУПРТ приводит к отключению всех четырех муфт сцепления. Любая из четырех муфт сцепления

отключается также при появлении сигнала +27В после срабатывания микропереключателя ручного управления на соответствующем РУД (МКВ РУД) и включается при снятии этого сигнала, что обеспечивает беспрепятственное ручное управление этим РУД при включенном режиме автоматического управления. Отключение одной муфты сцепления отсоединяет от общей линии передачи соответствующую секцию звена ПРТ, что не влияет на работу остальных секций. Каждая из четырех секций ПРТ сопрягается с соответствующим РУД и имеет в своем составе по два концевых выключателя - КВМГ и КВВГ. При срабатывании двух любых из четырех КВВГ ЭД обоих каналов электромеханизма ПРТ прекращают вращение в направлении увеличения тяги. Муфты сцепления при этом остаются включенными. При срабатывании двух любых из четырех КВМГ ЭД обоих каналов прекращают вращение в направлении уменьшения тяги. Муфты сцепления при этом остаются включенными. Конструкция электромеханизма, имея в своем составе муфты пересиливания, обеспечивает возможность ручного управления тягой при приложении определенных усилий к РУД даже при включенных электромагнитных муфтах сцепления, что повышает безопасность полета.

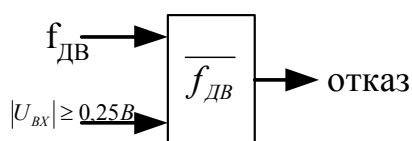
#### 4.3.2 Классификация и способы определения внезапных отказов скоростных приводов. Общая структурная схема ВСК

Анализ работы приводов, результаты многочисленных испытаний в опыт эксплуатации показывают, что внезапные отказы можно разбить на четыре группы.

А) Направление вращения выходного вала механизма не совпадает с заданным. Определить этот отказ можно путем сравнения знаков входного сигнала и истинной частоты вращения ЭД. При это следует учесть, что сравнение сигнатур входного сигнала и истинной частоты вращения ЭД может быть произведено только при  $|U_{BX}| \geq \Delta U_{BX} > \Delta$ , когда значение входного сигнала превзойдет величину зоны нечувствительности. Значение  $\Delta U_{BX}$  здесь выбрано равным 0,25 В. Ячейка, выявляющая отказ, далее обозначена как  $\oplus$  :



Б) При входном сигнале, превосходящем зону нечувствительности, скорость выходного вала равна нулю. Ячейка, выявляющая отказ, обозначена  $\overline{f_{ДВ}}$



В) На ЭД подано полное напряжение питания, ОС не работает, ЭД вращается с повышенной скоростью.

В связи с тем, что привод астатический, т.е. в его прямой цепи установлен интегратор, то при отсутствии ОС частота вращения ЭД неизбежно будет стремиться достичь своего естественного максимума на механической характеристике ( $n_H^U, \omega_H^U, \Omega_H^U$ ). Расчет естественного максимума (см. раздел 4.4) необходимо производить исходя из максимального нормального (ГОСТ 19705-83) напряжения питания - 29,4В с учетом падения напряжения на транзисторах ПК (2 транзистора по 1 В).

Г) Повреждения в цепях ДПР

Повреждения в цепях ДПР могут быть разбиты на четыре группы:

Первая группа – I (рис.4.3.2.1)

Отказ произошел на входе канала управления

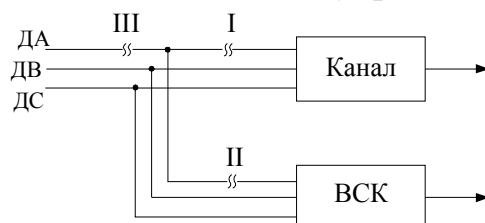


Рис. 4.3.2.1. Отказы в цепях ДПР

В этом случае сигнал обратной связи ( $f_{ДПР} \times 6$ ) и напряжение ОС в канале уменьшится в три раза (рис. 4.3.2.3), следовательно, крутизна скоростной характеристики возрастет втрое. Признак отказа: разность сигналов  $f_{ДПР} \times 3$  канала и ( $f_{ДПР} \times 3$ ) ВСК не равна нулю.

Ячейка, выявляющая отказ, обозначена "Δω".(Рис. 4.3.2.2)

Вторая группа - II (рис. 4.3.2.1).

Отказ произошел на входе ВСК. Признак отказа: нарушение последовательности чередования фаз. Ячейка, выявляющая отказ обозначена "ДПР".

Третья группа - III (рис. 4.3.2.1).

Отказ произошел в общей цепи канала управления и ВСК. Крутизна скоростной характеристики возрастет втрое. Признак отказа: нарушение последовательности чередования фаз.

Четвертая группа.

Исчезновение сигнала по всем трем фазам ДПР. Причина: выход из строя генератора высокочастотного сигнала, питающего ДПР. Признак отказа: при  $|U_{ВХ}| > \Delta$ , выходной вал неподвижен.

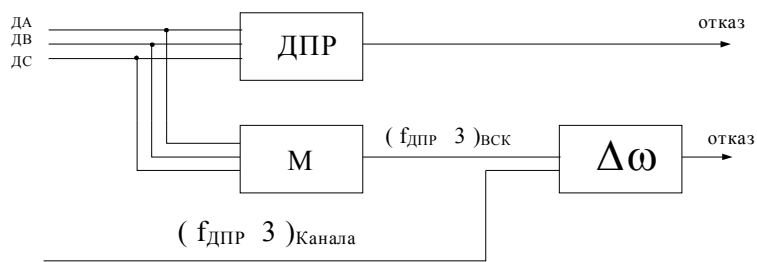


Рис.4.3.2.2. Ячейка формирования отказа по  $\Delta\omega$

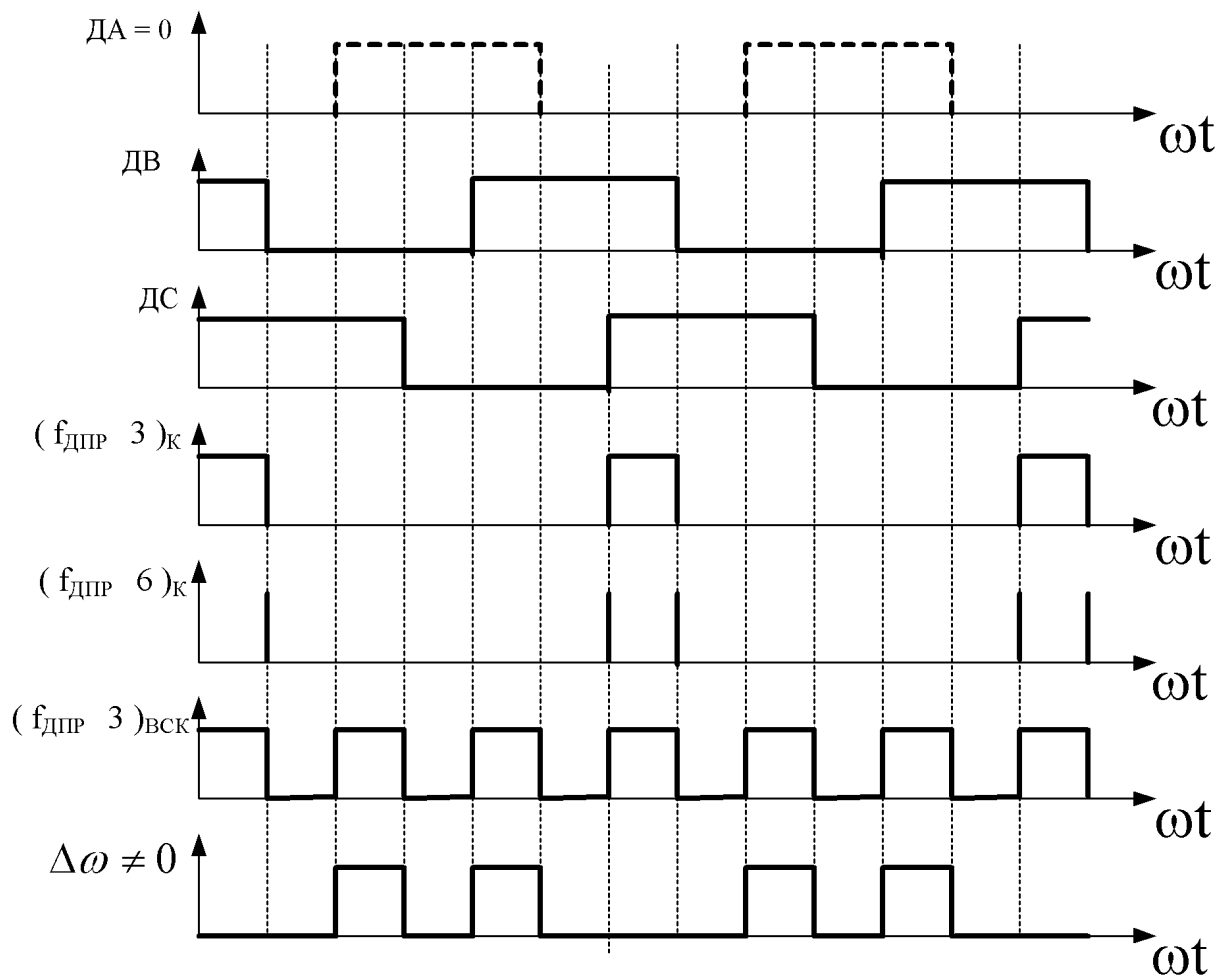


Рис. 4.3.2.3 Выявления отсутствия сигнала ДПР на входе канала управления

Перечень рассмотренных внезапных отказов привода сведен в таблице 4.3.2, на основе которой сформирована общая структурная схема ВСК (Рис. 4.3.2.4)

