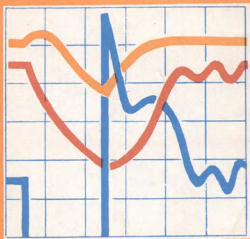


НОСОВ, Н. М. ДВОРАК

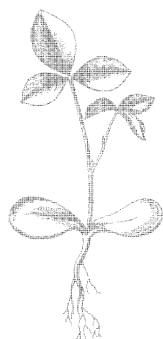
# СРЕДСТВА И СПОСОБЫ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



К.Б.Носов, Н.М.Дворак

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ САМОЗАПУСКА  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Кемеровское книжное издательство  
1985



Scan AAW

В книге рассмотрены режимы работы схем управления электродвигателей переменного тока напряжением как до, так и выше 1000 В при коротких замыканиях в сети и других перерывах питания с последующим действием устройств АПВ и АВР. Изложены принципы и методика выбора способов и средств обеспечения самозапуска электродвигателей. Особому анализу подвергнуты синхронные двигатели с статическими системами возбуждения.

Книга предназначена для квалифицированного электротехнического персонала промышленных предприятий, наладочных организаций, а также будет полезна ИТР электрических служб и цехов электрических станций и подстанций и студентам электромеханических специальностей вузов и техникумов.

Рецензенты: Н.А.Рудометов, декан электромеханического факультета Кузбасского политехнического института, доцент, кандидат технических наук, Н.Г.Степанов, главный энергетик Кемеровского производственного объединения "Химволокно".

П 2302030000 Без объявления.  
М145(03) - 85

© КемТИПП, 1985

## ВВЕДЕНИЕ

В решениях XXVI съезда КПСС об основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года отмечена необходимость настойчивого повышения эффективности общественного производства на основе его всесторонней интенсификации.

Объединение энергетических систем, увеличение мощности электрических станций, повышение качества энергетического оборудования, создание межсистемных связей и внедрение противоаварийной автоматики, высокий уровень устойчивости энергетических систем существенно повысили надежность обеспечения народного хозяйства электрической энергией. Однако это не исключает значительные сбросы нагрузки, отключения и серьезные расстройства технологических процессов промышленных предприятий после кратковременных снижений напряжения питающих сетей при коротких замыканиях и ошибочных отключениях.

Указанное является серьезной помехой в работе систем электроснабжения целого ряда производств (химической, нефтехимической, металлургической, горной и др. отраслей промышленности), т.к. даже кратковременные внезапные перерывы электроснабжения (ВКПЭС) таких предприятий могут привести к глубокому расстройству технологического процесса, большим материальным потерям, а в ряде случаев к пожарам и взрывам. Влияние ВКПЭС на технологический процесс показано на примере производства азотных удобрений (рис. В.1).

На производстве первоначально синтезируют простейшее химическое соединение азота с водородом – аммиак ( $NH_3$ ), а затем перерабатывают его в более сложные химические соединения. Водород получают путем конверсии метана природного газа. Получение конечной продукции производства: аммиачной селитры, карбамида и слабой азотной кислоты обеспечивается цехами аммиака, карбамида, слабой азотной кислоты, аммиачной селитры и катализатора со своими сложными технологическими процессами.

Основными приемниками электроэнергии на производстве являются тихоходные синхронные двигатели (ТСД) газовых поршневых компрессоров мощностью до 4000 кВт. На их долю приходится до 75% потребляемой электроэнергии. Такие электродвигатели, нагруженные на  $(0,8 + 0,9) P_n$ , при кратковременном (до 0,3с) снижении напряжения до  $0,6 U_n$  выпадают из синхронизма, и их ресинхронизация при

восстановлении напряжения до номинального не происходит. Остановка компрессоров приводит к перерыву технологических процессов производства азотных удобрений.

При этом к ущербу, вызванному снижением напряжения, следует отнести:

потери природного газа, электроэнергии при наборе нагрузки газовыми компрессорами и охлаждающей воды;

потери пара, получаемого за счет использования теплоты реакции конверсии;

уменьшение межремонтного срока службы оборудования за счет разрушения футеровки горловины конверторов метана и выхода из строя насадки колонн синтеза аммиака;

потери от простоя персонала;

потери из-за недовыпуска продукции.

Время восстановления технологического процесса, нарушенного в результате резкого снижения напряжения, зависит от его глубины и длительности, степени загрузки компрессоров, состояния технологического процесса, квалификации обслуживающего персонала и др. Эта длительность складывается из времени, необходимого на последующий пуск оборудования, и времени доведения технологического режима до номинального уровня. Численные значения времени восстановления технологического процесса производства вместе с данными ущерба от одного ВКПЭС приведены в табл. В-1.

Таблица В-1

Производство	Время восстановления технологического процесса, ч	Ущерб от одного ВКПЭС в тыс. руб.
Аммиак	30,0	45,0
Карбамид	20,0	3,5
Слабая азотная кислота	6,0	1,5
Аммиачная селитра	15,0	2,0

Несмотря на кажущуюся надежность схем электроснабжения современных промышленных предприятий (рис. В.2), ВКПЭС случаются довольно часто. Например, согласно обработке многолетнего статистического материала по системе электроснабжения ПО "Азот" г. Кемерово частота ВКПЭС доходит до 10-12 раз в год только по основным

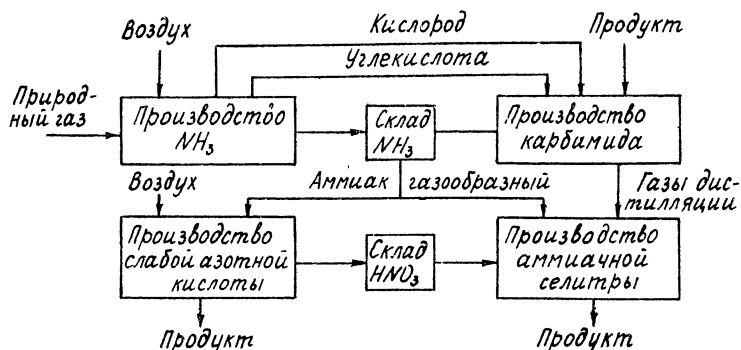


Рис. В.І. Схема основного производства азотных удобрений.

источникам питания (ЛЭП 110–500 кВ, кабельные связи, трансформаторы ГПП), т.е. по схемам внешнего электроснабжения производств І.

Возвращаясь к выделенному выше производству азотных удобрений видим, что годово́й ущерб от ВКПЭС только по основным источникам питания может достигать до 0,5 млн. рублей в год. На самом же деле ущерб будет еще значительней, т.к. ВКПЭС, кроме указанного выше, еще чаще возникают в схемах внутреннего электроснабжения отдельных цехов рассматриваемого производства.

Такое влияние ВКПЭС на непрерывность технологических процессов объясняется следующим. В нормальном установившемся режиме работы технологического агрегата (двигатель–механизм) имеет место равенство вращающего момента ( $M_{\delta}$ ) двигателя и момента сопротивления ( $M_c$ ) механизма, чем обуславливается постоянство скорости вращения агрегата. При нарушении этого равновесия, в силу изменения напряжения на зажимах электродвигателя, скорость вращения вала агрегата изменится. Изменение скорости происходит под воздействием возникающего избыточного момента.

Вследствие снижения напряжения питающей сети происходит уменьшение вращающего момента и, как следствие, выбег двигателя, в процессе которого происходит изменение момента сопротивления. Скорость агрегата принимает новое значение, при котором  $M_{изд} = 0$ . При неизменности момента сопротивления от скорости вращения вала произойдет "опрокидывание", и двигатель затормозится. Если в процессе торможения уровень напряжения питающей сети восстановится

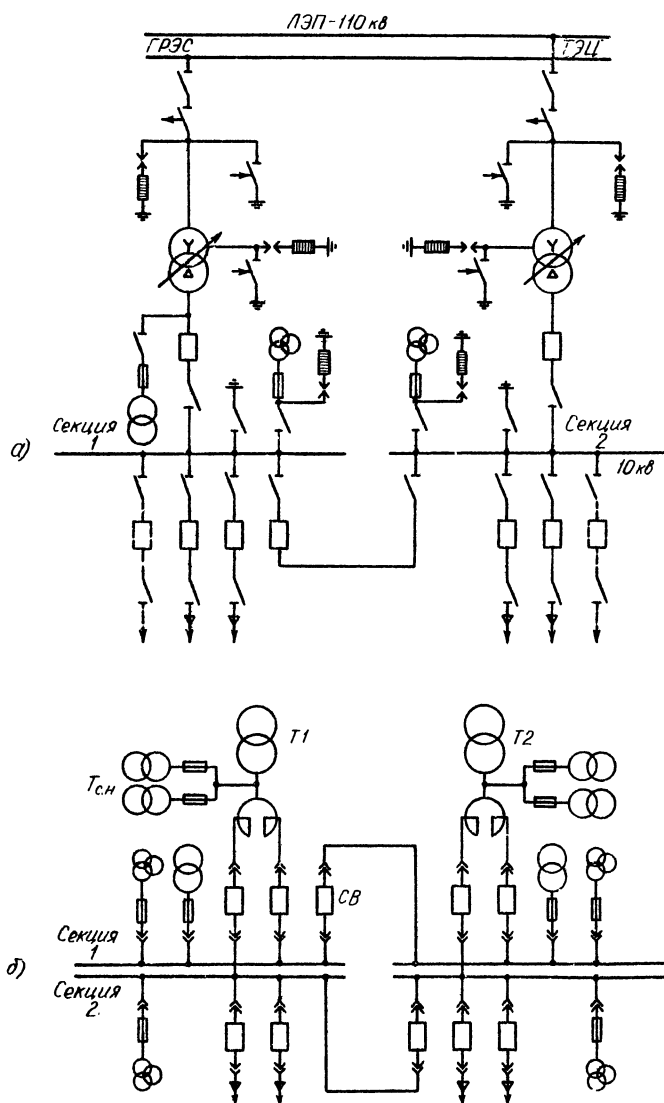


Рис. В.2. Схема электрических соединений подстанции с двумя трансформаторами: а - напряжением 110/10 кВ, мощностью до 16 МВА; б - напряжением 35-110/6-10 кВ, мощностью 16 МВА и более.

до нормального, то  $M_{изб}$  изменит знак, и скорость двигателя вернется к исходному состоянию. Изменение скорости вращения двигателя сопровождается всегда изменением его сопротивления, а следовательно, изменением тока в цепи статора. Поэтому при выбеге агрегата, вызванном снижением напряжения питающей сети и разгоне после его восстановления, могут протекать токи, значительно превышающие их нормальное значение, в результате могут иметь место дополнительные механические усилия. Увеличение пусковых токов сопровождается снижением напряжения на общих шинах и отрицательно влияет на работу других потребителей.

Из опасений повреждения двигателей повышенными токами после снижения напряжения и его восстановления, до недавнего времени прибегали к массовому отключению двигателей от защиты минимального напряжения (нулевой защиты). Применение современных средств быстродействующих защит и автоматики, а также кратковременность переходных процессов позволили отказаться от необоснованного массового отключения двигателей во время КЗ в питающей сети и при восстановлении напряжения и этим предотвращать во многих случаях нарушение технологического процесса и повышать надежность электрообеспечения промышленных предприятий.

Возникающий при этом переходный режим, обеспечивающий непрерывность технологического процесса путем оставления в невыключенном состоянии двигателей как при исчезновении напряжения и КЗ, так и при восстановлении напряжения вновь, носит название с а м о з а п у с к а электродвигателей.

Впервые организованное использование режима самозапуска началось на электрических станциях для двигателей собственных нужд, что позволило повысить надежность источников питания. Поэтому решением Технического управления Министерства электростанций № 19/Э от 1954 года было предложено широко внедрять самозапуск электродвигателей ответственных механизмов на промышленных предприятиях.

Это объясняется тем, что самозапуск является важным средством повышения надежности работы технологических установок промышленных предприятий. Причем это касается не только промышленных потребителей, у которых внезапная остановка механизмов сопряжена с длительным расстройством технологического процесса, опасностью для жизни людей и большим материальным ущербом, но и для менее ответственных установок, остановка которых приводит к экономическому ущербу, некоторому ухудшению безопасности.



Обычно при внезапной остановке электродвигателей большинства технологических машин, механизмов и установок в отсутствии самозапуска, длительность простоя во много раз превышает длительность нарушения электроснабжения. Это связано с рядом организационно-технических мероприятий и действий, которые необходимы при восстановлении нормального технологического процесса производства.

Режим самозапуска обеспечивается настройкой релейной защиты и автоматики двигателей и других элементов питающей сети за счет быстрого отключения КЗ, приводящих к недопустимому снижению напряжений. Так, например, применение токовых отсечек, дифференциальных защит, максимально-токовых защит с ускорением и др. исключает необходимость в ЗМН и позволяет сохранить в работе все электродвигатели. То же самое относится и к случаю, когда общее время бестоковой паузы не превышает  $0,2 + 0,4$  с при работе автоматических устройств АПВ и АВР.

Отключение части электродвигателей может потребоваться, когда общее время снижения напряжения и бестоковой паузы превысит  $0,5 + 0,6$  с, т.е. когда двигатели снизят свою скорость настолько, что потребляемые ими токи в процессе самозапуска значительно возрастут и уменьшат восстановившееся напряжение до значения, при котором самозапуск станет невозможным. Для избежания этого нежелательного явления необходимо введение ЗМН, отключающей ответственные механизмы, чтобы уровень остаточного напряжения удовлетворял требованиям самозапуска ответственных механизмов.

Кроме вышеуказанных мероприятий для обеспечения самозапуска ответственных двигателей напряжением до 1000 В и синхронных двигателей напряжением выше 1000 В приходится применять специальные способы и устройства, позволяющие устранить имеющиеся недостатки как в схемах управления двигателей, так и в их моментных характеристиках.

Все это вместе взятое позволило нам выделить средства и способы обеспечения самозапуска двигателей, как основной вопрос практического внедрения самозапуска на промышленных предприятиях.

Ряд вопросов, поднимаемых в книге, решен впервые, а их практическая ценность подтверждена авторскими свидетельствами.

Авторы выражают свою глубокую благодарность сотрудникам кафедры Электрооборудования КемТИШ канд. техн. наук Бурцеву Ю.В., канд. техн. наук Лебедеву Г.М., инж. Баженову В.П. и Шопореву А.М. за практическую помощь в подготовке материала и за ряд ценных замечаний по содержанию и методике изложения настоящей книги.

# Г л а в а п е р в а я

## КРИТИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ ПЕРЕРЫВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 1.1. Понятие критического времени

Система электроснабжения промышленного предприятия призвана обеспечить его ритмичную работу и способствовать выполнению плана выпуска продукции с хорошими экономическими показателями.

Поэтому нормальным режимом электроснабжения считается режим, при котором потребители обеспечиваются электрической энергией заданного количества и качества в соответствии с графиком потребления и по схеме, предусмотренной проектом для нормальных условий длительной работы.