Таблица 4.3.2

## Перечень внезапных отказов астатического скоростного привода

Характер отказа		Проявление отказа	Обозначение ячейки
Направление вращения выходного вала не совпадает с заданным		Привод управляем, но направление вращения выходного вала не совпадает с заданным	⊕
При наличии входного сигнала скорость выходного вала равна нулю		Выходной вал неподвижен	$\overline{f_{ДВ}}$
На двигатель подано максимальное напряжение, обратная связь не работает		Скорость двигателя достигает естественного максимума	$\Omega_{МАХ}$
Повреждение одной фазы ДПР	Канала	Привод управляем, но крутизна скоростной характеристики возросла втрое	$\Delta\omega$
	ВСК	Канал управления исправен	ДПР
	Канала управления и ВСК одновременно	Привод управляем, но крутизна скоростной характеристики возросла втрое	ДПР
Отказ всех трех фаз одновременно		Привод неподвижен	$\overline{f_{ДВ}}$

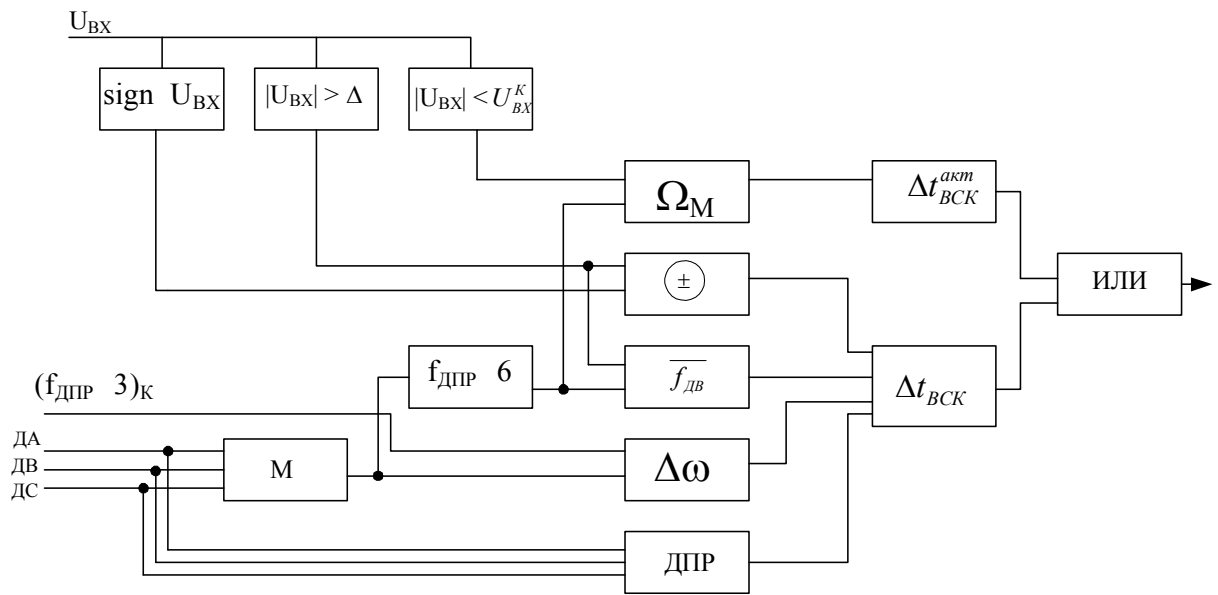


Рис. 4.3.2.4 Общая структурная схема ВСК

#### 4.4 Расчет параметров скоростных приводов в случае активного отказа

В нормальном режиме работы привод управляет РУД'ами в замкнутом контуре по сигналам управления ВСУТ. Сигнал управления компенсируется сигналом обратной связи при достижении приводом требуемой скорости (см. разделы 1 и 2). В рабочем режиме привод обычно работает с небольшими скоростями вблизи установившегося положения. Выход на большие скорости довольно редок и реализуется, например, при резком уходе ВС на второй круг. Однако, выход привода на предельные обороты возможен при активных электрических отказах в системе управления, например, при отказе цепи ОС. При этом сигнал рассогласования, полученный при подаче управляющего сигнала, интегрируется в прямом контуре, что приводит к полному открытию ШИМ (плотность заполнения импульса  $\gamma=1$ ), подаче на ЭД полного напряжения питания и роста его скорости до достижения естественного максимума в соответствии с механической характеристикой (см. Рис. 4.4.1).

Этот режим является наиболее опасным, поэтому его параметры подлежат тщательным расчетам при разработке как контура управления, так и контура контроля.

Исходными данными для расчета режима активного отказа привода являются статические характеристики привода и требования, предъявляемые к его ВСК. В основу расчетов положены механические характеристики ЭД в разомкнутом контуре при различных напряжениях питания (рис.4.4.1) и скоростная характеристика привода (рис.3.1.5). Номинальный момент нагрузки на выходном валу ЭМ при управлении двумя РУД'ами равен  $M_c=22 \text{ Н}\cdot\text{м}$  ( $2,2 \text{ кГс}\cdot\text{м}$ ). Электромеханическая постоянная времени ЭД принимается  $\tau=0,03 \text{ с}$ . Номинальная скорость вращения ЭМ при номинальной нагрузке в замкнутом контуре в диапазоне напряжения питания  $24\text{В}\div 29,4\text{В}$  и входном сигнале  $U_y=10\text{В}$  составит  $\Omega=20^\circ/\text{с}\pm 10\%$  (см. рис.3.1.5). Номинальная скорость ЭД при сигнале  $U_{\text{вх}}=\pm 10\text{В}$  во всех условиях эксплуатации не более  $\pm 150 \text{ Гц}$ , ( $9000 \text{ об/мин}$ ). К.П.Д. редуктора принимаем  $\eta_{\text{ред}}=0,8$ . При этих условиях выбег выходного вала ЭМ (без учета люфта) не должен превышать  $5^\circ$ .

Так как механическая связь между ЭД и валом ЭМ жесткая, все характеристики можно рассматривать как относительно вала ЭМ, так и вала ЭД. Для расчетов введем дополнительные обозначения:

$\varphi_c$  – угол поворота вала ЭМ (град);

$\Omega_c$  – скорость его вращения ( $^\circ/\text{с}$ );

$n_{\text{дв.}}$  – скорость вращения вала ЭД (тыс. об/мин.);

$\omega_{\text{дв.}}$  – угловая скорость вращения ЭД (1/с);

$f_{\text{дв.}}$  – частота вращения вала ЭД (Гц.);

$M_c$  – момент нагрузки на выходном валу ЭМ (Н·м или кГс·м)

Согласно ГОСТ 19705-83 при нормальном питании напряжение постоянного тока 27В колеблется в пределах  $24\text{В}\div 29,4\text{В}$ .