Качество электрической энергии токоприемников в нормальных и послеаварийных эксплуатационных режимах работы энергетических систем и стационарных электрических сетей общего назначения переменного тока частотой 50 Гц и постоянного тока определено ГОСТ 13109-69 [2] .

Из определения ГОСТ следует, что послеаварийный режим — это режим, возникающий после отключения поврежденного элемента энергосистемы или электросети, продолжающийся до восстановления нормальных условий работы, т.е. длящийся в течение цикла АПВ или АВР. Но при этом в соответствии с ГОСТ дополнительное понижение напряжения не должно превосходить 5%, а фактически напряжение у потребителя на участке цикла АПВ или АВР снято полностью.

Следовательно, исходя из противоречий ГОСТ, снятие напряжения при успешном АПВ (или АВР) правильнее считать не послеаварийным режимом, а ВКПЭС, поскольку этот цикл длится от долей до нескольких секунд. Естественно, что такие ВКПЭС не должны существенно отражаться на непрерывности технологических процессов промышленных предприятий.

Вышеуказанное требование объясняется специфическими особенностями последних:

- равный график нагрузки с относительно высоким коэффициентом заполнения;

- ответственность нагрузок, связанных со значительным невосполнимым ущербом при перерывах электроснабжения;

- наличие взрывоопасных, загрязненных и коррозионных примесей в атмосфере и коррозионных составов в грунте (химическая промышленность);

- большое количество электродвигателей высокого напряжения, схемы их электроснабжения построены с повышенной степенью надежности и наличием "скрытого" резерва в оборудовании для возможности бесперебойного питания при аварии в электрической цепи [3] .

Продолжительность ВКПЭС на зажимах потребителей  $t_2$  складывается из времени  $t_{21}$  , необходимого для восстановления напряжения на питающей подстанции, и времени, необходимого на восстановление схемы электроснабжения от питающей подстанции до пункта питания электроприемников рассматриваемой технологической установки (агрегата)  $t_{22}$  , т.е.  $t_2 = t_{21} + t_{22}$  . Время  $t_{21}$  характеризует ремонтпригодность внешней схемы электроснабжения, а  $t_{22}$  - ремонтпригодность схемы электроснабжения потребителя.

Продолжительность  $t_{22}$  определяется сложностью схемы электроснабжения, типом и характеристиками электроприемников технологических установок, автоматизацией управления и т.д. Одним из средств снижения  $t_{22}$  является устранение промежуточных трансформаций, применение глубоких вводов, самозапуск агрегатов технологических установок и др.

В общем случае может существовать зависимость  $t_{22} = f(t_{21})$  .

Перерыв электроснабжения потребителя отражается на работе технологического процесса в том случае, если его продолжительность  $t_2$  больше или равна некоторому критическому времени  $t_{кр}$  , которое зависит от характеристик электроприемников и технологических установок.

Отсюда, критическим временем перерыва электроснабжения будем считать максимально допустимое время, перерыв электроснабжения в течение которого не приводит к нарушению технологического процесса.

Это понятие вводится, в основном, для технологических установок, цехов, производств, участвующих или имеющих непрерывный технологический процесс, который необходимо сохранять при ВКПЭС на зажимах электродвигателей.

В свою очередь ВКПЭС можно разграничить на:

а) перерывы питания, сопровождающиеся глубокими понижениями

напряжения, связанными с возникновением КЗ в схемах электроснабжения;

б) перерывы электроснабжения, связанные с исчезновением питающего напряжения в результате ошибочных действий релейной защиты и сетевой автоматики или эксплуатационного персонала энергослужбы.

Обе выделенные разновидности ВКПЭС различно влияют на продолжительность снижения напряжения на зажимах потребителей.

## 1.2. Глубокие понижения напряжения на зажимах потребителей

При КЗ, вследствие увеличения тока, возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети, а наибольшее снижение напряжения наблюдается в месте КЗ и в непосредственной близости от него. Причем, при длительном КЗ может произойти нарушение устойчивости работы электропривода, т.к. скорость его вращения уменьшается и, если скольжение превзойдет критическое, двигатели переходят в область неустойчивой работы и происходит их опрокидывание и полное торможение.

С увеличением скольжения реактивная мощность, потребляемая асинхронными двигателями, растет, что может привести, после отключения КЗ, к дефициту реактивной мощности и как следствие этого к лавинообразному снижению напряжения во всей системе и прекращению ее работы.

Аварии с нарушением устойчивости системы по величине ущерба, наносимого электроснабжению, являются самыми тяжелыми, поэтому КЗ требуют быстрого отключения [4].

Согласно ПУЭ защиту от многообразных КЗ желательно выполнять в виде токовой отсечки без выдержки или с ограниченной выдержкой времени. Селективность действия токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы так, чтобы отсечка не действовала при КЗ на смежных участках сети, защита которых имеет выдержку времени, равную или больше, чем отсечка. Для этого ток срабатывания должен быть больше максимального тока КЗ, проходящего через защиту при повреждении в конце выбранной зоны действия

$$I_{с.з} = K_n I_{кз \max} , \quad (1.1)$$

где  $K_n$  — коэффициент надежности, зависящий от типа применяемого токового реле;

$I_{кз. max}$  - максимальный ток трехфазного КЗ в конце защищаемой линии.

В случае глубокого ввода электрической энергии, что характерно для современных промышленных предприятий, распределительные сети 6-10 кВ выполняются кабельными линиями небольшой длины, на которых токовые отсечки применять затруднительно по принципу их действия. В этом случае для защиты распределительной сети в качестве основных рекомендуются максимально-токовые защиты, устанавливаемые в начале каждой линии со стороны источника питания. Для обеспечения селективности МТЗ выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания с уставкой по току

$$I_{с.з} = \frac{K_H K_P}{K_\delta} I_{p. max} \quad , \quad (I.2)$$

где  $K_P$  - кратность сверхтоков перегрузки;  
 $I_{p. max}$  - максимальный рабочий ток нагрузки;  
 $K_\delta$  - коэффициент возврата.

Результаты анализа ряда схем электроснабжения (рис. I.1 а,б) приведенные в табл. I.1 показывают, что минимальная выдержка времени МТЗ кабельных линий, отходящих от источника питания, колеблется от 1,0 до 1,5 с.

Таблица I.1

Место повреждения	Уровень остаточного напряжения на зажимах нагрузки, в %		Длительность перерыва, в с	
Точка КЗ	источник питания	э.д.с. двигателей	перерыв питания	отключение КЗ
K1	80+94	-	-	0,5
K2	10+30	-	1,0	0,1
K3	-	3,0	2,0 + 2,5	1,0 + 1,5
K4	-	5,0	2,5 + 3,0	1,5 + 2,0
K5	50+70	-	-	1,0 + 1,5
K6	-	10 + 15	3,0 + 3,5	0,1

Селективность же автоматического ввода резерва в системах электроснабжения тесно связана с селективностью МТЗ и определяется

$$t_{ABP} = t_{p.з} + 2\Delta t + t_{собст.в. ABP} \quad . \quad (I.3)$$

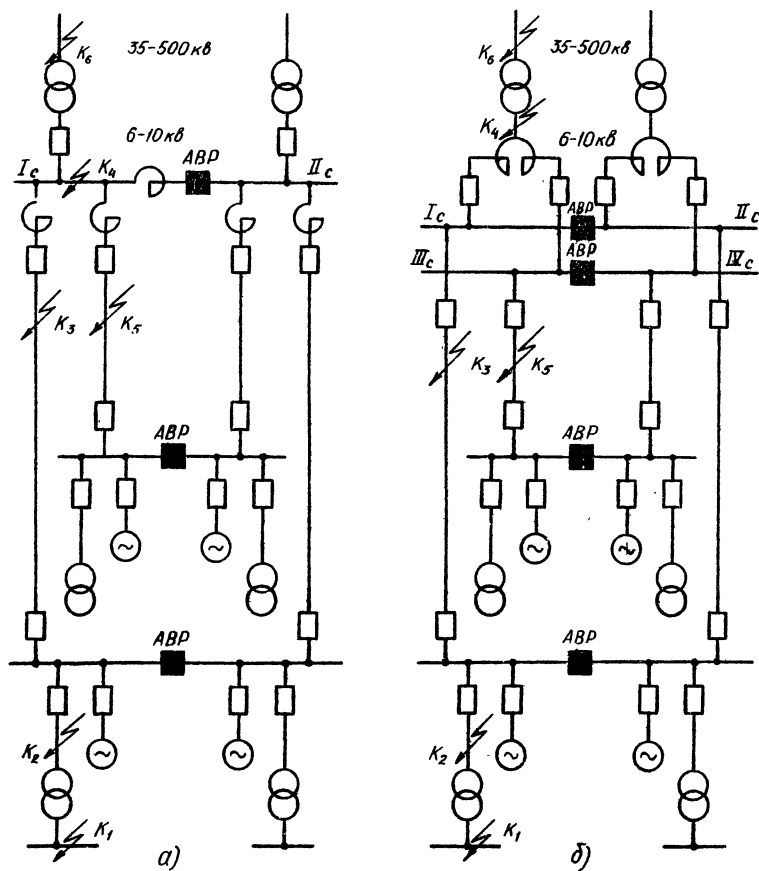


Рис. I.I. Типовая схема электроснабжения промышленных предприятий.

Такое положение значительно увеличивает время бестоковой паузы на зажимах нагрузки.

Многофакторный анализ колебаний напряжения показывает, что при перерывах электроснабжения, с отделением источника питания от нагрузки точкой КЗ, время бестоковой паузы максимально возрастает.

Причем остаточное напряжение в этом случае определяется только э.д.с. выбегающих электродвигателей, работающих на точку КЗ

$$U_{ост} = \frac{E_g Z_n}{Z_n + Z_{gx}} \quad , \quad (1.4)$$

где  $E_g$  — обобщенная э.д.с. двигателей;  
 $Z_n$  — сопротивление от обобщенного двигателя до места КЗ;  
 $Z_{gx}$  — обобщенное сопротивление двигателей, участвующих в выбеге на точку КЗ.

АВР, сопутствующий КЗ, протекает с точки зрения успешности самозапуска двигателей в более трудных условиях, чем при автоматическом переходе с одного источника питания на другой. Это связано с протеканием по обмоткам статора повышенных токов подпитки КЗ и, следовательно, с появлением добавочного тормозного момента, быстрее замедляющего скорость.

Для успешного самозапуска двигателей желательно как можно быстрее отключить КЗ, так как при этом торможение двигателей будет наименьшим и их сопротивление не успеет значительно снизиться, а отсюда и снижение остаточного напряжения при самозапуске не приведет к резкому снижению вращающего момента двигателей.

Исходя из этих соображений можно было бы рекомендовать применение неселективных токовых отсечек без выдержки времени с исправлением их действия автоматическим повторным включением. Однако применение устройств АПВ распределительных кабельных линий в системах электроснабжения промышленных предприятий, как показал 10-летний опыт эксплуатации на трех заводах синтетического каучука, не всегда целесообразно. Во всех 97 отмеченных случаях повреждений устройства АПВ работали неуспешно, так как повреждения были устойчивые, что вызывало развитие аварии и еще большие повреждения, снижая надежность всей схемы электроснабжения предприятий в целом.

Следовательно, для отключения КЗ с наименьшим временем необходимо усложнение защиты вплоть до применения максимально-токовых защит с ускорением по приемному концу линии или дифференциальных продольных токовых защит.

### 1.3. Внезапные исчезновения питающего напряжения на выводах электродвигателей

Анализ схем электроснабжения крупных химических предприятий показал, что до  $20 + 30\%$  перерывов связано с исчезновением напряжения у потребителей в результате неселективной работы релейной защиты и сетевой автоматики или ошибочных оперативных переключений эксплуатационного персонала [1].

При таких исчезновениях питающего напряжения двигатели остаются подключенными к общим шинам и переходят в генераторный режим. Объясняется это тем, что при отключении источника питания магнитный поток двигателей в течение некоторого времени поддерживается за счет токов, индуцируемых в контурах ротора в момент отключения. Поскольку двигатели продолжают вращаться за счет запасенной механической энергии, в обмотках двигателей генерируется напряжение. Это напряжение уменьшается вследствие затухания индуцируемых токов и снижения скорости.

Электродвижущая сила асинхронных двигателей при установившемся режиме меньше напряжения сети и зависит от величины скольжения. Как правило, асинхронные двигатели работают при скольжениях  $0,01 + 0,15$ , в зависимости от типа и загрузки, следовательно, в момент отключения от сети напряжение на выводах двигателей снижается до  $(0,86 + 0,95) U_n$ . У синхронных же двигателей э.д.с. превышает напряжение сети, т.к. они, как правило, работают с перевозбуждением, и в случае отключения двигателя, в первый момент, напряжение на выводах статора возрастает до  $1,05 U_n$ .

При одновременном отключении нескольких двигателей, питающихся от одного и того же источника питания, происходит групповой выбег, при котором двигатели электрически связаны друг с другом через общие шины, отключенные от сети. За счет существования остаточной э.д.с. между статорами связанных двигателей возникнут уравнивающие токи. При этом двигатели с большей механической постоянной времени (например, вентиляторы, центробежные насосы) переходят в генераторный режим и питают двигатели механизмов с малой постоянной времени (например, мельницы, компрессоры), которые начинают потреблять электрическую мощность, генерируемую двигателями механизмов с большей механической постоянной времени. Пока существуют уравнивающие токи достаточной величины, двигатели стремятся удерживать друг друга в "скользящем синхронизме", и уменьшение



скорости у всех связанных между собой двигателей будет приблизительно одинаковым, независимо от характеристик индивидуального выбега.

При нескольких одинаковых механизмах с одинаковыми характеристиками двигателей групповой выбег не будет отличаться от индивидуального выбега отдельных механизмов, а между статорами этих двигателей уравнительные токи не будут иметь места. Практически установлено, что при остаточном напряжении, равном или меньшем  $0,25 U_n$ , величина уравнительных токов будет уже недостаточной для удержания всех двигателей в "синхронизме".

Приближенно можно считать, что в пределах времени перерыва питания до 1 с частота остаточного напряжения и, следовательно, скорость вращения двигателей снижается на 1% за каждые 0,1 с выбега. При кратковременном перерыве питания, например, при АВР с бестоковой паузой  $0,4 \pm 0,6$  с, скорость двигателей снизится не более, чем на 4 + 6%. Поэтому при восстановлении напряжения реактивное сопротивление двигателей не успеет снизиться значительно и токи самозапуска не достигнут пускового значения; вследствие этого процесс восстановления напряжения при самозапуске будет протекать быстро и самозапуск будет осуществлен легко. Этим объясняется желательность сокращения времени действия АВР и АПВ.

Однако, в этом случае, важным обстоятельством, влияющим на выбор продолжительности бестоковой паузы АПВ и АВР, является процесс подачи напряжения питающей сети на зажимы вращающегося двигателя, генерирующего собственную э.д.с.. Это приобретает особое значение при питании крупных двигателей по коротким кабельным линиям от мощных трансформаторов, что характерно для современных промышленных предприятий. При отключении двигателей их э.д.с. исчезает не сразу, а затухает по экспоненте с постоянной времени, зависящей от параметров двигателей; при этом вследствие торможения меняется и фаза э.д.с. После восстановления питания в некоторый момент напряжение сети может оказаться в "противофазе" к э.д.с. двигателя и тогда обмотка статора двигателя окажется под воздействием суммарного напряжения (напряжение сети + э.д.с. двигателя), что приведет к соответственному росту тока в цепи двигателя.

Правда, опасение подачи напряжения сети в момент противофазы остаточной э.д.с. двигателей, который обычно наступает через  $0,3 \pm 0,4$  с после прекращения питания, в большинстве случаев не является обоснованным, так как не вся сумма приложенного напряже-

ния сети и остаточной э.д.с. падает на обмотки статора двигателя, а лишь часть ее, в то время как остальная часть падает на элементы питающей сети (линии, трансформаторы).

При общей продолжительности бестоковой паузы  $0,4 + 0,6$  с к зажимам двигателей будет приложено напряжение лишь немногим больше номинального, что облегчит условия самозапуска и не вызовет опасных динамических усилий в обмотках. Увеличение пусковых токов и, следовательно, динамических усилий в обмотках при включении напряжения сети в момент противофазы э.д.с. должно приниматься во внимание лишь для случая быстроходных двигателей большой мощности (например, турбовоздуходувки, центробежных насосов), питающихся от трансформаторов большой мощности. В этом случае через  $0,3 + 0,6$  с токи самозапуска могут превышать  $(1,5 + 1,8)I_{пуск}$ . Для безопасности самозапуска таких двигателей требуется продолжительность бестоковой паузы АВР не менее  $0,8 + 1,0$  с.

Исходя из вышеперечисленных особенностей, для обеспечения самозапуска двигателей после внезапного кратковременного исчезновения питающего напряжения, необходимо правильно выбрать мощность неотключаемых двигателей ответственных механизмов, а для увеличения мощности последних надо стремиться к максимальному сокращению времени действия сетевой автоматики.

#### 1.4. Факторы, определяющие допустимую длительность перерывов электроснабжения технологических линий и агрегатов

Допустимая длительность перерыва электроснабжения агрегатов "двигатель-механизм" производств с непрерывной технологией определяется следующими факторами:

- а) отклонением технологического параметра;
- б) механической прочностью агрегата;
- в) характером вращающего момента на валу двигателя;
- г) величиной тока включения двигателя.

Отклонение технологического параметра от своего первоначального значения является определяющим для большинства агрегатов технологических установок. Во время перерыва электроснабжения (момент бестоковой паузы) двигателя, потерявшие питание, начинают снижать свою скорость вращения по закону, соответствующему характеру изменения момента сопротивления механизма. Вместе с изменением

скорости вращения механизма будет падать и технологический параметр (напор, давление, производительность и др.). Следовательно, при восстановлении питающего напряжения на шинах обесточенных двигателей целесообразность их самозапуска будет определяться остаточной величиной технологического параметра. Если последний не успел снизиться до критической величины, то технологический процесс будет восстановлен. Если же вышеуказанный параметр снизится ниже критической величины, то технологический процесс прервется со всеми вытекающими отсюда последствиями: кристаллизация колонн и технологических линий, загазованность помещений, переливы, пожары, а в некоторых случаях возможны и локальные хлопки (взрывы).

Фактор механической прочности агрегата, определяющий допустимое время перерыва электроснабжения, также широко учитывается на промышленных предприятиях. Им пользуются тогда, когда механизм по своей конструктивной особенности, определяемой регламентом фирм-изготовителей, не допускает повторного пуска в любом интервале времени без предварительной температурной, механической или технологической разгрузки механизма. К таким механизмам на химических производствах можно отнести винтовые компрессоры, триллекс-насосы, цапговые уплотнители и другое уникальное оборудование.

Фактор вращающего момента двигателя вступает в силу тогда, когда в технологической цепи используются механизмы, приводимые в движение, например, тихоходными синхронными двигателями (ТСД). ТСД выделяются из всех СД тем, что имеют вращающие моменты в области подсинхронных скольжений, равные или меньшие момента сопротивления на валу. А так как устройства, позволяющие осуществлять быструю (в пределах  $5 \div 10$  с) загрузку и разгрузку механизма отсутствуют, то длительность перерыва питания определяется:

а) при  $M_{\delta x} > 1,1 M_c$  по степени снижения технологического параметра;

б) при  $M_{\delta x} < 1,1 M_c$  по обеспечению минимально-возможного времени включения резервного питания, но не более 0,5 с.

Здесь  $M_{\delta x}$  — входной момент синхронного двигателя, т.е. момент по асинхронной характеристике соответствующий подсинхронному скольжению  $S = 0,05$ .

Фактор величины тока включения двигателей может иметь место в случае применения устройств быстродействующих защит и сетевой автоматики, т.е. при времени бестоковой паузы  $t_j < 1,0$  с. В этом случае, за счет наличия на статоре двигателя остаточной э.д.с., токи включения могут более чем в два раза превысить пусковой ток.

Завод-изготовитель двигателей допускает превышение пускового тока не более, чем в 1,7 раза. Следовательно, по фактору допустимого тока включения длительность перерыва электроснабжения определяется скоростью затухания запасенной электромагнитной энергией ротора и не должна быть менее 1,0 с.

Эксперименты, проведенные на ряде химических предприятий, позволили выделить факторы по основным технологическим механизмам обобщить в следующей табл. 1.2.

Таблица 1.2

Агрегаты	Ф а к т о р ы				Выбранное время перерыва
	Снижение технологического параметра	Механическая прочность механизма	Моментная характеристика двигателя	Ток включения двигателя	
Триплекс-насосы	2с	не ограничив.	не ограничив.	не ограничив.	2с
Насосы захлажденного и технологического конденсата	3с	"	"	"	3с
Винтовые компрессоры	3с	1с	"	3с	1с
Поршневые компрессоры	4с	не ограничив.	0,5с	1с	0,5с
Насосы горячей и холодной воды ВОЦ, воздухоподогреватели, вентиляторы, различные перекачивающие, дренажные и др. насосы.	5с	"	не ограничив.	для АД не ограничив. для СД 1с	5с

#### 1.5. Методика расчета критического времени перерыва электроснабжения

В основу определения критического времени перерыва электроснабжения, способного сохранить непрерывность технологического процесса, положена оценка минимального времени, в течение которого установка (цех) не выходит за пределы установленных норм технологического режима. Так как при перерывах электроснабжения начинается выбег агрегата, сопровождающийся снижением скорости вращения, а, следовательно, и его производительности, то определение  $t_{кр}$

сводится к выявлению зависимости снижения производительности технологического агрегата от уменьшения скорости.

Для выявления вышеуказанной зависимости воспользуемся уравнением движения

$$M_{изб} = M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (I.5)$$

где  $M_{изб}$  — избыточный (динамический) момент, Н·м;  
 $M$  — электромагнитный момент двигателя, Н·м;  
 $M_c$  — момент сопротивления механизма, Н·м;  
 $J$  — момент инерции агрегата, кг·м<sup>2</sup>;  
 $\omega$  — угловая скорость ротора, 1/с.

Выразив момент и угловую скорость в относительных единицах, а также заменив относительную угловую скорость через скольжение, получим

$$m_{изб} = \frac{M_{изб}}{M_H} = \frac{GD_{прив} 2\pi n_o}{460 M_H} \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_j \frac{d\omega}{dt} = -T_j \frac{ds}{dt}, \quad (I.6)$$

где  $GD_{прив}$  — приведенный маховый момент агрегата, кгс·м<sup>2</sup> (для перехода к величине момента инерции  $J$ , выраженного в международных единицах (кг·м<sup>2</sup>), каталожное значение махового момента необходимо разделить на 4:  $J = GD^2/4$ );

$$T_j = \frac{GD_{прив} n_o n}{364 P_H} \approx \frac{GD_{прив} n_o^2}{364 P_H} \quad - \text{механическая}$$

постоянная времени агрегата, с;

$n_o$  и  $n_H$  — синхронная и номинальная скорости вращения вала двигателя, об/мин;

$P_H$  — номинальная мощность двигателя, Вт.

В дальнейшем, если это не оговорено особо, все величины, кроме времени, выражены в относительных единицах. Время выражается в секундах или радианах

Выражение (I.6) позволяет определить время, соответствующее изменению скольжения от  $S_1$  до  $S_2$ , т.е. время, за которое параметр изменится от оптимального до минимально допустимого

$$t = -T_j \int_{S_1}^{S_2} \frac{ds}{m_{изб}}. \quad (I.7)$$

Считаем, что до перерыва электроснабжения агрегат работал в установившемся режиме с  $n = n_{гб}$  и  $m_c = m_{гб}$ , следовательно,

выражение (I.7) можно записать

$$t = -T_j \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_c} \quad (I.8)$$

Для решения полученного выражения можно использовать графо-аналитический метод. Строится кривая момента сопротивления в долях номинального момента в функции скольжения и разбивается на ряд прямоугольников ординатами  $m_{c1}$ ,  $m_{c2}$ ,  $m_{c3}$ , ... (рис. I.2).

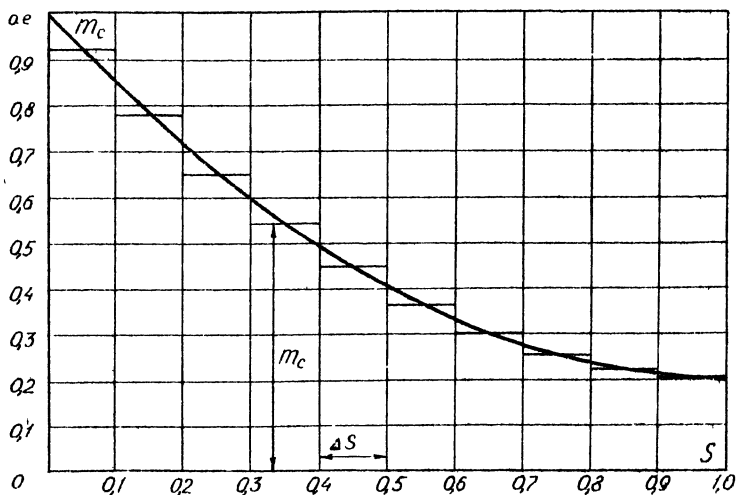


Рис. I.2. Определение времени выбега технологического агрегата

Время выбега до определенной скорости или величина  $t_{кр}$  определяется по формуле

$$t = t_{кр} = T_j \left[ \frac{\Delta S_1}{m_{c1}} + \frac{\Delta S_2}{m_{c2}} + \frac{\Delta S_3}{m_{c3}} + \dots + \frac{\Delta S_n}{m_{cn}} \right] \quad (I.9)$$

которая является приближенным выражением (I.8).

Для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления величину  $t_{кр}$  можно определить по универсальным кривым выбега или аналитически.

В первом случае

$$t_H = - \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{u3\delta}} = - \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{m_{u3\delta}} = - \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{m_{u3\delta}}, \quad (I.10)$$

где  $t_H = t/T_j$  — относительное время (в долях механической постоянной),

$$t_H = - \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{1-m_c} = \frac{1}{1-m_0} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{\left(\frac{m_0}{1-m_0}\right) + n^2}. \quad (I.11)$$

Принимая для случая выбега агрегата  $n_1 = n_H$  и  $n_2 = n_{kp}$  и решая интеграл, получим

$$t_H = \frac{1}{\sqrt{m_0(1-m_0)}} \left[ \arctg \sqrt{\frac{1-m_0}{m_0}} n_H - \arctg \sqrt{\frac{1-m_0}{m_0}} n_{kp} \right]. \quad (I.12)$$

Согласно полученного выражения (I.12) для различных значений  $n_{kp}$  строится семейство кривых выбега (рис. I.3). По этим кривым определяется время выбега агрегата от  $n_1 = n_H$  до  $n_2$ , соответствующее допустимой границе параметра.

Аналитически критическое время  $t_{kp}$  выбега можно определить из уравнения движения (I.5) если учесть, что для центробежных насосов и вентиляторов

$$M_c = M_{cнач} + (M_{cн} - M_{cнач}) \left( \frac{n}{n_H} \right)^2, \quad (I.13)$$

где  $M_{cнач}$  — начальный статический момент;  
 $M_{cн}$  — номинальный момент сопротивления.

Исследованиями промышленных производств установлено, что для вентиляторов и центробежных насосов начальный статический момент составляет величину  $(0,08 + 0,3) M_{cн}$ . Причем для агрегатов с установленной мощностью двигателей выше 100 кВт  $M_{cнач} = (0,08 + 0,15) M_{cн}$ , а для механизмов с двигателями менее 100 кВт, которые составляют абсолютное количественное большинство в звеньях технологических процессов,  $M_{cнач} = (0,15 + 0,3) M_{cн}$ . Поэтому если принять  $M_{cнач} = 0,2 M_{cн}$ , а  $M_{g\delta} = M_H = M_c$ , то выражение (I.13) при введении величин в относительных единицах можно записать

$$m_c = 0,2 + 0,8 \left( \frac{n}{n_H} \right)^2. \quad (I.14)$$

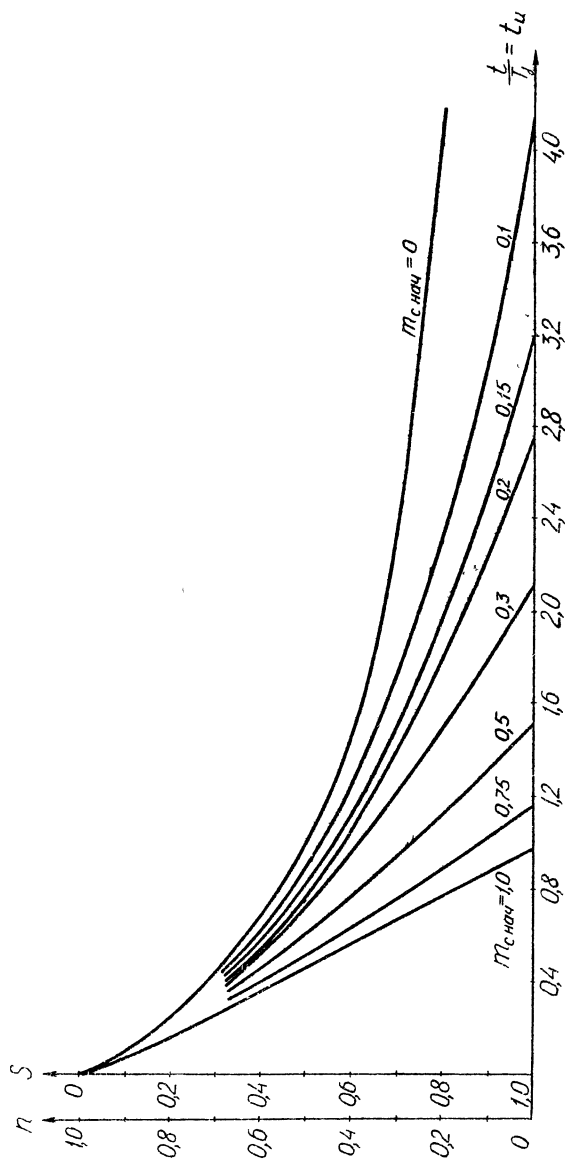


Рис. 1.3. Кривые вбѣга для двигателя с механизмом, имеющим вентиляторный момент сопротивления.