В исправном приводе ЭД обычно работает в рабочей зоне. В случае

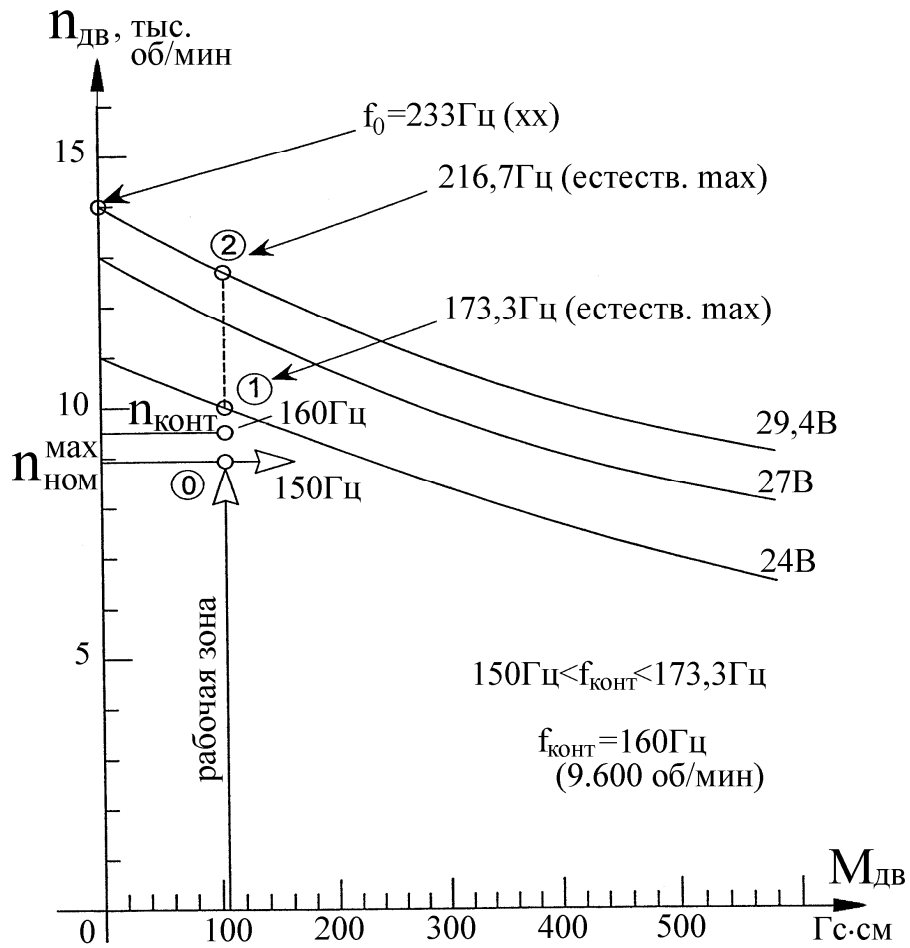


Рис.4.4.1. Механическая характеристика электродвигателя ДБ32-25-12

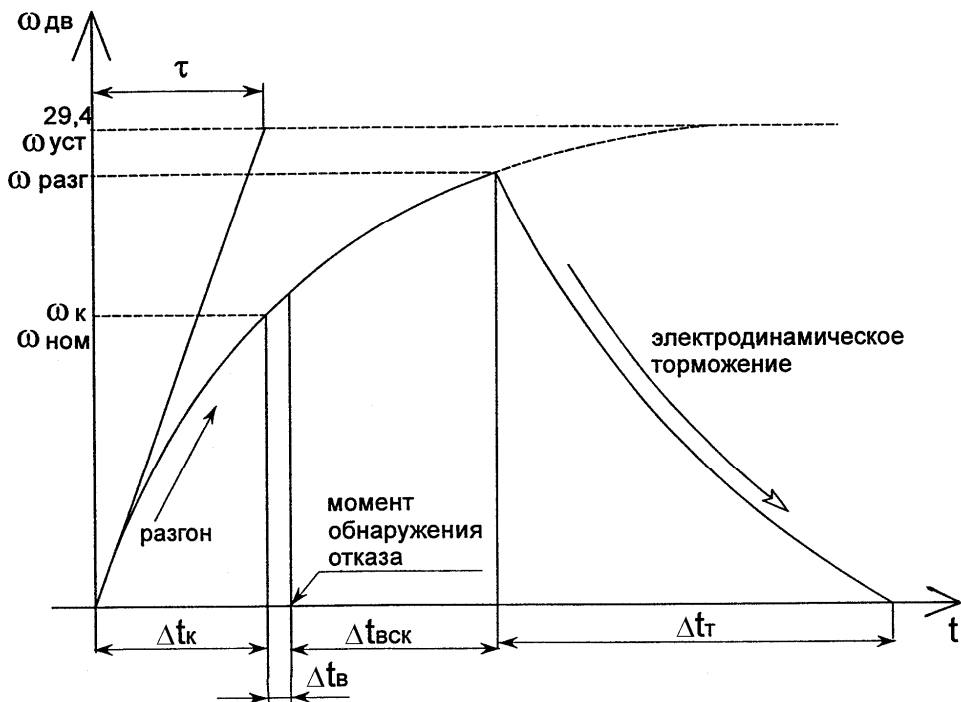


Рис.4.4.2. Оценка выбега выходного вала электродвигателя при активном отказе



активного отказа его скорость стремится достичь своего естественного максимума между точками 1 и 2 (см. рис.4.4.1) т.е. она обязательно должна пройти участок  $0 \div 1$ , поэтому на этом участке и необходимо зафиксировать ее выход за допустимые пределы.

Номинальная скорость вращения ЭД в разомкнутом контуре при  $M_{д.ном} = 100 \text{ Гс} \cdot \text{см}$  равна  $n_n = 12000$  об/мин (частота  $f_n = 200 \text{ Гц}$ ). Если в замкнутом контуре при  $M_c = 2,2 \text{ кГс} \cdot \text{м}$  принять  $\Omega_{ном} = 20^\circ/\text{с}$  и  $f_{д.ном} = 150 \text{ Гц}$ , то передаточное

$$\text{отношение редуктора } i = \frac{f_{д.ном}}{\Omega_{ном}} = \frac{150 \text{ Гц}}{20^\circ/\text{с}} \cdot 360^\circ = 2700$$

$$\text{Тогда } M_{д.ном} = \frac{M_c}{i_{ред} \cdot \eta_{ред}} = \frac{2,2 \text{ кГс} \cdot \text{м}}{2700 \cdot 0,8} \cdot 10^5 = 101,85 \text{ Гс} \cdot \text{см}, \text{ а скорость}$$

$$n_{д.ном} = f_{д.ном} \cdot 60 = 150 \text{ Гц} \cdot 60 = 9000 \text{ об/мин}.$$

Исходя из этих данных, определим значения максимальных установившихся скоростей при предельных напряжениях  $U_{пит}$ :  $f_{уст}^{24}$  и  $f_{уст}^{29,4}$ .

Выбираем значение контрольной скорости (КС)  $f_k = 160 \text{ Гц}$ , достичь которую ЭД может только при активном отказе. В этом случае за наикратчайшее время необходимо затормозить ЭД и отключить канал. Это время сложится из времени:

- достижения КС –  $\Delta t_{контр}(\Delta t_k)$  в процессе его разгона по механической характеристике,
- вычисления текущей скорости -  $(\Delta t_v)$ , которое составляет порядка 1мс,
- задержки срабатывания ВСК  $\Delta t_{ВСК}^{акт}$  (задается  $\approx 25 \text{ мс}$ );
- торможения  $(\Delta t_T)$  ЭД после перевода его в режим динамического торможения.

Тогда время разгона составит  $\Delta t_{разг} = \Delta t_k + \Delta t_v + \Delta t_{ВСК}^{акт}$  или, с учетом торможения  $\Delta t_\Sigma = \Delta t_{разг} + \Delta t_T$  (см. рис. 4.4.2).

Задержка на срабатывание ВСК во избежание ложного отказа должна быть введена обязательно, но для сокращения выбега вала она должна быть минимально достижимой.

Для упрощения численных результатов, используя линейность механических характеристик ЭД, выразим их в аналитической форме.

Дифференциальное уравнение движения привода:

$$I_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_d - M'_c \quad (4.4.1)$$

где  $I_\Sigma$  - суммарный момент инерции, приведенный к валу ЭД,  
 $M'_c$  - приведенный к валу ЭД момент сопротивления.

Его решением при  $\omega_{нач} = 0$  является выражение

$$\omega(t) = \omega_{уст}^{29,4} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.4.2)$$

или в герцах,  $f(t) = f_{уст}^{29,4} (1 - e^{-t/\tau})$

Для вычисления времени разгона  $\Delta t_k$  до КС  $\omega_k (f_k)$ , в (4.4.2) вместо  $\omega(t)$  подставим  $\omega_k$ , вместо  $t \rightarrow \Delta t_k$  и решим его относительно  $\Delta t_k$ :

$$\Delta t_k = \tau \cdot \ln \frac{\omega_{уст}^{29,4}}{\omega_{уст}^{29,4} - \omega_k} \quad (4.4.3)$$

или в герцах:  $\Delta t_k = \tau \cdot \ln \frac{f_{уст}^{29,4}}{f_{уст}^{29,4} - f_k} = 0,03 \cdot \ln \frac{216,7}{216,7 - 160} = 0,04c$ , где  $f_{уст}$  и  $f_k$

взяты из рис.4.4.1.

Тогда  $\Delta t_{разг} = \Delta t_k + \Delta t_{ВСК}^{акт} = 0,04 + 0,025 = 0,065c$ .

Рассчитаем угол, на который повернется при разгоне выходной вал ЭД ( $\varphi_d^{разг}$ ) и вал ЭМ: ( $\varphi_c^{разг}$ ) за время  $\Delta t_{разг}$  при  $t_{нач}=0$ ,  $\varphi_{нач} = 0$ .

Зависимость угла во времени получим интегрируя выражение (4.4.2):

$$\varphi^{разг}(t) = \omega_{уст}^{29,4} \cdot t - \omega_{уст}^{29,4} \cdot \tau (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.4.4)$$

Если расчет вести в герцах, то

$$\varphi^{разг}(t) = f_{уст}^{29,4} \cdot t - f_{уст}^{29,4} \cdot \tau (1 - e^{-t/\tau}) = 216,7 \cdot 0,065 - 216,7 \cdot 0,03 (1 - e^{-\frac{0,065}{0,03}}) = 8,43$$

оборота ЭД или  $\varphi_c^{разг} = \frac{\varphi_{дв.}^{разг} \cdot 360^\circ}{i} = \frac{8,43 \cdot 360^\circ}{2700} = 1,12^\circ$  вала ЭМ.