Тогда

$$t = -T_j \int \frac{dn}{0,2+0,8 \left(\frac{n}{n_{кр}}\right)^2} . \quad (I.15)$$

Преобразуя и решая вышеприведенное выражение, получим

$$t = -2,5 T_j n_n \arctg \frac{2n}{n_n} + c . \quad (I.16)$$

Постоянную интегрирования находим из граничных условий:

$$\begin{aligned} & n = n_n \quad \text{при} \quad t = 0 \\ \text{или} \quad & 0 = -2,5 T_j n_n \arctg 2 + c , \\ \text{откуда} \quad & c = 2,8 T_j n_n . \end{aligned} \quad (I.17)$$

Поскольку для технологического агрегата критическое время перерыва электроснабжения есть функция от минимально допустимой (критической) скорости вращения  $t = f(n_{кр})$ , то выражение (I.16) с учетом постоянной интегрирования (I.17) запишется

$$t_g = 2,5 T_j n_n \left( 1,11 - \arctg \frac{2n_{кр}}{n_n} \right) . \quad (I.18)$$

Анализ уравнения показывает, что инерционность вращающей системы является основным фактором, определяющим критическое время перерыва электроснабжения, и определяется моментом инерции агрегата и технологическим регламентом. В практических расчетах момент инерции можно заменить маховым моментом системы. В общепромышленных электроприводах соотношение маховых моментов составляет

$$GD_{аг}^2 \approx 1,05 GD_{эл}^2 , \quad (I.19)$$

где  $GD_{аг}^2$  и  $GD_{эл}^2$  — маховые моменты агрегата и электродвигателя.

Если в выражении (I.18) постоянные величины, характеризующие инерционность агрегата обозначить через

$$A = 2,5 T_j n_n ,$$

то тогда из формулы (I.18) можно выразить значение критической скорости вращения агрегата по истечении критического времени бес-токовой паузы

$$n_{кр} = \frac{1}{2} n_g \left( \frac{t_{кр}}{A} - 1,11 \right) . \quad (I.20)$$

Для механизмов с постоянным моментом сопротивления на валу

$$n_{кр} = 1 - \frac{m_c t_{кр}}{T_j} . \quad (I.2I)$$

### I.6. Способы определения критического времени

Технологический процесс промышленного предприятия протекает нормально при оптимальных значениях температуры, давления, концентрации наполнителей, добавок и т.д. Ведение технологического процесса за пределами допустимых значений является нарушением технологического режима. Таким образом, допустимое время перерыва электроснабжения для какого-либо технологического агрегата – это то время, в течение которого значение параметра, поддерживаемое этим агрегатом, изменится от оптимального до минимально допустимого.

Технологическими механизмами, обеспечивающими устойчивость большинства технологических процессов, и перерыв электроснабжения одного из которых сопровождается их расстройством, являются: насосы, вентиляторы, газодувки, воздуходувки, компрессоры, мешалки, мельницы и др., т.е. механизмы с моментами сопротивления, в различной степени зависящими от скорости вращения.

Для определения допустимого (критического) времени перерыва электроснабжения технологических агрегатов обычно пользуются следующими методами:

1. Методом обработки данных эксплуатационных наблюдений;
2. Путем теоретического расчета;
3. Методом натурного эксперимента.

Наиболее прост и доступен в практике действующих производств путь обработки результатов аварийных перерывов электроснабжения, сопровождающихся нарушениями технологических процессов. Однако, обработка материалов аварийной статистики и опроса эксплуатационного персонала ряда химических производств показала, что допустимое время перерыва электроснабжения многих однотипных технологических установок оценивается по-разному.

Объясняется это, в ряде случаев, различной надежностью схем электроснабжения и различной степенью инерционности самих технологических процессов. И, с другой стороны, сложность аварийной обстановки и относительно большая скорость изменения технологических параметров затрудняет возможность дать правильную оценку допусти-

мого критического времени перерыва электроснабжения по изменению технологического потока, особенно на предприятиях, где самозапуск двигателей не выполнен вообще или предусмотрен частично. Исходя из вышесказанного, способ обработки эксплуатационных наблюдений дает недостаточно объективную величину критического времени перерыва электроснабжения технологических установок.

Как дополнение к способу обработки эксплуатационных наблюдений можно рекомендовать теоретический путь, при использовании которого на основании изучения технологического процесса выделяются группы рабочих механизмов с электроприводом, прекращение работы которых вызывает нарушение технологического процесса. Для каждого рабочего механизма определяется свое критическое время перерыва электроснабжения.

Полученные расчетным путем результаты необходимо сравнить с данными метода обработки эксплуатационных наблюдений и выбрать меньшее значение критического времени.

И наконец, способом, позволяющим получить наиболее точные данные о значении допустимого времени перерыва электроснабжения, является путь эксперимента. Предлагаемый метод сложен тем, что эксперимент проводится на действующем оборудовании в реальных условиях работы производства. Незначительные отклонения или нечеткая постановка эксперимента грозят нарушением непрерывности технологического процесса, недопуском продукции, порчей оборудования, а в ряде случаев и опасностью для жизни людей. Поэтому работы должны проводиться по специально разработанной программе и специально подготовленным персоналом.

Определяется критическое время перерыва электроснабжения отдельных технологических агрегатов. Весь технологический процесс разбивается на ряд технологических стадий, для которых выводится свое критическое время и затем определяется уже общее критическое время перерыва электроснабжения для всего технологического процесса производства.

Рассмотренный выше метод – единственно достоверный путь, позволяющий получить действительную длительность бестоковой паузы, неспособной нарушить технологию.

Это утверждение подтверждается проведенными исследованиями на производстве технического капролактама производственного объединения "Азот" г. Кемерово, приведенными в табл. I.3.

Таблица I.3

Наименование технологических стадий	Определяющая технологическая установка	Критическое время перерыва электроснабжения, с			Последствия внезапного перерыва электроснабжения при $t_s > t_{кр}$
		метод эксплуатации и наблюдений	теоретический метод	метод натурального эксперимента	
Гидрирование	н-с бензола	0	3	2	Остановка технологического процесса
Окисление	н-с технологического конденсата	I	3,5	3	Кристаллизация реактора окисления или пожар
Ректификация	н-сы флегмы и дистилата	2	5	5	Кристаллизация ректификационных колонн
Получение сернистого газа	н-с котловой воды	2-4	5,6	5	Загазованность помещения
Получение сульфата аммония	н-с водного раствора	3-4	5,7	5	Кристаллизация раствора
Получение гидроксиламин-сульфата	н-с гидроксиламин-дисульфоната	3-4	5,6	5	Выбросы реакционной массы
Получение лактама	перекачивающие насосы ЦНГ	2-3	3,9	4	Загазованность помещений, взрыв
Сжигание кубовых остатков	воздуходувки на печах сжигания	5-7	10	13	Взрыв печи сжигания

Анализ проведенных исследований показывает, что критическое время для питающего узла системы электроснабжения рассматриваемого производства определяется стадией гидрирования бензола. На это время необходимо настраивать все системы релейной защиты и автоматики системы электроснабжения, обеспечивающие самозапуск электродвигателей.

## Г л а в а   в т о р а я

### СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САМОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

#### 2.1. Общие положения

Постоянный рост надежности источников питания, линий электропередач, трансформаторных подстанций, быстродействующих защит и сетевой автоматики позволяет до минимума сократить перерывы в снабжении электрической энергией производственных агрегатов на промышленных предприятиях. Между тем, как показывает практика, эффективность всех мероприятий по повышению надежности может быть существенно снижена из-за отсутствия в схемах электроснабжения промышленных предприятий средств и способов, способствующих сохранению непрерывности технологических процессов при кратковременных исчезновениях (глубоких понижениях) питающего напряжения.

Неправы те электротехнические службы предприятий, которые в первую очередь стремятся обеспечить самозапуск только высоковольтных двигателей, улучшая их моментные характеристики, схемы электроснабжения, совершенствуя релейную защиту и автоматику. Это утверждение подтверждается тем, что известны случаи [5], когда исчезновение питающего напряжения даже на 0,25 с приводит к расстройству технологического процесса производства. Следствием аварии, несмотря на обеспеченность самозапуска синхронных двигателей компрессоров мощностью 2000 и 3900 кВт по длительности бестоковой паузы и уровню остаточного напряжения, явилось отпадание магнитных пускателей (МП) двигателей напряжением 0,4 кВ маслососов и вентиляторов, что вызвало отключение синхронных двигателей по технологическим блокировкам. Поэтому мы настоятельно рекомендуем обеспечение самозапуска начинать с ответственных двигателей напряжением до 1000 В с последующим анализом поведения высоковольтных машин.

Способы обеспечения самозапуска электродвигателей, управляемых контакторами (МП), следует классифицировать на две основные группы:

- 1) способы, основанные на полном отказе от защиты минимального напряжения (ЗМП);
- 2) способы, основанные на создании выдержки времени ЗМН контакторов (МП).

К первой группе, как правило, относят прием, заключающийся в замене или временном переключении постов управления контакторов (МП) различными переключателями, тумблерами, рубильниками и т.д.

Обеспечение самозапуска указанным способом является наиболее простым и легко осуществимым решением, применение которого, однако, должно быть весьма ограничено, так как полный отказ от ЭМН делает возможным самозапуск двигателя после длительного перерыва питания, что в большинстве случаев недопустимо по условиям технологии и техники безопасности. Следующей негативной стороной этого мероприятия является преднамеренный отказ от какой-либо степени автоматизации технологического агрегата.

Ко второй группе относятся исключительно электрические способы, которые, в свою очередь, можно классифицировать по воздействию на коммутационный аппарат в течение бестоковой паузы на п а с с и в н ы е и а к т и в н ы е.

Устройства на базе пассивных способов воздействия характеризуются тем, что не препятствуют отключению контактора (МП) при исчезновении напряжения сети и подключают двигатель к питающему напряжению только при его восстановлении в течение заданного времени. К ним относятся все многочисленные АПВ контакторов (МП) с установленной выдержкой времени в пределах критического времени перерыва электроснабжения. Особенностью режима самозапуска двигателей с вышеуказанными устройствами является то, что выбег двигателей в момент бестоковой паузы протекает индивидуально, не зависимо один от другого.

Устройства же активного воздействия управляют коммутационным аппаратом в течение всей бестоковой паузы, оставляя якорь контактора (МП) включенным в интервале заданного времени. При этом группа ответственных двигателей выбегает обобщенно, т.е. с усредненной механической постоянной времени, что очень существенно отражается на режиме повторного пуска.

При всем многообразии устройств АПВ, реализующих пассивный способ воздействия в бестоковую паузу, принципиальной разницы в них нет. Однако конструктивные отличия, которые возникают из-за использования различных средств для воздействия на цепи управления, порой существенно влияют на уровень напряжения срабатывания  $U_{ср}$  катушек управления контакторов (МП) при самозапуске.

Средства же активного воздействия на коммутационные аппараты в бестоковую паузу порой принципиально различаются по выполнению.

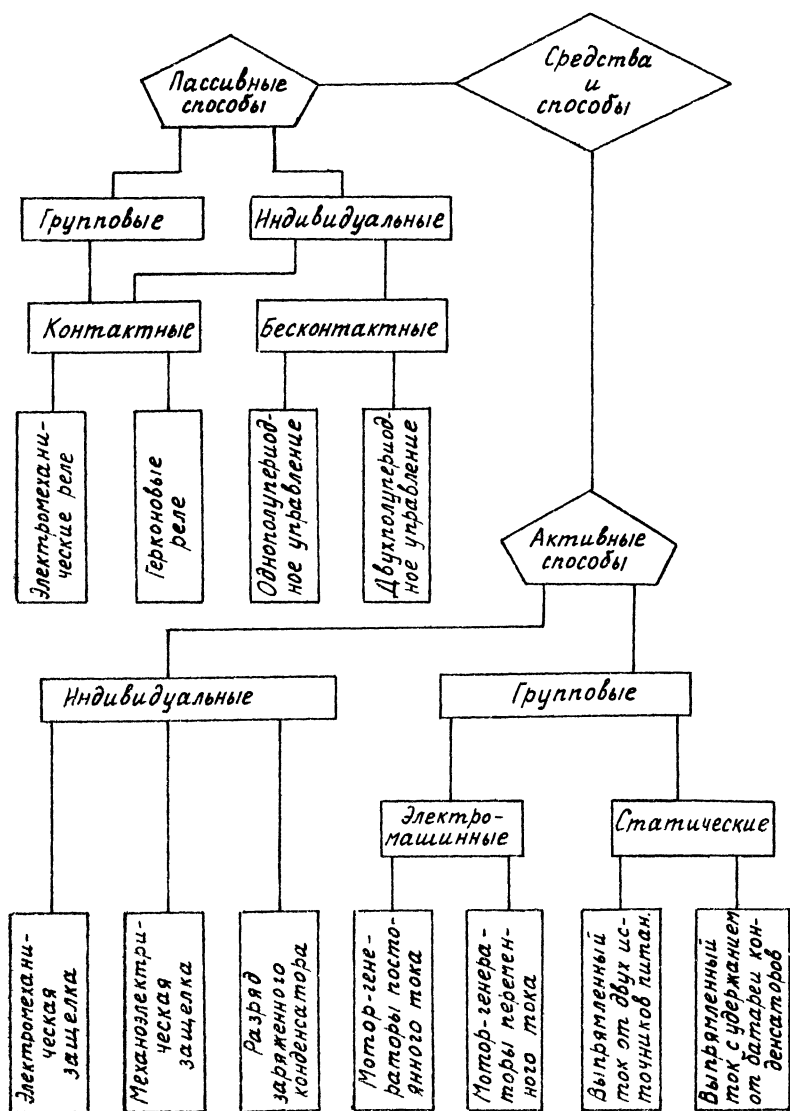


Рис. 2.1. Классификация способов и средств обеспечения самозапуска двигателей напряжением до 1000 В.

Так все известные устройства [6,7] можно разграничить на электро-механические, электромагнитные и магнитоэлектрические.

Обзор и анализ существующих работ, проведенный за последние годы, позволил классифицировать средства и способы обеспечения самозапуска двигателей напряжением до 1000 В в следующем порядке (рис. 2.1.).

Особенностью устройств, выполняемых на базе того или иного способа, является задача сохранения всех функциональных особенностей контактора (МП), представляемых схематично на рис. 2.2, что в основном является критерием создаваемого устройства.

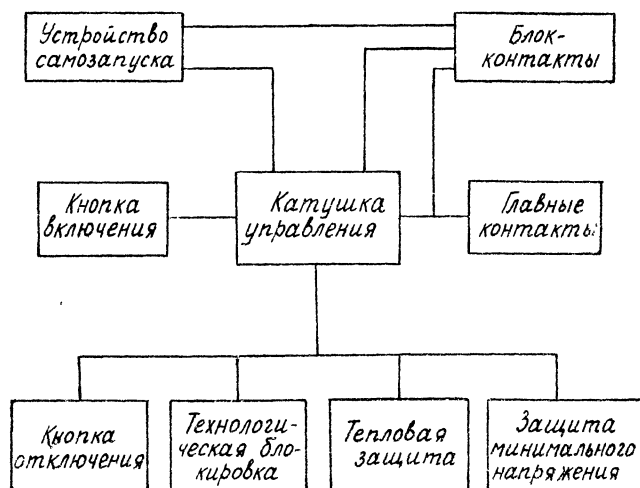


Рис. 2.2. Функциональная схема связи между элементами управления, защиты и автоматики магнитного пускателя.

## 2.2. Автоматическое повторное включение электродвигателей

Способ самозапуска потерявших питание электродвигателей посредством АПВ при восстановлении напряжения сети получил широкое применение. Объясняется это простотой схем устройств АПВ, относительной стабильностью выдержки времени и доступностью изготовления в условиях ремонтных мастерских ОГЭ промышленного предприятия.



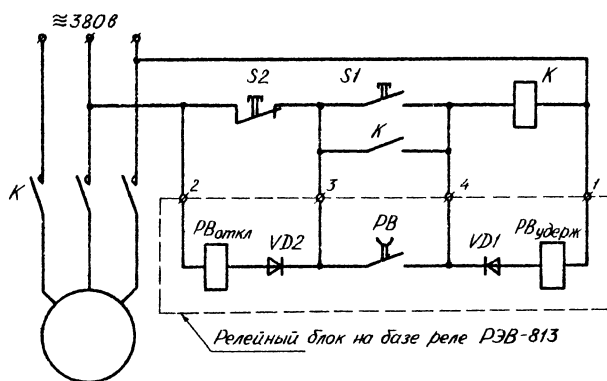


Рис. 2.3. Принципиальная схема релейного блока задержки минимальной защиты контактора.

Начало применения способа относится к вариантам релейного исполнения, которые довольно успешно выполняли поставленные перед ними задачи. Приводим некоторые из них.

В промышленном производственно-техническом объединении Союзхимпромэнерго был создан релейный блок задержки минимальной защиты электродвигателей [6], управляемых контакторами серии КТВ (рис. 2.3).

Блок выполнен с использованием реле постоянного тока серии РЭВ-800 (или РЭ-500), имеющего выдержку времени на отпадание.

Удерживающая обмотка реле (заводская) включается через диод *VD1* параллельно катушке контактора.

Отключающая обмотка реле, предназначенная для уменьшения выдержки времени при оперативном отключении контактора, наматывается поверх короткозамкнутого витка и включается через диод параллельно кнопке *S2*.

Замыкающий контакт реле, имеющий выдержку времени на отпадание, включается параллельно блок-контакту контактора, используемого для самоудержания.

Применение релейного блока не требует прокладки дополнительных проводов между пускателем и кнопочным постом управления, а та-

кже дополнительных блок-контактов пускателя. Выход из строя элементов блока не приводит к отключению управляемого электродвигателя.

Наиболее простым техническим решением является использование одного электромагнитного реле с задержкой отпадания якоря (заводского исполнения, например, РЭВ-8ГЗ) для обеспечения самозапуска электродвигателей. Однако в этом случае требуется использовать кнопочный пост, имеющий фиксированное положение кнопки "Стоп", либо заменить кнопочный пост на ключ.

В случае же наличия замыкающего контакта у кнопки "Стоп" (кроме обычно используемого размыкающего контакта) схема обеспечения самозапуска может быть выполнена с помощью двух электромагнитных реле с задержкой отпадания якоря (рис. 2.4). В этом случае реле РВ2 должно иметь задержку отпадания, превышающую не менее, чем на 0,5 с задержку реле РВ1 с тем, чтобы надежно предотвратить самовключение электродвигателя после кратковременного нажатия кнопки  $S2$ .

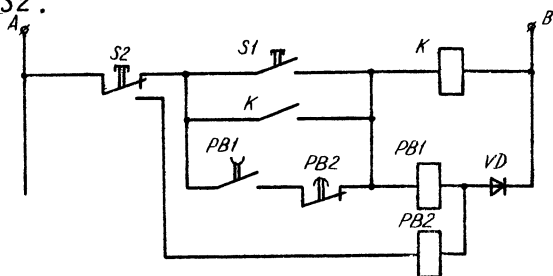


Рис. 2.4. Принципиальная схема обеспечения самозапуска с использованием двух электромагнитных реле серии РЭВ-800.

Использование в подобных схемах электропневматических реле времени крайне нежелательно из-за значительного разброса их выдержки времени и низкой эксплуатационной надежности.

Однако, несмотря на относительно широкое распространение релейных вариантов схем АПВ, в настоящее время они практически вытеснены бесконтактными устройствами, которые обладают повышенным быстродействием, отсутствием привода, и поэтому более надежны.

Широкая номенклатура полупроводниковых элементов, выпускаемых нашей промышленностью, позволила разработать и внедрить в действующее производство ряд достаточно надежных бесконтактных

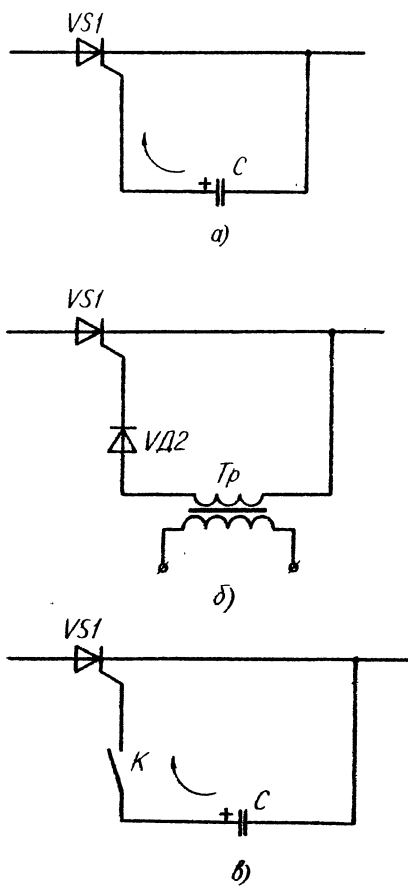


Рис. 2.5. Способы управления тиристорными ключами в схемах БАПВ.

автоматических устройств (БАПВ), в которых роль коммутирующего ключа выполняет управляющий диод (тиристор).

В схемах БАПВ управление тиристорным ключом осуществляется различными способами, основные из которых представлены на рис. 2.5, где:

а) способ удержания тиристорного ключа в открытом состоянии путем непосредственного разряда на его управляющий переход предварительно заряженного конденсатора;

б) питание управляющего перехода тиристорного ключа от индивидуального трансформатора напряжения;

в) управление тиристорным ключом посредством импульсного разряда предварительно заряженного конденсатора на управляющий переход с частотой сети.

Первый способ управления применяют редко из-за значительной величины времязадающей емкости, необходимой для удержания тиристора открытым в течение заданного времени  $t_y$ , равного времени уставки БАПВ. Емкость времязадающего конденсатора определяется как

$$C = \frac{t_y}{R_g \ln \frac{U_{co}}{U_{omл}}}, \quad (2.1)$$

где  $R_g$  - динамическое сопротивление управляющего перехода тиристора;

$U_{co}$  - начальное напряжение конденсатора;

$U_{omл}$  - постоянное отпирающее напряжение управляющего электрода тиристора.

Установка индивидуального трансформатора для питания перехода тиристорного ключа (рис. 2.5,б) в ряде случаев также нецелесообразна. Объясняется это тем, что несмотря на его незначительную мощность, габариты устройства БАПВ существенно возрастают.

Управление переходом тиристора посредством импульсного разряда предварительно заряженного конденсатора с частотой сети (рис. 2.5,в), сочетая положительные качества первых двух способов управления, свободно от их недостатков. Поэтому этот способ управления может быть рекомендован к широкому применению в устройствах БАПВ.

Принцип действия устройства БАПВ на основе предлагаемого способа самозапуска электродвигателей может быть проиллюстрирован следующей структурной схемой (рис. 2.6).



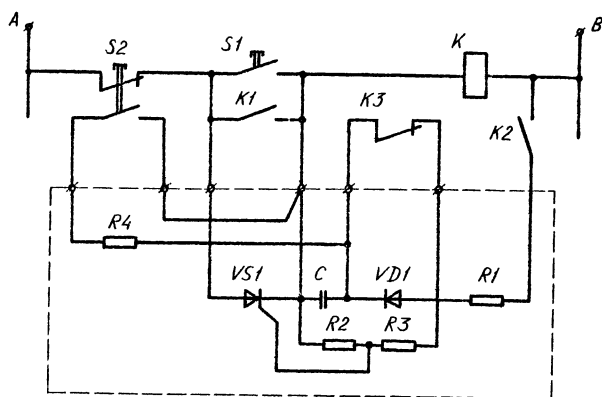


Рис. 2.7. Принципиальная схема устройства БАЛБ, применяемого на Каунасском ЗХВ.

На Каунасском заводе искусственного волокна им. 50-летия Октября [8] разработано довольно простое устройство (рис. 2.7). В исходном положении (напряжение сети подано) МП отключен и контакты К1, К2 разомкнуты, а К3 замкнут. После подачи на катушку К напряжения, посредством замыкания кнопки  $S1$  "Пуск", контакт К3 размыкается, а К2, замыкаясь, заряжает времязадающий конденсатор  $C$  до амплитудного значения напряжения. При кратковременном пере-  
рыве питания якорь МП отпадает, контакты К1, К2 размыкаются, а К3 замыкается, конденсатор  $C$  разряжается на управляющий переход тиристора  $VS1$  и удерживает последний в открытом состоянии. Время удержания определяется величинами сопротивления  $R3$  и емкости  $C$ . Принудительный разряд конденсатора, исключающий самопроизвольное включение МП при оперативном его отключении кнопкой  $S2$  "Стоп", достигается применением специальных кнопочных постов с двухэлементной самовозвращающей кнопкой "Стоп". Недостатки схемы, сдерживающие ее применение на предприятиях химической промышленности:

- а) использование специального кнопочного поста;
- б) прокладка дополнительных проводов;
- в) использование дополнительных блок-контактов;
- г) при выдержке времени  $5 + 10$  с с использованием тириستоров ТПО-25 требуется емкость конденсатора  $200 + 800$  мкФ 800 В;
- д) зависимость выдержки времени от характера исчезновения напряжения сети.

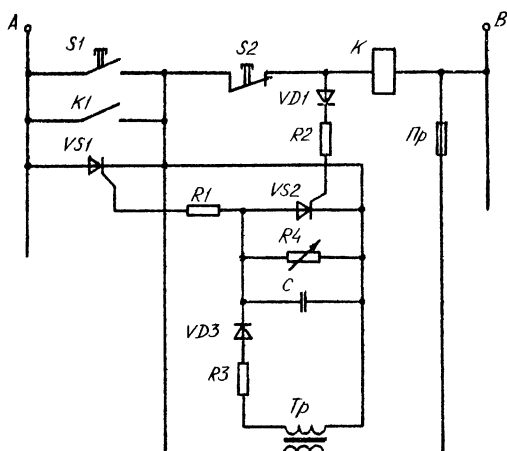


Рис. 2.8. Принципиальная схема устройства БАПВ, применяемого "Союзхимпромэнерго".

Более совершенная схема БАПВ [9] создана в объединении "Союзхимпромэнерго" (рис. 2.8). В исходном положении (напряжение сети подано) МП отключен. При включении МП питание катушки К бло - кируется контактом К1, а времязадающий конденсатор С заряжается через понижающий трансформатор до напряжения, определяемого дели - телем R1, R3, R4. При кратковременном перерыве питания якорь МП отпадает и времязадающий конденсатор С разряжается на управляющий переход VS1 и удерживает его в открытом состоянии. Время удержа - ния определяется цепочкой C, R4, R1 и величиной напряжения на конденсаторе. Принудительный разряд конденсатора, при оперативном отключении МП от кнопки S 2, осуществляется тиристором VS 2, кото - рый открывается при нажатии кнопки "Стоп" и шунтирует конденсатор C. Устройство БАПВ свободно от ряда недостатков вышерассмотрен - ного варианта, однако использование понижающего трансформатора в схеме, довольно значительная емкость времязадающего конденсатора, зависимость выдержки времени устройства от скорости падения пита - ющего напряжения сдерживает его широкое применение.

Более широкое распространение в Сибирском регионе получило

устройство БАЛВ, созданное предприятием "Сибхимпромэнерго" г. Кемерово (рис. 2.9).

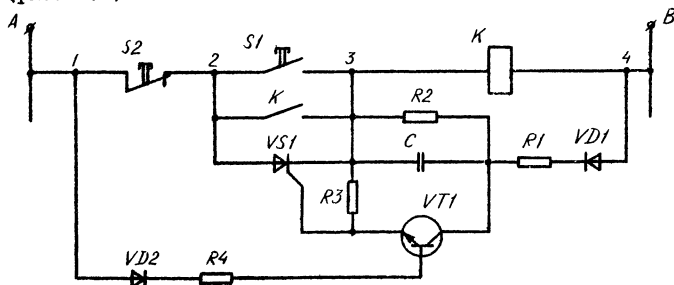


Рис. 2.9. Принципиальная схема устройства БАЛВ, применяемого предприятием "Сибхимпромэнерго" г. Кемерово.

Работа устройства основана на принципе импульсного разряда предварительно заряженного конденсатора на управляющий переход тиристора  $VS1$  с частотой сети [10]. В исходном положении (напряжение сети подано) катушка МП обесточена. На точках 1-3 присутствует напряжение синхронизации в положительную полуволну (относительно тиристора  $VS1$ ). Транзисторный ключ  $VT1$  открывается и шунтирует времязадающий конденсатор  $C$ .

После включения МП от кнопки "Пуск"  $S1$  снимается напряжение синхронизации, закрывается транзистор  $VT1$  и заряжается времязадающий конденсатор  $C$  до напряжения, определяемого делителем  $R1, R2$ . При исчезновении напряжения сети МП отключается и конденсатор  $C$  начинает разряжаться на резистор  $R2$ , а с восстановлением питающего напряжения появляется напряжение синхронизации в точках 1-3 схемы и открывается транзистор  $VT1$ . Конденсатор разряжается на управляющий переход тиристора  $VS1$ , который, открываясь, шунтирует точки 1-3, снимая напряжение синхронизации. Транзистор  $VT1$  закрывается и конденсатор продолжает разряжаться на сопротивление  $R2$ . При следующей полуволне процесс повторяется и будет продолжаться до включения МП ( $2 + 10$  периодов). При включении катушка  $K$  блокируется блок-контактами, закрывается транзистор  $VT1$  и заряжается времязадающий конденсатор  $C$ . Устройство готово к повторному действию.