Выражение для скорости при динамическом торможении имеет вид:

$$\omega_T(t) = \omega_{разг} \cdot e^{-t/\tau} - \omega_M^{29,4} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.4.5)$$

или в герцах:

$$f_T(t) = f_{разг} \cdot e^{-t/\tau} - f_M^{29,4} (1 - e^{-t/\tau})$$

Значение  $f_{разг}$  можно получить, если в (4.4.2) подставить  $\Delta t_{разг}=0,065c$ :

$$f_{разг} = 216,7 (1 - e^{-\frac{0,065}{0,03}}) = 192 Гц$$

При расчете времени динамического торможения учтем, что оно закончится, когда скорость станет равной нулю. Поэтому, положив в (4.4.5)  $\omega_T(t)=0$ ,  $t=\Delta t_T$ , получим:

$$\omega_{разг} \cdot e^{-t_T/\tau} - \omega_M^{29,4} (1 - e^{-t_T/\tau}) = 0 \text{ и}$$

$$\Delta t_T = \tau \cdot \ln \frac{\omega_{разг} + \omega_M^{29,4}}{\omega_M^{29,4}} \text{ и, если расчет в герцах, то:}$$

$$\Delta t_T = \tau \cdot \ln \frac{f_{\text{разг}} + f_M^{29,4}}{f_M^{29,4}} = 0,03 \ln \frac{192 + 16,3}{16,3} = 0,076 \text{ с.}$$

Для расчета угла поворота вала ЭД  $\varphi_D^T$  и выходного вала ЭМ  $\varphi_C^T$  при торможении проинтегрируем (4.4.5), тогда:

$$\varphi_{\text{дв.}}^T(t) = \omega_{\text{разг}} \cdot \tau (1 - e^{-\Delta t_T / \tau}) + \omega_M^{29,4} \cdot \tau (1 - e^{-\Delta t_T / \tau}) - \omega_M^{29,4} \cdot \Delta t_T \quad (4.4.6)$$

или, если расчет в герцах, то

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{дв.}}^T(t) &= f_{\text{разг}} \cdot \tau (1 - e^{-\Delta t_T / \tau}) + f_M^{29,4} \cdot \tau (1 - e^{-\Delta t_T / \tau}) - f_M^{29,4} \cdot \Delta t_T = \\ &= \\ &= 192 \cdot 0,03 (1 - e^{-\frac{0,076}{0,03}}) + 16,3 \cdot 0,03 (1 - e^{-\frac{0,076}{0,03}}) - 16,3 \cdot 0,076 = 4,5 \text{ оборота вала ЭД} \end{aligned}$$

$$\text{и } \varphi_C^T = \frac{\varphi_{\text{дв.}}^T \cdot 360^\circ \cdot 60'}{i_{\text{ред.}}} = \frac{4,5 \cdot 360 \cdot 60}{2700} = 36'(0,6^\circ) \text{ вала ЭМ.}$$

Таким образом, суммарный выбег ЭД при локализации активного отказа составит:

$$\varphi_{\text{дв.}}^{\text{акт}} \Sigma = \varphi_{\text{дв.}}^{\text{разг.}} + \varphi_{\text{дв.}}^T = 8,43 + 4,5 = 12,93 \text{ оборота ЭД или вала ЭМ:}$$

$$\varphi_C^{\text{акт}} \Sigma = \varphi_C^{\text{разг.}} + \varphi_C^T = 1,12^\circ + 0,6^\circ = 1,72^\circ.$$

Суммарное время остановки ЭД:

$\Delta t_{\text{акт}} \Sigma = \Delta t_{\text{разг}} + \Delta t_T = 0,065 + 0,07 = 0,135 \text{ с,}$  что значительно меньше допустимого.

Проведем также расчет времени вычисления контрольной скорости  $f_k$  принятого ранее  $\Delta t_B = 1 \text{ мс,}$  с учетом следующих соображений и требований:

- КС не может находиться в рабочей зоне, то есть быть меньше  $n_{\text{ном}}$  (рис.4.4.1), так как иначе в исправном приводе может возникнуть ложный отказ;

- КС не может быть больше естественного максимума при  $M_{\text{д.ном}}$  при  $U_{\text{пит}} = 24 \text{ В}$  (иначе она не будет достигнута в случае отказа), т.е. должно быть выполнено условие  $n_{\text{д.ном}} < n_{\text{контр}} < n_{\text{дв.уст}}^{24}$ . Этот диапазон довольно узкий, поэтому точность замера должна быть высокой, что предполагает импульсно-цифровой метод вычисления;

- во избежание значительного выбега выходного вала при развитии активного отказа время вычисления ( $\Delta t_B$ ) КС должно быть минимальным;

- для уменьшения времени опроса импульсного сигнала о текущей скорости его частота должна быть максимально поднята. Это достигается схемным решением (см. раздел 2.1);

- сигнал об отказе должен сохраняться, пока текущая скорость больше контрольной и исчезать, если она опустится ниже контрольной.

Индикатор контрольной частоты изображен на рис.4.4.3. Схема содержит

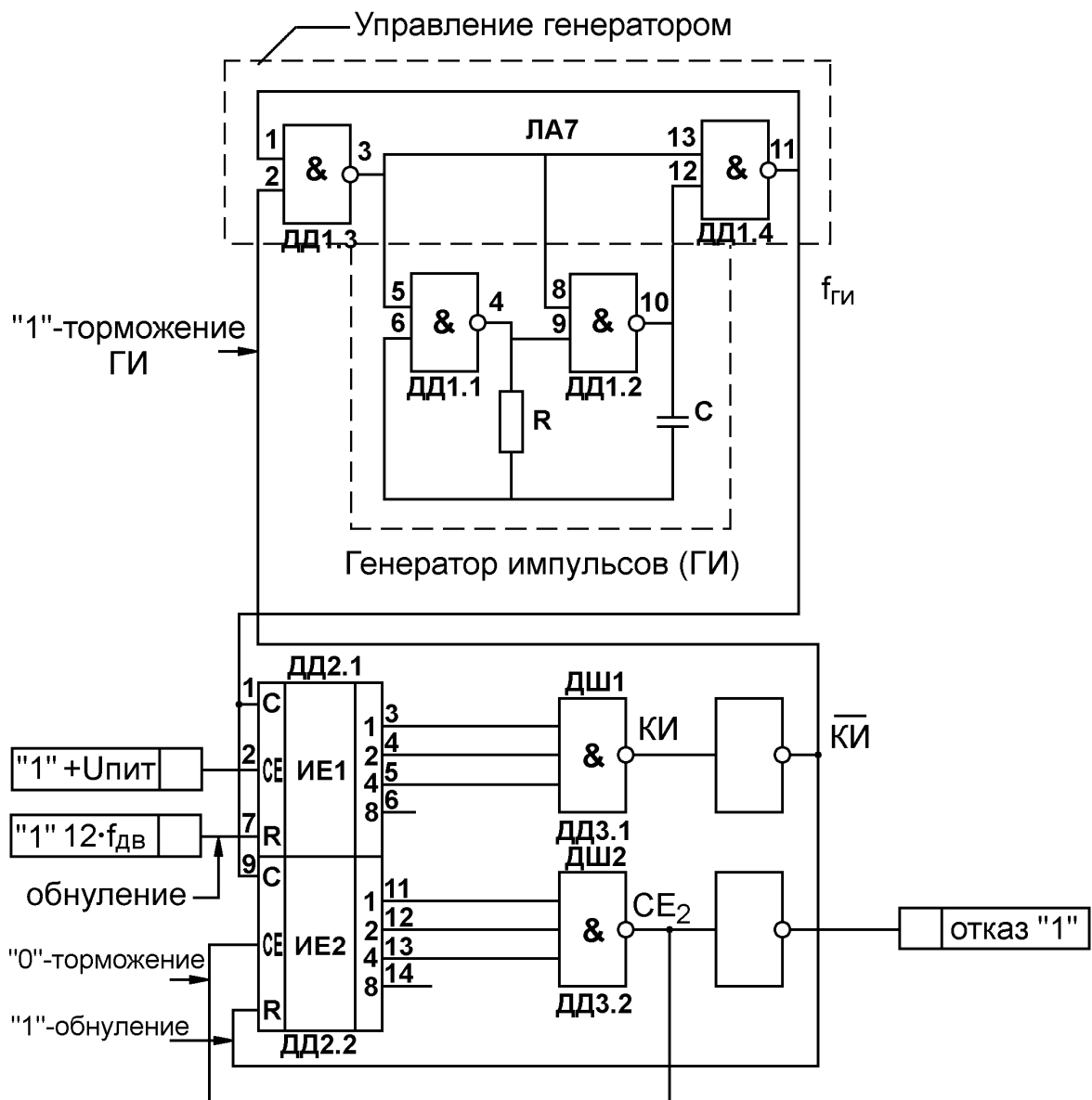


Таблица истинности счетчика 564ИЕ10

выполняемая операция	счет импульсов		счета нет				на всех выходах "0"
	Г	0	Г	*	Г	1	
С	Г	0	Г	*	Г	1	*
СЕ	1	Г	*	Г	0	Г	*
Р	0	0	0	0	0	0	1

\* любое состояние

Рис.4.4.3 Индикатор контрольной частоты при активном отказе.

высокочастотный генератор (генератор тактовых импульсов, ЗГ), генератор калиброванных импульсов (ГКИ) и индикатор отказа.

Высокочастотный ЗГ, выполненный на элементах “И – НЕ” ДД1.1, ДД1.2, содержит схему управления (ДД1.3, ДД1.4). Частота генерации определяется высокостабильными элементами R и C. Генератор тормозится “единицей”, поступающей на вход ДД1.3 (см. также разделы 2.3 и 2.4)

ГКИ состоит из четырехразрядного счетчика ИЕ1 (ДД2.1), дешифратора ДШ1 (ДД3.1) числа  $N_1=7$  в двоичном коде и инвертора ДД4.1.

Индикатор отказа состоит из четырехразрядного двоичного счетчика ИЕ2 (ДД2.2), дешифратора ДШ2 (ДД3.2) числа  $N_2=15$  и инвертора ДД4.2.

Если на входе ДШ1 имеет место хотя бы один “ноль”, то калиброванный импульс  $KИ=1$ , а  $\overline{KИ}=0$ : ГИ работает, оба счетчика считают. Если на входе ДШ1 – все “единицы”, то  $KИ=0$ ,  $\overline{KИ}=1$ : ГИ заторможен, оба счетчика не считают (рис.4.4.4).

При увеличении скорости ЭД пауза между КИ уменьшается и, наконец, наступит момент, когда импульсы сомкнутся. Это означает, что  $KИ=1$ ,  $\overline{KИ}=0$ : ГИ работает, оба счетчика считают, но счетчик ИЕ1 обнуляется, не доходя до цифры “7”, а счетчик ИЕ2 считает до “15” и тормозится через вход  $СЕ_2=0$ ; на выходе инвертора ДД4.2 появляется стабильная “1” (отказ). Через время  $\Delta t_{ВСК}^{акт} = \Delta t_{в}$  подается сигнал на торможение ЭД (рис.4.4.5).