Ведерка времени определяется сопротивлением резистора  $R2$ , величиной емкости времязадающего конденсатора и величиной сопро-



твления управляющего перехода тиристора  $VS1$ . При оперативном отключении МП кнопкой "Стоп"  $S2$  на точках 1-3 появляется напряжение синхронизации и открывается транзистор  $VT1$  в каждую положительную полуволну, разряжая времязадающий конденсатор на управляющий переход тиристора  $VS1$ . Время разряда зависит от величины емкости и напряжения на времязадающем конденсаторе, сопротивления управляющего перехода тиристора и насыщенного транзистора.

Необходимо отметить, что во всех схемах БАПВ включение МП посредством тиристорного ключа существенно отличается от включения при нормальных условиях.

Завод-изготовитель гарантирует напряжение срабатывания МП в пределах  $0,8 U_n$  при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц. При включении через тиристорный ключ (однополупериодное выпрямление), естественном угле открывания, напряжение срабатывания МП повышается на 10-12%.

В анализируемом же устройстве за счет наличия транзисторного ключа  $VT1$  в цепи управления тиристора, у которого ограничен ток базы (до 15 мА), угол открывания тиристора увеличивается до  $45 \div 60^\circ$ . В результате напряжение срабатывания МП возрастает до номинального, что отрицательно сказывается на надежности всей схемы электроснабжения и на эффективности выполнения возложенных функций самим устройством БАПВ.

### 2.3. Групповое АПВ электродвигателей

Устройства АПВ электродвигателей для обеспечения самозапуска могут выполняться как индивидуальные, так и групповые.

Для примера приведем устройство (для 12 двигателей) самозапуска УСД-12 (рис. 2.10), разработанное в "Союзхимпроэнерго" [6]. При исчезновении или снижении напряжения до величины уставки реле напряжения РН контакты последнего отключают реле времени РВ1, что приводит к обесточиванию катушки промежуточного реле РП. При этом обесточивается цепь питания реле РВ2 и подготавливаются к включению цепи катушек реле времени РВ3 и реле повторителей 1РП, 2РП, 3РП, замыкающие контакты которых шунтируют кнопки "Пуск". Контакты реле времени обеспечивают возможность ступенчатого самозапуска электродвигателей, т.е. осуществления его в три очереди, что повышает напряжение самозапуска и увеличивает величину допустимой мощности самозапущаемой нагрузки. Если длительность кратковремен-

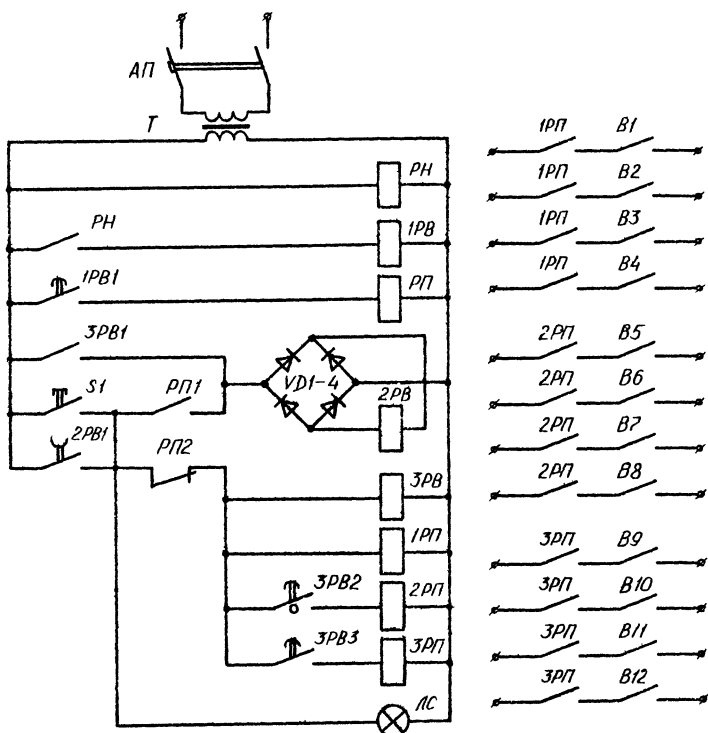


Рис. 2.10. Устройство обеспечения самозапуска группы двигателей (УСД-12).



обходимость прокладки довольно разветвленных коммутационных связей, даже при централизованном расположении аппаратуры управления электродвигателями, то применение группового АПВ становится экономически нецелесообразным.

#### 2.4. БАПВ электродвигателей с самоподхватом

Широкий анализ существующих схем устройств БАПВ как индивидуальных, так и групповых позволил создать схему БАПВ [11] свободную от многих вышеперечисленных недостатков (рис. 2.12).

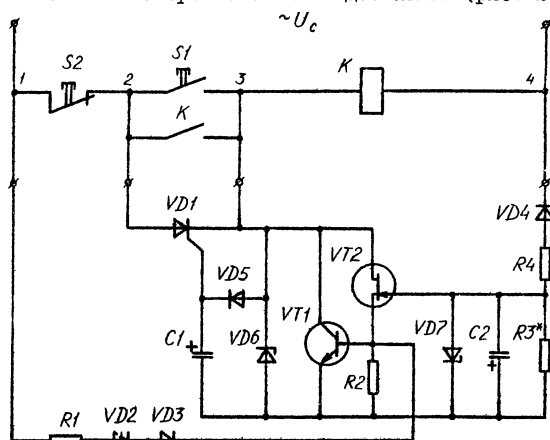


Рис. 2.12. Принципиальная схема устройства БАПВ, предложенная Кемеровским технологическим институтом.

У предлагаемой принципиальной электрической схемы устройства БАПВ в качестве силового ключа использован тиристор  $VS1$ . Ключ управления (рис. 2.6) выполнен на транзисторе  $VT1$ . Элемент выдержки времени собран на полевом транзисторе  $VT2$ , в цепь затвористок которого включена времязадающая цепочка  $C2, R3$ . Цепь  $R1, VD2, R2$  (ЦС) обеспечивает синхронизацию транзисторного ключа  $VT1$ . Стабилитроны  $VD6, VD7$  ограничивают величину напряжения на конденсаторах  $C1, C2$ , которые заряжаются по цепи  $R4, VD4$ .

Работа схемы в исходном положении (напряжение сети подано, МП отключен). На точках 1-3 присутствует напряжение сети и транзистор  $VT1$  открыт по цепи синхронизации в каждую положительную

полуволну синусоиды, шунтируя накопительный конденсатор  $C1$ . Транзистор  $VT2$  открыт, что препятствует подзаряду конденсатора  $C1$  токами утечки, благодаря чему исключается самопроизвольное открытие тиристора  $VS1$ .

После включения МП от кнопки "Пуск"  $S1$  блок-контакт  $K$  шунтирует цепь синхронизации (точки 1-3), на катушке МП (точки 3-4) появляется напряжение. Вреязадающий конденсатор  $C2$  начинает заряжаться по цепи: т.3 -  $VT1$  -  $C2$  -  $R4$  -  $VD4$  - т.4. При достижении на конденсаторе  $C2$  уровня напряжения закрывания транзистора  $VT2$  последний закрывается и снимает напряжение смещения с базы  $VT1$ . Транзистор  $VT1$  закрывается, дешунтируя конденсатор  $C1$ , который начинает заряжаться по цепи: т.3 -  $VD5$  -  $C1$  -  $C2$  -  $VD4$  - т.4. Величина напряжения заряда конденсаторов  $C1$  и  $C2$  ограничена стабилитронами  $VD6$  и  $VD7$ . В таком состоянии схема будет находиться до тех пор, пока не произойдет отключение МП от кнопки "Стоп"  $S2$  или до момента исчезновения напряжения сети.

При нажатии на кнопку "Стоп" в точках 1-3 появляется полное напряжение сети и транзистор  $VT1$  открывается на время положительной полуволны напряжения. При этом накопительный конденсатор  $C1$  разряжается через управляющий переход тиристора  $VS1$ . Время разряда определяется сопротивлением управляющего перехода тиристора и в худшем случае подбора элементов составляет 0,04 с, что значительно меньше времени возврата кнопки  $S2$  в исходное положение. Следовательно, после отпускания кнопки  $S2$  тиристор  $VS1$  не откроется, а времязадающий конденсатор  $C2$  разряжается на сопротивление  $R3$ . Схема устройства приходит в исходное положение.

Рассмотрим работу схемы БАПВ в различных переходных режимах системы электроснабжения.

1. Мгновенное понижение напряжения сети и появление его вновь (работа защиты, АВР, АПВ). Если напряжение понизится до уровня стабилизации стабилитрона  $VD7$ , начинает разряжаться времязадающий конденсатор  $C2$  на резистор  $R3$ . Транзистор  $VT1$  закрыт до тех пор, пока напряжение на конденсаторе  $C2$  не снизится до уровня напряжения отсечки транзистора  $VT2$ . Если длительность перерыва питания больше времени разряда  $C2$ , то при снижении напряжения на  $C2$  ниже уровня отсечки  $VT2$ , транзистор  $VT1$ , открываясь, разрядит конденсатор  $C1$  через управляющий переход тиристора  $VS1$ . При появлении после этого напряжения сети тиристор  $VS1$  не включится. В случае же восстановления питающего напряжения раньше, чем разрядится накопительный конденсатор  $C1$ , под воздействием напряжения

синхронизации откроется транзистор  $VT1$  в положительную полуволну. Конденсатор  $C1$  разряжается через управляющий переход тиристора  $VS1$  до момента его включения. Тиристор, включаясь, создает цепь питания катушки  $K$  и шунтирует цепь синхронизации. Транзистор  $VT1$  закрывается, дешунтируя путь разряда конденсатора  $C1$ . Этот процесс повторяется в каждую положительную полуволну питающего напряжения. Время срабатывания МП определяется его электромеханическими характеристиками и лежит в пределах  $0,04 \div 0,12$  с, что составляет  $2 \div 6$  периодов переменного напряжения с частотой 50 Гц. При включении МП его блок-контакт снимает напряжение синхронизации, закрывается транзистор  $VT1$  и схема возвращается в рабочее положение. Уставка устройства БАПВ (максимальное время согласуется с критическим временем перерыва электроснабжения) определяется параметрами времязадающей цепи  $C2, R3$ . Отсчет времени начинается с момента разряда конденсатора  $C2$ , т.е. с момента исчезновения напряжения.

2. Исчезновение напряжения, связанное с удаленными КЗ со стороны питания, или ошибочные отключения. В этом режиме напряжение снижается относительно плавно за счет затухающей э.д.с. выбегающих высоковольтных электродвигателей. Следует отметить, что для успешной работы устройства необходимо, чтобы напряжение синхронизации снималось раньше, чем разомкнется блок-контакт МП при его отключении. Это условие обеспечивается включением динистора  $VD2$  в цепь синхронизации. Его напряжение включения с одной стороны должно быть не ниже напряжения отпадания МП, а с другой стороны ограничивается углом открывания тиристора  $VS1$ . С учетом того, что напряжение отпадания МП, в рассматриваемом режиме, значительно понижено за счет уменьшения частоты, напряжение включения динистора берется  $0,3 U_n$ . В этом случае динистор обеспечивает не выше  $30^\circ$  угол включения тиристора и МП надежно срабатывает при уровне восстановившегося напряжения сети  $0,9 U_n$ .

При понижении напряжения динистор  $VD2$  отключает синхронизацию до размыкания блок-контакта МП и транзистор  $VT1$  остается закрытым, дешунтируя цепь разряда конденсатора  $C1$ . Дальнейшее понижение напряжения приводит к отпаданию якоря МП и размыканию блок-контакта  $K$ . С этого момента начинается отсчет выдержки времени, так как времязадающий конденсатор  $C2$  разряжается на  $R3$ . В дальнейшем работа схемы аналогична вышеописанному.

Если же по каким-то причинам протекания переходного процесса

("тяжелый" самозапуск высоковольтных двигателей), первоначальное напряжение восстановится ниже срабатывания МП через тиристорный ключ БАПВ, то схема БАПВ, полностью обеспечив подключение катушки К к напряжению сети, встанет в режим разряда накопительного конденсатора. Длительность режима разряда зависит от величины емкости последнего, а надежность включения МП по цепи устройства БАПВ зависит от величины тока управления тиристора  $VS1$ . Напряжение на накопительном конденсаторе может настолько снизиться, что даже при номинальном уровне питающего напряжения устройство не обеспечит включение МП через тиристорный ключ БАПВ.

Для повышения надежности работы устройства БАПВ в режиме группового самозапуска введен принцип автоматического самоподхвата схемы, что выражается в принудительном подзаряде накопительного конденсатора в переходных режимах. Такая постановка задачи несколько изменяет цепь заряда конденсатора, но существенно не меняет принципиальную схему устройства (рис. 2.13).

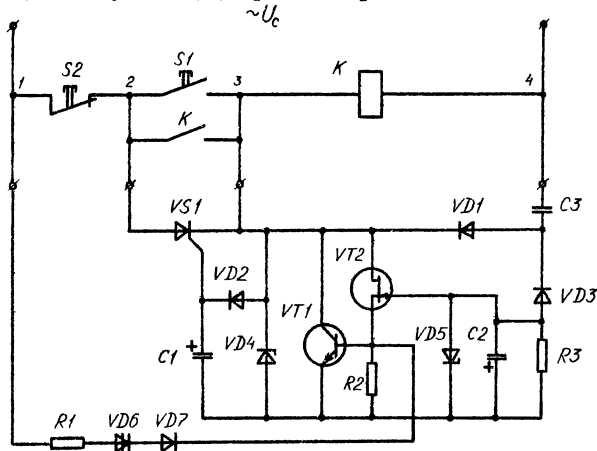


Рис. 2.13. Принципиальная схема устройства БАПВ с самоподхватом.

При выключенном МП конденсаторы  $C1$  и  $C2$  заряжаются по цепи: т.3 -  $VD2$  -  $C1$  -  $C2$  -  $VD3$  -  $C3$  - т.4. до напряжения стабилизации стабилитронов  $VD6$  и  $VD5$ . Заряженный конденсатор  $C3$  разряжается отрицательной полярностью по цепи т.4 -  $C3$  -  $VD1$  - т.3. При исчезновении напряжения сети и появлении его вновь до

уровня ниже напряжения срабатывания через тиристорный ключ БАПВ, накопительный конденсатор  $C1$ , разряжаясь, открывает тиристор  $VS1$ . На точках схемы 3-4 появляется напряжение сети (положительная полуволна), и конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  заряжаются по вышеуказанной цепи до напряжения стабилизации. В отрицательную полуволну напряжения конденсатор  $C3$  разряжается через катушку  $МП$ . С приходом следующей положительной полуволны процесс повторяется. В таком режиме схема будет находиться до восстановления напряжения сети до уровня срабатывания данного  $МП$ , что и обеспечивает каскадность самозапуска по уровню восстанавливающегося напряжения.