Если при росте скорости ЭД момент смыкания КИ принять за признак прохождения КС, то  $\Delta t_{ки} = \frac{1}{12 \cdot f_{дв}} = \frac{1}{12 \cdot f_{к}}$ , но  $\Delta t_{ки} = \frac{7}{f_{ги}}$ , и требуемая частота ЗГ:  $f_{ги} = 7 \cdot 12 \cdot f_{к} = 7 \cdot 12 \cdot 0,16кГц = 13,44кГц$ , а время вычисления КС при емкости ИЕ2, равной 15, составит  $\Delta t_{в} = \frac{1}{f_{ги}} \cdot 14 = 1,04мс$ .

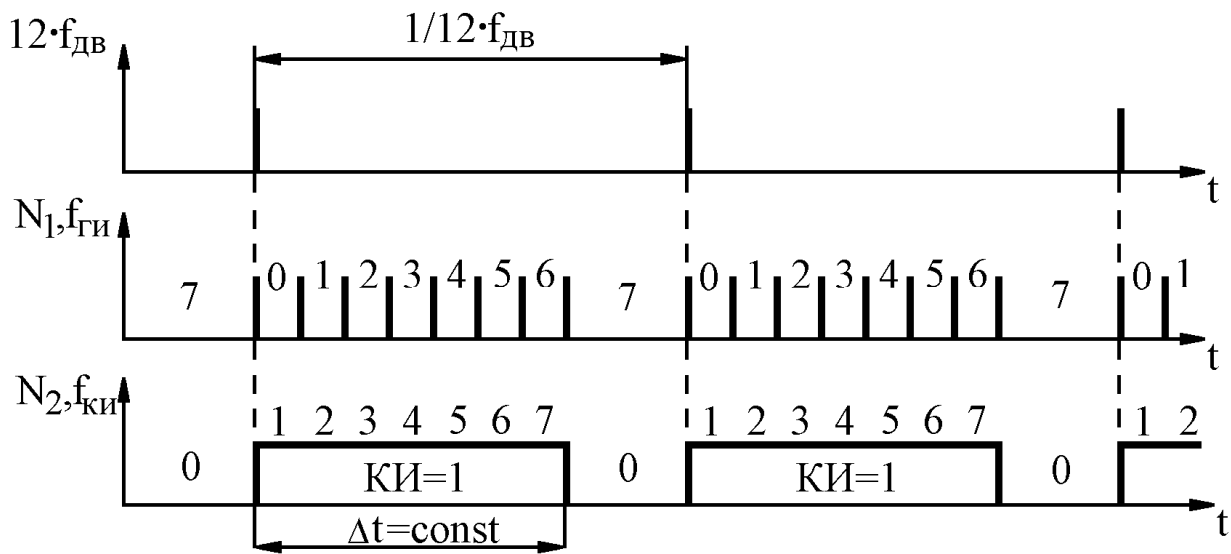


Рис.4.4.4 Циклограмма индикатора при  $f_{дв} < f_{контр}$

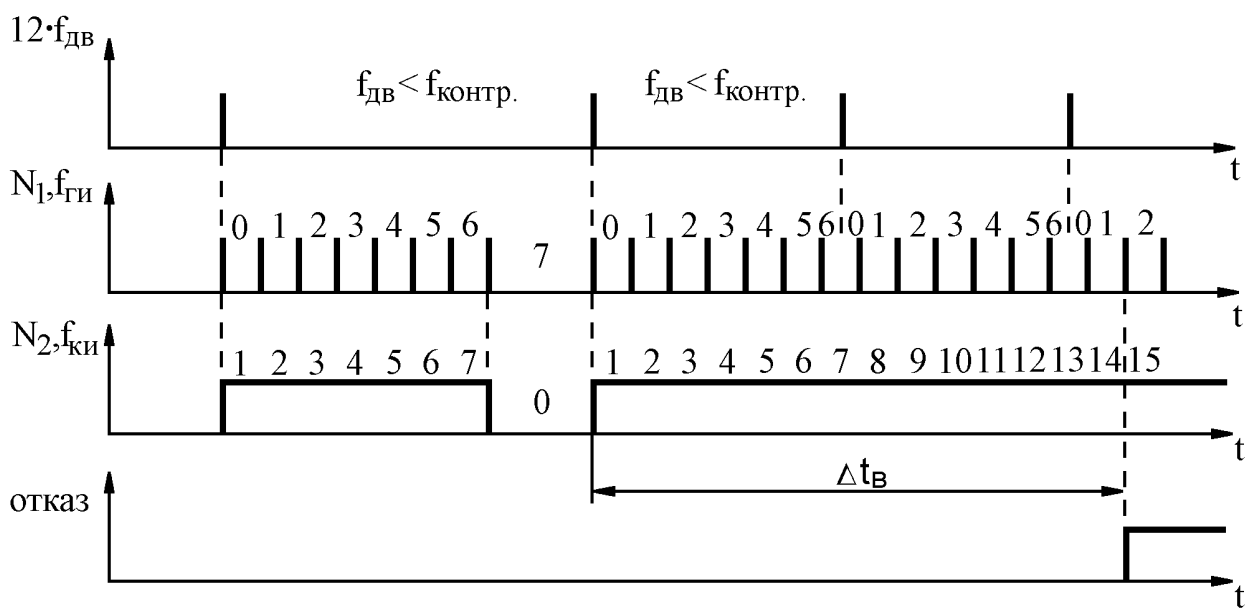


Рис.4.4.5 Циклограмма индикатора при  $f_{дв} > f_{контр}$

#### 4.5. Примеры аппаратурной реализации ВСК скоростных приводов

Привод ПРТ имеет встроенные средства контроля (ВСК) для обнаружения отказов привода, обеспечивающие:

- непрерывный контроль работоспособности в полете и обнаружение отказов во всех режимах работы;
- предполетный (наземный) контроль ВСК привода на "ОБРЫВ" с помощью встроенных средств диагностики привода по командам "Тест" (Т) и "Снятие Теста" (СТ) и одновременным анализом сигналов "ИСПРАВНОСТЬ1,2" во ВСУТе.

Привод ПРТ осуществляет отдельно контроль собственных двух каналов, распознает их отказ, в случае выявления отказа канала снимает сигнал "ИСПРАВНОСТИ" канала и обесточивает отказавший канал за время не более 0,5С с момента возникновения отказа. Отказ при этом запоминается, и обеспечивается автоматическое переключение на работу с исправным блоком. Информация об отказе каналов передается в вычислители ВСУТ (БВУТ-1 №1,2) путем снятия сигналов "ИСПРАВНОСТЬ1,2".

В случае отказа одного канала привода и его отключении или отсутствия сигналов одного из блоков управления приводом БУПРТ, или отсутствия сигналов "готовности БВУТ №1(2)" исправный блок, получая об этом информацию из другого блока (сигналы "ИСПРАВНОСТЬ" "ЗОНА"), так меняет свою структуру регулирования, что скорость выходных звеньев остается в прежнем диапазоне регулирования за счет удвоенной частоты вращения ЭД исправного канала.

##### 4.5.1. Контроль цепей ДПР

Привод не имеет в своем составе специального датчика скорости, а использует трехфазные сигналы ДПР, частота которых прямо пропорциональна угловой скорости ЭД, а чередование фаз определяет направление его вращения. Формирование сигналов ДПР осуществляет КВД, откуда эти сигналы через гальваническую развязку поступают в КУ и КК, где преобразуются в аналоговые сигналы, пропорциональные скорости вращения ЭД. Таким образом, КК использует те же сигналы ДПР, что и КУ, что в некоторых случаях отказа ДПР или схемы обработки сигналов ДПР (например, обрыв одной фазы ДПР) может привести к невыявлению отказа вследствие его симметричности для КУ и КК. Поэтому с целью выявления отказов общей для КУ и КК функциональной части привода КК содержит схему контроля ДПР.

Основой методики обнаружения отказов ДПР является то обстоятельство, что результатом любых отказов ДПР и схемы обработки сигналов ДПР является возникновение одновременно в трех фазах сигнала либо трех логических "1", либо "0", которые повторяются с частотой вращения ЭД. В исправном ДПР таких импульсов не возникает. Поэтому принцип контроля

цепей ДПР основан на фиксации устойчиво повторяющихся импульсов из трех "1" или "0". Схема контроля ДПР состоит из:

- логических схем "И", "ИЛИ", "ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ИЛИ", определяющих наличие трех "1" или "0" в сигналах ДПР;
- интегрального накопителя на конденсаторе, обеспечивающего преобразование импульсов в аналоговое напряжение;
- порогового устройства, срабатывание которого формирует сигнал "Отказ ДПР";
- схемы задержки на 0,3 С;
- схемы обнуления накопителя, включающей в себя делитель частоты и электронный ключ, которая обнуляет конденсатор накопителя с частотой 2 Гц с целью исключения ложного срабатывания схемы контроля ДПР от случайных помех.

Отказы ДПР через гальваническую развязку включают исполнительные реле контроля (ИРК), которые обесточивают канал, запоминают отказ и снимают сигнал "ИСПРАВНОСТИ" канала.

Схема контроля состоит из шести синхронных Д - триггеров, собранных попарно, трех схем "ИСКЛЮЧАЩЕЕ ИЛИ" и одного конъюнктора (рис.4.5.1.1). При правильном чередовании фаз ДА, ДВ, ДС на входах схем "ИСКЛ. ИЛИ" будут сохраняться сигналы разных уровней, а на их выходах - единицы. Поэтому на выходе конъюнктора будет всегда ноль (исправно). Дело в том, что при нормальной работе на выходе ДПР всегда имеются или 2 "1" или 2 "0", а так как каждая пара триггеров по С-входу работает от фронта одной фазы (первая пара от фазы ДА, вторая - от фазы ДВ, третья - от фазы ДС), то при наличии тактового импульса на входах "С" (для верхних триггеров при ДА=1), на входах "Д" и выходах верхней пары триггеров будут разные сигналы; на выходе схем "исключающее или" – "1".

Аналогично для средней пары при ДВ=1 и нижней – при ДС=1. Такая же ситуация будет и при реверсировании ЭД, т.е. будет исключен сигнал ложного отказа на выходе конъюнктора при реверсе ЭД.

К входам R верхних и S нижних Д-триггеров подключено устройство, которое при включении питания устанавливает их в состояние, обеспечивающее на входах "ИСКЛ. ИЛИ" разные сигналы.

При повреждении одной из фаз ДПР (постоянные сигналы "0" или "1") на входах "Д" и выходах триггеров не позже, чем через  $60^0$  (электрических) будут одинаковые сигналы, на выходе "исключающее или" - "0", на выходе конъюнктора – "1" (отказ).



Эта же схема позволяет, не прибегая к дополнительным аппаратным затратам, получить сигнал о направлении вращения двигателя ( $\text{sign } f_{\text{ДВ}}$ ). Для этого сигналы точек 1,2,3 следует обработать с помощью мажоритара (М).

Действительно, рассмотрим в таблице 4.1.1 последовательно состояние сигналов от 1-го до 12-го такта для вращения по часовой стрелке, соответствующее последовательности прихода сигналов датчика ДА, ДВ, ДС,

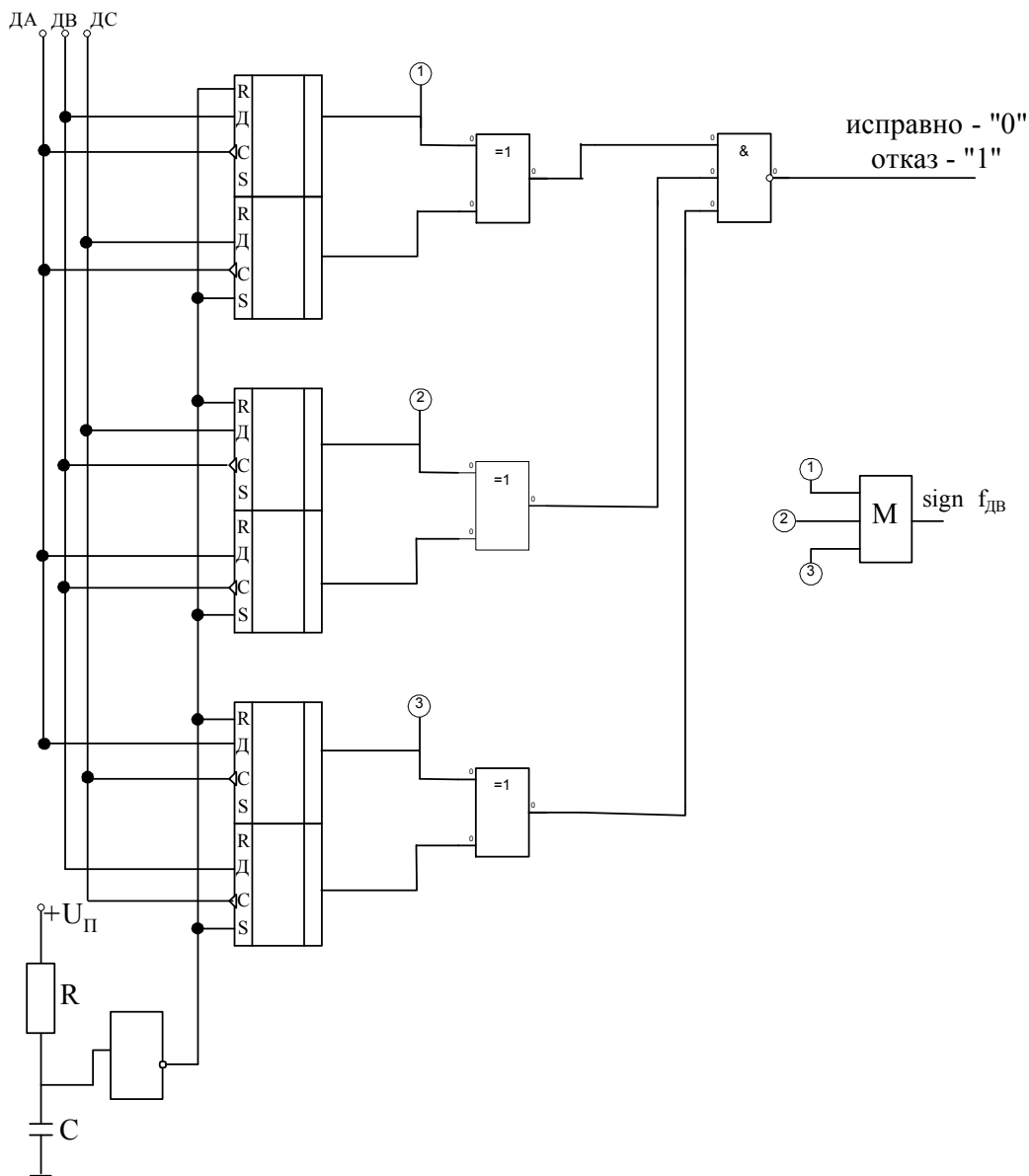


Рис.4.5.1.1 Схема обнаружения повреждения одной из фаз сигналов ДПР и определения знака фактического направления скорости ЭД ( $\text{sign } f_{\text{ДВ}}$ ).

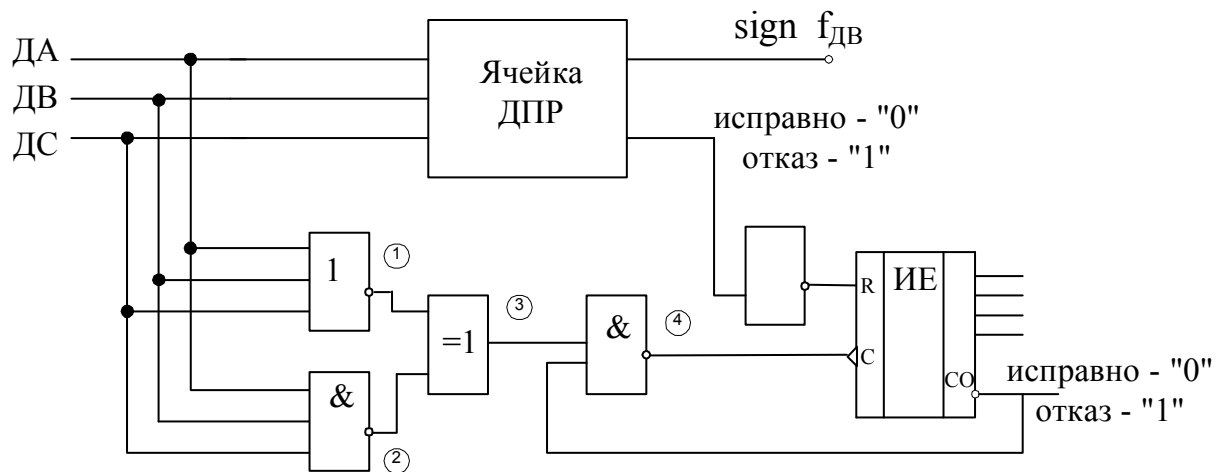


Рис.4.5.1.2 Схема исключения последствия сбоя.

Формирование сигнала  $\text{sign } f_{\text{дв}}$  при “правом” вращении (по часовой стрелке)

Таблица 4.5.1

сигналы ДПР	такты переключения фаз ЭД																		
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
ДА		■	■	■				■	■	■				■	■	■			
ДВ				■	■	■				■	■	■				■	■	■	
ДС	■	■				■	■	■				■	■	■				■	■
логические уровни сигналов состояния триггеров в точках 1,2,3 и выход мажоритары	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	2	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
	3	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
	М	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Формирование сигнала  $\text{sign } f_{\text{дв}}$  при “левом” вращении (против часовой стрелки)

Таблица 4.5.2

сигналы ДПР	такты переключения фаз ЭД																		
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
ДА		■	■	■				■	■	■				■	■	■			
ДС				■	■	■				■	■	■				■	■	■	
ДВ	■	■				■	■	■				■	■	■				■	■
логические уровни сигналов состояния триггеров в точках 1,2,3 и выход мажоритары	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	М	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

учитывая словесное содержание алгоритма работы синхронного Д-триггера:

При тактовом сигнале  $C=1$  его состояние соответствует сигналу на входе “Д”, т.е.  $Q=D$ , а при  $C=0$  – сохраняется предыдущее состояние, т.е.  $Q_{t+1}=Q_t$ .