Основные элементы устройства для изменяемой части схемы для всей шкалы напряжений приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Обозначение по схеме	127 В	220 В	380 В	500 В	660 В
$VS1$	T-10-25, 3 кл.	T-10-25, 6 кл.	T-10-25, 8 кл.	T-10-25, 10 кл.	T-10-25, 12 кл.
$VD6$	КН102 Б	КН102 Д	КН102 Ж	КН102 И	КН102 Н КН102 В
$VD7$	Д226Б	Д210	Д217	Д218	Д218
$C3$	0,05 400	0,025 500	0,015 750	0,001 1000	0,001 1500
$R1$	100 кОм	180 кОм	300 кОм	430 кОм	560 кОм

Остальные элементы относятся к неизменяемой части схемы устройства БАПВ и взяты следующие:

$VD2$  - Д220Б;  $VD4$  - Д814В;  $VD5$  - Д814А;  $VT1$  - КТ603Б;  
 $R2$  - 4,3 кОм;  $VT2$  - КП302Б;  $C2$  - 10 мкФ;  $C1$  - 200 мкФ;  
 $VD1$  и  $VD3$  - Д226,  $R3$  - 500 кОм.

Рекомендуемое устройство БАПВ удовлетворяет следующим условиям:

1. Может быть изготовлено на напряжения 127, 220, 380, 500, 600 В  $\pm 10\%$  с частотой сети 50 Гц.
2. Надежно работает при температуре окружающего воздуха  $\pm 0 + 40^\circ\text{C}$ , с относительной влажностью до 80%.
3. Устройство бесконтактное, малогабаритное, без посторонне-



го источника питания, на отечественных элементах и полупроводниковых приборах, выведены контрольные точки.

4. Оперативное отключение МП производится за время 0,04 с.

5. Классическая схема управления МП не меняется.

6. Выдержка времени стабильна, не зависит от характера изменения напряжения питающей сети, плавно регулируется в диапазоне 0 + 10 с, и начало отсчета начинается с момента отключения МП.

7. Устройство ложно не срабатывает при коммутационных пере-напряжениях порядка 1,5  $U_{анн}$ .

8. В схеме устройства возможно использование тиристора серии Т-10 с допустимыми токами управления 100 мА.

Стендовые испытания устройства БАПВ, проведенные в 1979 году, показали его универсальность и надежность в работе при различных скоростях исчезновения питающего напряжения и появлении его вновь с различной длительностью бестоковой паузы.

Устройство БАПВ было передано для доработки на производство, где уже безотказно работает пять лет.

## 2.5. Каскадное БАПВ по уровню восстанавливающегося напряжения сети

Исходя из анализа положительных и отрицательных аспектов рассматриваемых выше устройств АПВ, в Кемеровском технологическом институте, на кафедре Электрооборудования создано устройство каскадного БАПВ по уровню восстанавливающегося напряжения сети.

Необходимость создания такого устройства была обусловлена тем, что при самозапуске сам факт подключения ответственных двигателей к сети, после бестоковой паузы, зависит от уровня напряжения срабатывания их контакторов (МП) и если восстановившееся напряжение будет недостаточной величины, то двигатели не включатся.

Согласно требованиям ПУЭ и ГОСТ аппараты переменного тока должны четко включаться при подаче на катушки управления 85% номинального напряжения. Практически напряжение срабатывания аппаратов с принятием 5% запаса на неучитываемые факторы (неточность измерения, колебания питающего напряжения и др.) не должно превышать 80% номинального.

Следовательно, при разработке того или иного устройства АПВ необходимо соблюдать требования ПУЭ и ГОСТ.

С другой стороны известно, что эффективность самозапуска электродвигателей зависит от уровня напряжения "опрокидывания" и двигателей под промышленной нагрузкой.

Следовательно, в режиме самозапуска электродвигателей, осуществляемого посредством пассивных способов, величина напряжения самозапуска  $U_{сз}$  ограничена снизу большим из двух напряжений - напряжением срабатывания втягивающей катушки  $U_{ср}$  контактора (магнитного пускателя) и минимальным значением остаточного напряжения

$$U_{ост} \leq 1,1 U_{кр},$$

где  $U_{кр}$  - напряжение "опрокидывания" асинхронного электродвигателя напряжением до 1000 В под промышленной нагрузкой.

Согласно стандартам на асинхронные машины переменного тока пусковой момент у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В, выпускаемых отечественной промышленностью, не ниже номинального  $M_n \geq M_n$  (считаем, что двигатели за время бестоковой паузы полностью останавливаются). Учитывая, что вращающий момент пропорционален квадрату напряжения сети  $M_{\delta p} = U^2$ , и что для успешного самозапуска вращающий момент должен быть больше момента сопротивления  $M_{\delta p} \geq 1,1 M_c$ , можно ориентировочно оценить величину напряжения самозапуска.

Для двигателей, приводящих в движение механизмы с постоянным моментом сопротивления на валу и нагруженные (например, в химической промышленности)  $K_j = 0,6 + 0,7$ , напряжение самозапуска  $U_{сз} \geq 0,8 U_n$ .

Для двигателей с механизмами, имеющими вентиляторную характеристику, т.е. с моментом сопротивления, зависящим от скорости вращения агрегата, напряжение самозапуска  $U_{сз} \geq (0,4 + 0,5) U_n$ .

Таким образом, вышеприведенный анализ показал, что для средств пассивного способа обеспечения самозапуска низковольтных двигателей определяющим является напряжение срабатывания втягивающей катушки  $U_{ср}$  контакторов (магнитных пускателей).

И если, например, напряжение срабатывания втягивающей катушки каким-то образом снизить, то в этом случае определяющим фактором станет напряжение "опрокидывания" анализируемых самозапускаемых двигателей. Но так как это без основательного изменения конструкции коммутационного аппарата сделать невозможно, то необходимо стремиться к сохранению гарантий завода-изготовителя, что определяется нормами ПУЭ и ГОСТ.

Однако, во всех выше рассмотренных устройствах БАПВ наблюдается повышение  $U_{ср}$  за счет того, что катушка контактора (МП) при включении по цепи АПВ получает питание от выпрямленного однополупериодного напряжения сети, что, в зависимости от выбранной схемы управления тиристорным ключом (рис. 2.5), повышает напряжение срабатывания до  $U_{ср} = (0,9 + 1,0)U_{ном}$ . Кроме этого, в этих устройствах отсутствует контроль за длительностью выбега двигателей, контроль за скоростью снижения питающего напряжения, временный контроль за уровнем восстанавливающегося напряжения сети и ряд других недостатков. Все это значительно снижает суммарную мощность ответственных двигателей, способных самозапуститься от рассматриваемого источника питания и понижает надежность применяемых устройств БАПВ.

Исходя из вышеприведенного анализа создана схема, свободная от указанных недостатков (рис. 2.14).

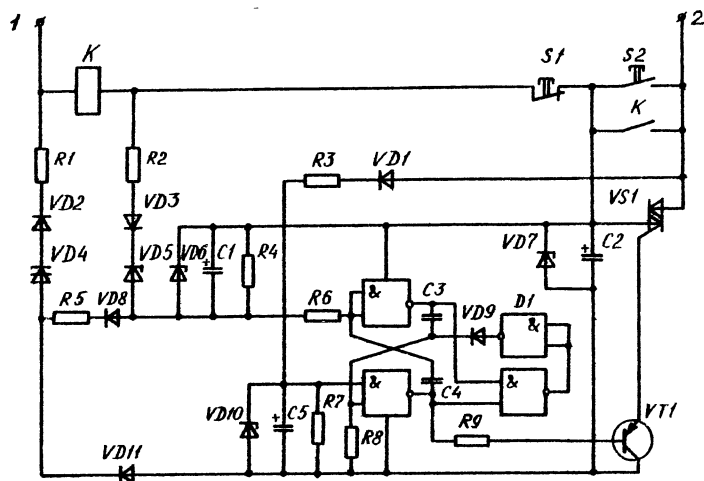


Рис. 2.14. Принципиальная схема устройства каскадного БАПВ.

Схема содержит такие основные узлы, как: ключ на симисторе  $VS1$ ; генератор импульсов на микросхеме  $DD1$  с элементами  $R6$ ,  $R8$ ,  $C3$  и  $C4$ , задающими частоту и диодом  $VD9$ , которым обеспечивается "мягкий режим самовозбуждения"; цепь задания уровня напряжения включения БАПВ на диносторе  $VD4$ ; две времязадающих це-

ти на конденсаторах  $C1$  и  $C5$ .

Работает схема следующим образом. Включение контактора (МП) К производится кнопкой "Пуск"  $S2$ , после чего он удерживается включенным через свой блок-контакт К. В течение периода нормальной работы контактора (МП) происходит заряд конденсаторов  $C1$ ,  $C5$  и  $C2$  через открывающийся каждые полпериода напряжения сети динистор  $VD4$ .

При глубокой посадке питающего напряжения контактор (МП) К отключается и при восстановлении напряжения сети до уровня ниже критического динистор  $VD4$  не откроется. Происходит разряд конденсаторов  $C1$  и  $C5$  на резисторы  $R4$  и  $R7$  соответственно. Разряд обоих конденсаторов до определенного напряжения приводит к срыву генератора на микросхеме  $DD1$ . Время разряда конденсатора  $C5$ , приводящее к срыву генератора, составляет 10-15 мс, а конденсатора  $C1$  - равно критическому времени перерыва электроснабжения.

Если до истечения критического времени  $t_{кр}$  (исходя из этого времени выбирается уставка БАПВ) восстановившееся напряжение сети возрастет до уровня напряжения срабатывания контактора (МП), то открывается динистор  $VD4$ . В этом случае по цепи: т.2 -  $VD1$  -  $R3$  -  $C5$  -  $VD11$  -  $VD4$  -  $VD2$  -  $R1$  - т.1 произойдет заряд конденсатора  $C5$  до напряжения стабилизации стабилитрона  $VD10$ . Генератор запустится и импульсами с его выхода периодически открывается транзистор  $VT1$ , через который предварительно заряженный конденсатор  $C5$  подключается к управляющему электроду симмистора  $VS1$ , который открывается. При этом импульсы на включение симмистора  $VS1$  поступают непрерывно, независимо от полярности напряжения питающей сети. В полпериода напряжения сети, когда динистор  $VD4$  закрыт, работа генератора импульсов не прерывается, так как конденсатор  $C5$  за полпериода не успевает разряжаться до напряжения срыва генератора. Таким образом включение контактора (МП) через симмистор  $VS1$  происходит на переменном оперативном токе, что позволяет производить его включение при напряжении, гарантированном заводом-изготовителем коммутационного аппарата - не ниже  $0,8 U_n$ . После включения контактора (МП) происходит полный заряд конденсаторов  $C1$  и  $C2$ .

Если напряжение сети восстановилось до уровня напряжения срабатывания аппарата спустя время уставки БАПВ, то включение контактора (МП) не произойдет, так как генератор не включится в работу из-за разряда конденсатора  $C1$ .

Оперативное отключение контактора (МП) производится кнопкой "Стоп"  $S1$ . При этом в течение одного полупериода напряжения сети по цепи: т. I - катушка К -  $R2$  -  $VD3$  -  $VD5$  -  $C1$  - контакт К-т. 2 происходит разряд конденсатора  $C1$ . После отпущения кнопки  $S1$  (это время приблизительно 0,5 с) контактор (МП) не включится из-за разряда конденсатора  $C1$ .

Назначением диодов  $VD8$  и  $VD11$  является разъединение цепей разряда конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Стабилитрон  $VD5$  служит для исключения цепи разряда конденсатора  $C1$  через диод  $VD3$ , резистор  $R2$  и кнопку  $S1$ . Напряжение стабилизации  $VD5$  должно быть больше напряжения стабилизации стабилитрона  $VD6$ . Генератор собран на микросхеме  $KI76LA7$ .

Таким образом, принцип действия устройства каскадного БАПВ обеспечивает повышенную надежность включения контактора (МП) при самозапуске, позволяет иметь выдержку времени устройства, не зависящую от уровня и скорости снижения питающего напряжения, и дает возможность включать контактор (МП) во всем временном диапазоне восстанавливающегося напряжения сети. При восстановлении питающего напряжения, по мере включения контакторов (МП) ответственных самозапускающихся двигателей, напряжение снова может понизиться до уровня ниже напряжения срабатывания коммутационных аппаратов. В этом случае ряд невключившихся двигателей, оборудованных устройствами БАПВ, переходят в режим ожидания и по мере повышения напряжения будет происходить их автоматическое поочередное включение. Этим и объясняется каскадность устройства по уровню (мере) восстановления напряжения сети.

Устройство каскадного БАПВ прошло промышленную апробацию и рекомендовано к широкому внедрению на промышленных предприятиях.

## 2.6. Способ активного воздействия на якорь контактора (МП) в бестоковую паузу системы электроснабжения

Способ характеризуется тем, что удержание якоря в бестоковую паузу осуществляется электромагнитной силой, создаваемой за счет питания катушки контактора (МП) током разряда предварительно заряженного конденсатора (ПЗК).

К характерным особенностям устройств, создаваемых на базе рассматриваемого способа, относятся приемы заряда и разряда ПЗК:

- непосредственный заряд и разряд;
- разряд стабилизированным током;
- разряд импульсным стабилизированным током;
- заряд энергией колебательного контура катушка-конденсатор и разряд через импульсный стабилизатор тока.

Основными технико-экономическими показателями устройств, выполняемых на базе рассмотренных приемов, являются: время активного воздействия на якорь аппарата в бестоковую паузу; повышение цепей управления контактором (МП); экономичность расходования энергии ПЗК; габариты устройства.

На рис. 2.15 показана принципиальная схема, осуществляющая разряд ПЗК в бестоковую паузу непосредственно на основную и дополнительную катушки контактора (МП). Дополнительная катушка намотана тонким проводом поверх основной [6].

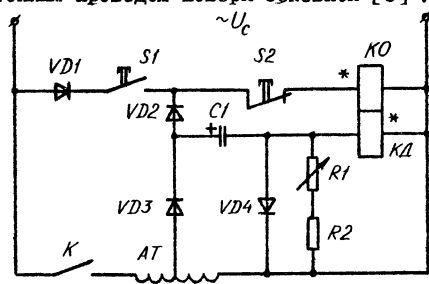


Рис. 2.15. Принципиальная схема устройства удержания с непосредственным разрядом конденсатора на основную и дополнительную катушки пускателя.

Ток, потребляемый устройством управления из сети в нормальном режиме, равен

$$I_c = \frac{U_{co}}{R_k}, \quad (2.2)$$

где  $U_{co}$  - напряжение заряженного конденсатора;  
 $R_k$  - сопротивление основной катушки.

Намагничивающая сила основной и дополнительной катушек при разряде на них ПЗК и пренебрежении индуктивностью катушек, изменяется по закону

$$F = I_c (W_o + W_g) \frac{R_k}{R_k + R_g} e^{-\frac{t}{C(R_k + R_g)}}. \quad (2.3)$$

где  $W_o$ ,  $W_g$  - числа витков основной и дополнительной катушек;  
 $C$  - емкость ПЗК.