Уровень сигналов в т.1.2.3 (их состояния  $Q_{t+1}$ ) определяется сигналами на выходе триггера “С” и “Д” и предыдущем его состоянием  $Q_t$ . Так, уровень  $Q_{t+1}$  сигнала в т.1 определяется сигналом ДА и ДВ и состоянием  $Q_t$  верхнего триггера. На тактах “1” и “2” (см. таблицу 4.5.1) на входе “С” этого триггера сигнал  $C=ДА=1$ , и сигналы на выходе триггера  $Q(1)=Q(2)=ДВ(1)=ДВ(2)=0$ . На 3-ем такте по-прежнему  $C=1=ДВ(3)$  и на выходе  $Q(3)$  сохраняется состояние  $Q(3)=ДВ(3)=1$ . Последующие 3 состояния (4-5-6) сигнал “С”= $ДА=0$ , и на выходе последовательно подтверждаются 3 “1”, т.е.  $Q(4)=Q(3)=1$ ,  $Q(5)=Q(4)=1$ ,  $Q(6)=Q(5)=1$ .

На такте №7 сигнал “С”= $1$ , и на выход перенимается состояние со входа  $Д=ДВ$ , т.е.  $Q(7)=ДВ(7)=0$  и т.д. Аналогично заполняем всю первую строку таблицы сигналов в т.1 и две последующие строки для точек 2 и 3.

В последней строке таблицы даны сигналы на выходе мажоритары (М), из которых следует, что при правом вращении везде значения  $M \equiv 1$ .

Аналогично заполняем таблицу 4.1.2 для левого вращения (ДА, ДВ, ДС), из которой следует, что при этом  $M \equiv 0$ .

Таким образом, значение  $\text{sing}(f_{\text{дв}}) = M \equiv 1$  при вращении по часовой стрелке и  $\text{sing}(f_{\text{дв}}) = M \equiv 0$  при обратном вращении.

Схема, изображенная на рис.4.5.1.1, позволяет исключить ложный отказ при любом законе изменения входного сигнала, поступающего из вычислителя, а также при любых переходных процессах, происходящих в приводе, но в устройстве использованы триггеры, работа которых может сопровождаться сбоями, предотвратить которые весьма трудно. В нормально работающей схеме сбой возможен и самоустранивается с помощью периодического сигнала ДПР. Но, так как ВСК обладает памятью, сбой непременно приведет к ложному отказу в нормально работающей системе. Если предотвратить сбой весьма трудно, то необходимо исключить последствия сбоя.

Одним из способов исключения последствий сбоя является мажорирование. Так, например, формирование сигнала о направлении вращения двигателя ( $\text{sign } f_{\text{дв}}$ ) производится с помощью мажорирования имеющихся в наличии трех сигналов. Появление двух сбоев одновременно практически исключается. Однако применение мажорирования для рассматриваемого случая приводит к утроению схемы, изображенной на рис.4.5.1.1, что связано с большими аппаратными затратами.

Более экономный способ исключить последствия сбоя заключается в выборе второго признака рассматриваемого отказа, отличающийся от первого. На рис.4.5.1.2 представлена такая схема, являющаяся дополнением ячейки ДПР. При отсутствии отказа на входе дизъюнктора 1 присутствует хотя бы одна "1", поэтому на выходе - постоянно "0". На входе конъюнктора 2 присутствует один или два нуля, следовательно, на его выходе - постоянно "1", на выходе дизъюнктора 3 - "1". Четырехразрядный счетчик 5 сигналом исправности ячейки ДПР через инвертор удерживает счетчик в заторможенном нулевом состоянии. На выходе СО счетчика (сигнал переноса) - единица. На счетном входе С счетчика - постоянно нуль.

В случае сбоя триггеров ячейки ДПР счетчик растормаживается, но счёта нет, так как отсутствуют счетные импульсы, и на выходе СО сохраняется сигнал исправности.

В случае повреждения одной из фаз счетчик растормаживается, и на его счетный вход С при вращении ЭД будут поступают импульсы, формируемые элементами 1,2 и 3. Работа этих схем показана на рис.4.5.1.3.а (одна из фаз сохраняет постоянный уровень - "0") и на рис.4.5.1.3.б (одна из фаз сохраняет постоянно "1"). На 15-м такте срабатывает сигнал переноса счетчика СО, счетчик блокируется конъюнктором 4, постоянно сохраняя сигнал отказа.

От момента появления отказа до формирования сигнала отказа выходной вал переместится в нужном направлении на  $\frac{180^\circ \times 15}{2747} = 1^\circ$

#### 2.2.8.4. Индикатор предельной скорости $\Omega_K$ .

Индикатор входит в ячейку  $\Omega_m$  и регистрирует выход скорости за пределы  $\Omega^K$ . Индикатор (см. рис.4.5.2.1) регистрирует скорость в узком диапазоне, поэтому к нему предъявлено требование независимости от внешних факторов.

Схема реализована на двух четырехразрядных счетчиках. Опорная частота импульсов, поступающих на первый счетчик, в два раза выше, чем на втором счетчике, т.е. период  $T_2^K = \frac{1}{f} = 2 \times T_1^K$

Устойчивый дискретный сигнал о скорости  $\Omega^K$  поступит с выхода  $CO_2$ , (см. эпюры рис.4.5.2.2) спустя время  $T_2^K + \delta$  после "слипания" импульсов  $U_{CO_1}$ , которое произойдет при частоте  $\frac{1}{T_1^K} = (f_{ДПР} \times 6)^K$ , где  $\delta = (0 \div T_1^K)$ ,  $(f_{ДПР} \times 6)^K$ , что соответствует скорости  $\Omega^K$ .

Из рис.4.5.2.2 видно, что максимально возможное запаздывание сигнала (ошибка квантования) о достижении скорости  $\Omega^K$  равно

$$T_2^K + T_1^K = 3 \times T_1^K$$

**Ошибку квантования можно определить путем дифференцирования уравнения переходного процесса в окрестности точки  $t = \Delta t_{акт}$ :**

$$\frac{d\Omega}{dt}_{(\Omega=\Omega^K)} = \frac{\Omega_H}{\tau} \times e^{-\frac{\Delta t_{акт}}{\tau}} \quad (4.5.1)$$

Значение  $\Delta t_{акт}$  определяется из выражения (4.4.3).

Можно вычислить максимальную погрешность квантования при определении сигнала о достижении скорости  $\Omega \geq \Omega^K$ , если известно, например, что  $\Omega^K = 10^0/c$ ,  $\Omega_H = 12^0/c$

В соответствии с (4.4.3):

$$\Delta t_{акт} = \tau \times \ln \times \frac{\Omega_H}{\Omega_H - \Omega^K} = 0.025 \times \ln \frac{12}{2} = 0.045 \text{ с}$$

В соответствии с (4.5.1):

$$\frac{d\Omega}{dt}_{(\Omega=\Omega^K)} = \frac{12}{0,025} \times e^{-\frac{0,045}{0,025}} = 80^0/c$$

или 
$$\frac{d}{dt} (f_{ДПР} \times 6)^K = \frac{80 \times i \times 12}{360} = 7,3^k \Gamma_{ц}/c = 7,3 \Gamma_{ц}/мс$$

$$(f_{ДПР} \times 6)^K = \frac{\Omega^K \times i \times 12}{360} = \frac{10 \cdot 2747 \cdot 12}{360} = 916 \text{ Гц } (T_1^K = 1,1 \text{ мс})$$

При  $3T_1^k = 3,3$  мс погрешность квантования составит  $\leq \frac{7,3 \times 3,3}{916} \times 100\% = 2,5\%$ , что вполне допустимо и обеспечивается применением задающего генератора стабильной частоты.

#### 4.5.3 Задержка на отключение канала

Устройство задержки на отключение является составной частью ВСК и должно удовлетворять следующим требованиям.

1. Задержка на отключение при всех видах отказов, кроме активного, должна производиться через время  $\Delta t_{\text{ВСК}} = 0,5$  с после появления сигнала об отказе.

2. Отключение канала и торможение ЭД при активном отказе должно производиться через минимальное время, определяемое предельно допустимым выбегом (см. расчеты в разделе 4.4).

3. Должны быть приняты все возможные меры для исключения ложного отказа по "вине" ВСК.

4. Временная задержка не должна обладать свойством накопления

Эти требования могут быть удовлетворены, если временную задержку выполнить на цифровых элементах. В этом случае "сброс" временной задержки может быть произведен практически мгновенно.

Для надежного предотвращения ложного отказа цифровая задержка может быть дополнена небольшой аналоговой задержкой, которая при пропадании напряжения ВИП отключала бы канал. Это позволяет использовать один ВИП для питания ВСК и канала. При пропадании напряжения ВИП (рис.4.5.3)

закрывается транзистор  $VT_1$ , через время  $\Delta t = \frac{6,8B}{27B} \times 5,61_{\text{кон}} \times 10_{\text{мкФ}} = 14,3\text{мс}$

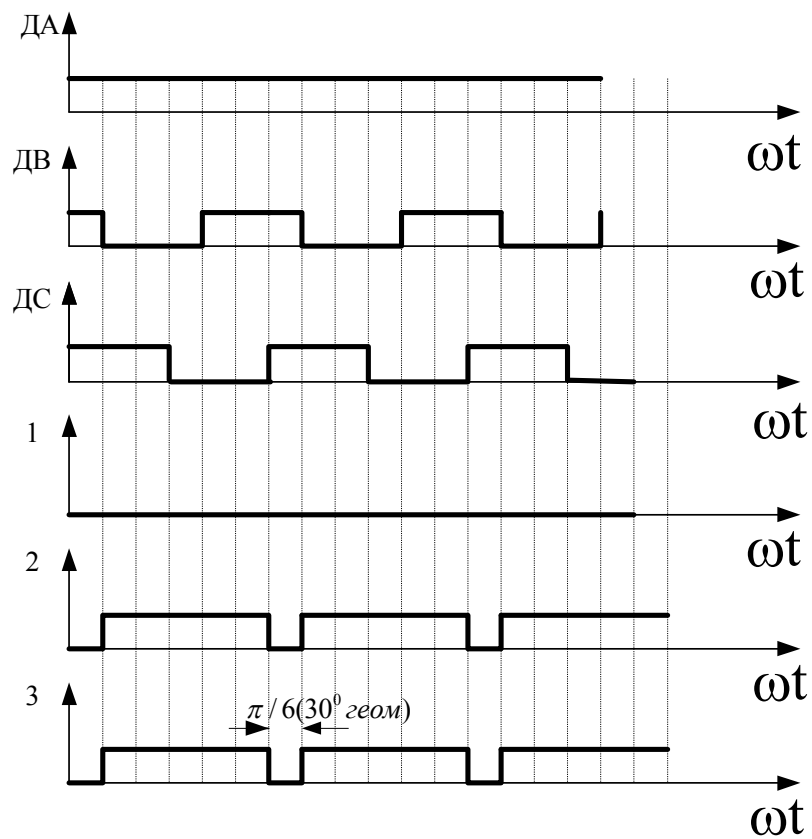
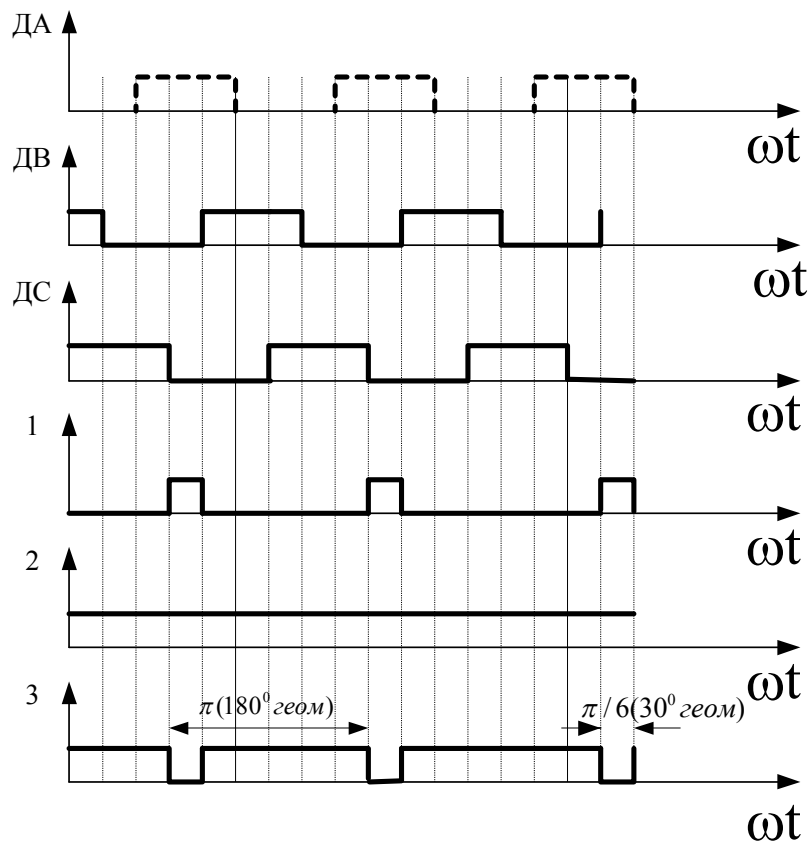


Рис.4.5.1.3. Эпюры работы схем

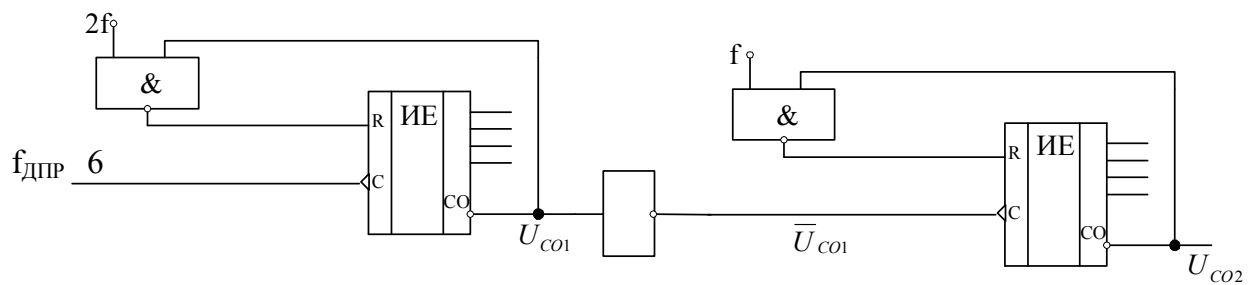


Рис.4.5.2.1. Схема индикатора предельной контрольной скорости  $\Omega^K$

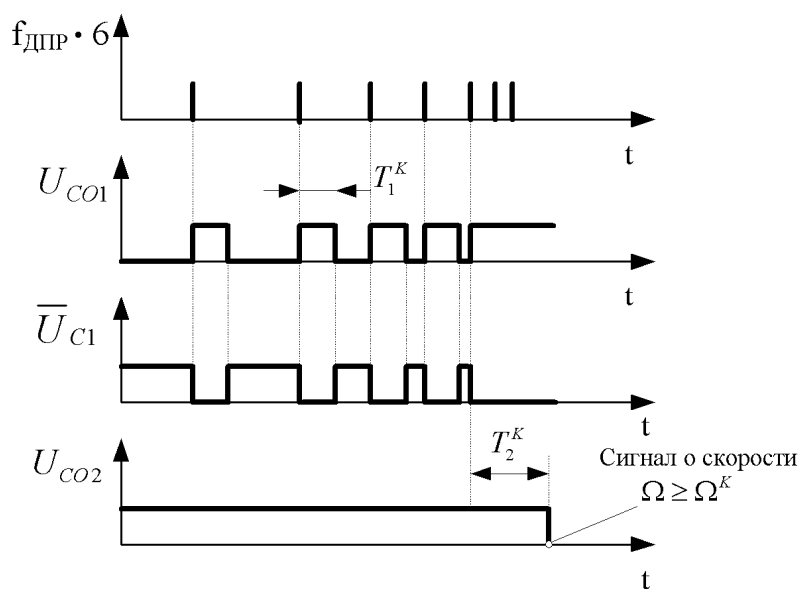


Рис.4.5.2.2. Эпюры индикатора предельной скорости  $\Omega^K$

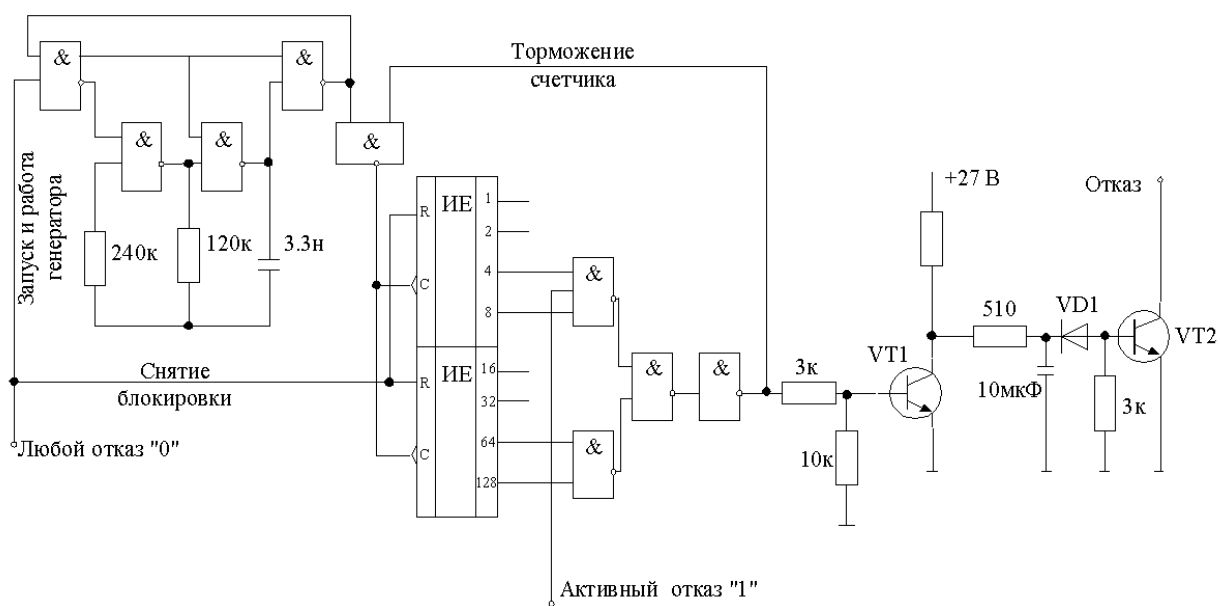




Рис.4.5.3. Схема формирования задержки на отключение канала

срабатывает транзистор  $VT_2$ , и канал будет отключен (6,8 В - напряжение стабилизации стабилитрона). Таким образом, аналоговая задержка составляет 14,3 мс.

Для большей помехозащищенности тактовый генератор запускается только при наличии сигнала отказа. Этим же сигналом растормаживается счетчик ИЕ.

Цифровая задержка может быть осуществлена, например, на 12-м, 24-м, 48-м, 96-м, 192-м такте. На схеме показана задержка на 12-м 192-м тактах. При активном отказе отключение канала произойдет на 12-м такте. Выбор величины задержки производится подбором частоты генератора, схемного решения дешифратора и места его подключения.