Время удержания якоря притянутым (активное воздействие на якорь) в бестоковую паузу определяется временем снижения намагничивающей силы (2.3) до величины удержания  $I_{yg} W$ , где  $I_{yg}$  - ток удержания якоря в притянутом положении.

Для устройства с дополнительной катушкой время активного воздействия равно

$$t_{og} = C(R_k + R_g) \ln \frac{I_c}{I_{yg}} \cdot \frac{1 + \frac{W_g}{W_o}}{1 + \frac{R_g}{R_k}}. \quad (2.4)$$

Для устройства только с основной катушкой

$$t_o = C R_k \ln \frac{I_c}{I_{yg}}. \quad (2.5)$$

Как показывает анализ выражений (2.4 и 2.5), время активного воздействия на якорь контактора (МП), в устройствах непосредственного заряда и разряда ПЗК, зависит от характера снижения напряжения и существенно уменьшается при плавном его снижении (выбег двигательной нагрузки).

При стабилизированном разряде ПЗК в бестоковую паузу (рис. 2.16) энергия конденсатора расходуется значительно экономнее. Время удержания устройства постоянно и не зависит от скорости

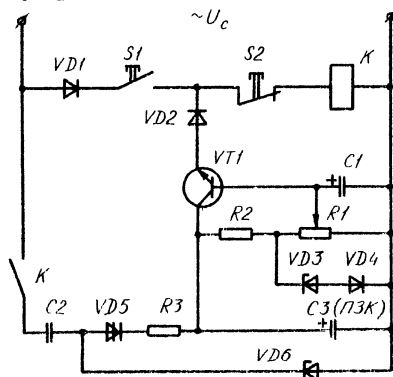


Рис. 2.16. Принципиальная схема устройства стабилизированного не-прямозарядного разряда ПЗК в бестоковую паузу

снижения напряжения сети. Причем, отсчет времени удержания производится от момента, когда напряжение сети снизится до  $U_c \geq 1,1 U_{yg}$ , где  $U_{yg}$  — напряжение удержания контактора (МП).

Ток, потребляемый из сети в нормальном режиме, равен, току удержания

$$I_c = I_{yg}. \quad (2.6)$$

Напряжение на конденсаторе при его разряде изменяется по закону

$$u = U_{co} - I_{yg} \frac{t}{C}. \quad (2.7)$$

Время активного воздействия устройства

$$t_{cm} = CR_k \left( \frac{U_{co}}{R_k I_{yg}} - 1 \right). \quad (2.8)$$

Из сравнения (2.2) и (2.6) видно, что в нормальном режиме питающей сети устройство со стабилизацией тока разряда имеет меньшее потребление тока из сети, чем устройство с непосредственным разрядом ПЗК. Время удержания якоря в бестоковую паузу, как следует из выражений (2.4, 2.5 и 2.8), также значительно больше при стабилизированном разряде ПЗК.

Наиболее перспективным способом управления разрядом ПЗК в бестоковую паузу является использование для этих целей импульсного стабилизатора тока (электронный ключ). В этом случае (рис. 2.17) энергия конденсатора расходуется только на тепловые потери

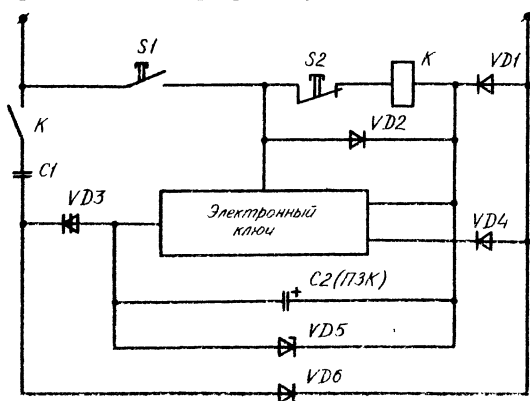


Рис. 2.17. Способ импульсного стабилизированного разряда ПЗК в бестоковую паузу.



в катушке, а в самом же импульсном стабилизаторе, принимающем только два состояния: открытое и закрытое, потери энергии при разряде ПЗК отсутствуют.

С началом отсчета времени удержания (определяется также, как и для рис. 2.16) начинается разряд ПЗК, причем с уменьшением напряжения ПЗК увеличивается частота открывания ключа. Соответствующей настройкой электронного ключа создаются условия постоянства протекающего по катушке контактора (МП) среднего тока  $I_{cp} = I_{yд}$ .

На рис. 2.18 на примере магнитного пускателя типа ПА-3И для различных вариантов разряда ПЗК емкостью 10 мкФ приведены зависимости времени задержки  $t$  и тока, потребляемого из сети,  $I_c$  от величины начального напряжения  $U_c$  на этом конденсаторе. Из анализа кривых видим, что для получения необходимых выдержек времени устройства задержки при наименьшем потреблении тока из сети наилучшей является схема разряда с импульсным стабилизатором. Оче-

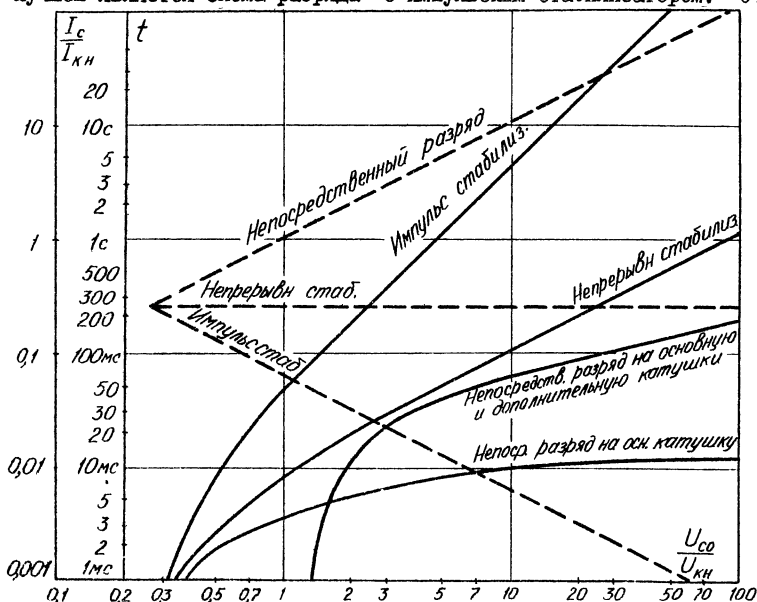


Рис. 2.18. Зависимость времени активного воздействия на якорь в бестоковую паузу (сплошные линии) и потребляемого из сети тока схемой устройства управления контактором (пунктирные линии) от способа разряда ПЗК.



колебательный процесс в контуре прекратится в тот момент времени, когда ток в катушке станет нулевым, а напряжение на конденсаторе станет максимальным. Причем это напряжение будет приложено к  $VS2$  в проводящем направлении. Однако тиристор не откроется ввиду отсутствия сигнала на его управляющем электроде. Далее в работу вступит электронный ключ. Дiod  $VD4$  и тиристор  $VS1$  при этом шунтируют катушку на периоды разомкнутого состояния ключа.

Описанное устройство обеспечивает задержку до  $1,0 + 1,5$  с, которая определяется прежде всего той максимальной энергией, которая может быть запасена в магнитном поле катушки контактора (МП). Наибольшие потери энергии контура при преобразовании ее в энергию конденсатора составляют  $20 + 30\%$ .

## 2.7. Способы бестокового удержания якорей контакторов (МП) во включенном состоянии в нормальных и переходных режимах

К способам активного воздействия на якорь коммутационного аппарата в бестоковую паузу можно отнести и способы бестокового удержания якорей контакторов (МП). Отличительной особенностью таких способов является то, что электрическая энергия расходуется только в период изменения состояния аппарата (включение или отключение). В рабочем положении по катушке управления ток не протекает.

Интересные исследования по практической реализации указанных способов были проведены на Ферганском заводе азотных удобрений [7]. Здесь в основу устройства бестокового удержания контакторов переменного тока был положен принцип остаточной намагниченности, а в качестве магнитопровода использован сердечник из мягкой стали с широкой петлей гистерезиса (рис. 2.20). Несмотря на положительный опыт практического использования, аппарат новой конструкции не нашел широкого применения.

Объясняется это тем, что ряд положительных сторон описываемого устройства, как-то: экономия электроэнергии в цепях управления, возможность неограниченного регулирования выдержки времени ЗМН закрывается целым рядом существенных недостатков.

Так, надежность работы устройства, в первую очередь, зависит от уровня наладки, эксплуатации, даже от состояния вентиляции помещения электрощитовой и места установки модернизированных кон-

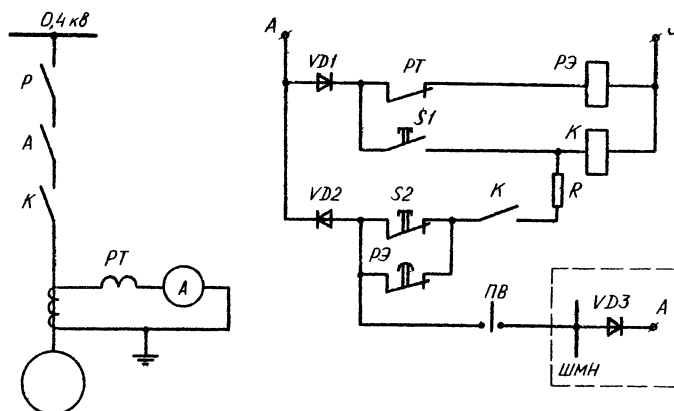


Рис. 2.20. Устройство бестокового удержания контакторов переменного тока.

такторов и т.д. Это связано с необходимостью тщательной притирки прилегающих поверхностей якоря и магнитопровода, постоянной их чистке в условиях эксплуатации, установке контакторов на панелях и щитах, не подверженных встряскам, ударам, вибрации и т.п.

Все это заставило предложить другой способ бестокового удержания якорей контакторов (МП), основанный на использовании энергии постоянного магнита.

Способ заключается в том, что в штатный магнитопровод (можно использовать магнитопровод из сплошного железа) встраивается постоянный магнит таким образом, что создает необходимую удерживающую силу при включении аппарата (рис. 2.21). Предлагаемый способ прост по выполнению, более надежен за счет постоянства магнитного потока в магнитопроводе и обладает всеми вышеперечисленными преимуществами.

Разработанный способ бестокового удержания якорей контакторов (МП) посредством введения в магнитную систему аппарата постоянного магнита выгодно отличается от известного способа [7]. катушка коммутационного аппарата в этом случае не только не потребляет ток во включенном состоянии, но и имеет сниженные энергозатраты при включении. Кроме этого, существенно повысилась надежность контактора (МП) и снизились, по сравнению с прототипом, затраты на монтаж (изготовление) и эксплуатационные расходы

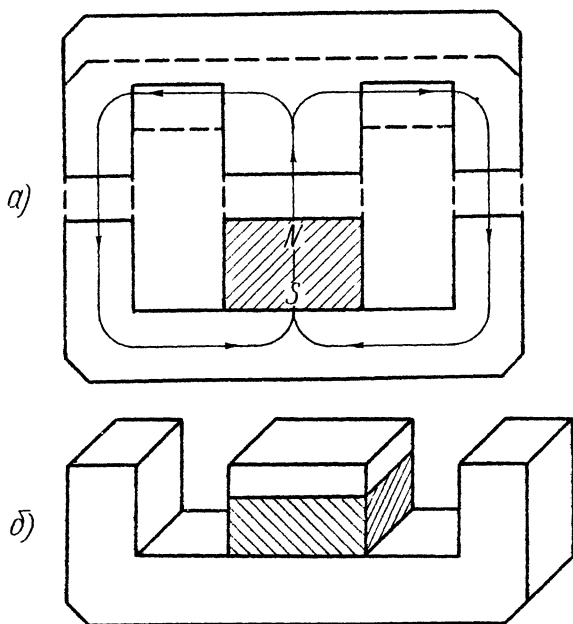


Рис. 2.21. Способ активного воздействия на якорь магнитного пускателя в бестоковую паузу посредством энергии постоянного магнита: а – принцип выполнения; б – расположение постоянного магнита в теле магнитопровода.

Однако рассмотренные способы бестокового удержания имеют один общий недостаток. Дело в том, что их работоспособность зависит от абсолютной целостности цепей управления, и при повреждении в них контактор (МП) уже никоим образом отключить невозможно, что для химических производств не годится.

## 2.8. Методика расчета величин остаточных напряжений и максимально допустимой суммарной мощности двигателей напряжением до 1000 В при их самозапуске

Режим самозапуска двигателей характеризуется взаимосвязанностью процессов, протекающих в двигателях и электрической сети,

которые обусловлены тем, что в реальных схемах электроснабжения промышленных предприятий при разгоне двигателя ток в сети зависит от напряжения на его зажимах. В свою очередь, это напряжение зависит от тока через потерю напряжения в элементах сети. Поэтому все методы расчета и в том числе метод расчета величины максимально допустимой мощности двигателей при их самозапуске от цехового трансформатора основаны на методе расчета уровней остаточного напряжения  $U_{ост}$  на зажимах двигателей.

Методы расчетов режимов самозапуска разработаны, в основном, применительно к условиям самозапуска двигателей собственных нужд электростанций. Эти двигатели питаются обычно напряжением выше 1000 В и присоединяются непосредственно к сборным шинам генераторного напряжения. В этом случае без заметной погрешности пренебрегают активным сопротивлением элементов электрической сети и обмотки статора двигателей, что значительно упрощает расчеты.

Широкое применение самозапуска двигателей в самых различных условиях электроснабжения требует совершенствования методов расчета сетей при самозапуске, а также и решения вопросов, определяющих нормальную эксплуатацию двигателей и технологических установок. При этом желательно, чтобы методы расчета сетей были применены как для сетей до, так и выше 1000 В с достаточной точностью.

Заметим, что в расчетах самозапуска двигателей недопустима 5-процентная погрешность при определении токов и сопротивлений сети (т.е. не следует пренебрегать активным сопротивлением при  $R \leq I/3 X$ ), как это принимается при расчетах токов короткого замыкания.

Точность расчетов при самозапуске должна быть выше потому, что в конечном счете возможность самозапуска определяется избыточным моментом, который пропорционален квадрату напряжения, а, следовательно, принимая 5-процентную погрешность для расчета остаточных напряжений при самозапуске, получаем погрешность при определении вращающего момента около 10%. Это значение погрешности равно минимальной величине избыточного момента для осуществления самозапуска, т.е. по отношению к избыточному моменту погрешность оказывается равной 100%. Поэтому активной составляющей полного сопротивления можно пренебречь, если она не менее чем в 10 раз меньше индуктивной, при этом максимальная погрешность расчета по отношению к избыточному моменту составит около 20%.

При расчете уровней остаточного напряжения при самозапуске двигателей, в основном, приходится сталкиваться с двумя вариантами:

- а) самозапуск двигателей от ненагруженного источника питания (например, АПВ трансформатора подстанции промышленного предприятия);
- б) самозапуск двигателей от предварительно нагруженного источника питания (например, АВР секции подстанции промышленного предприятия).

В обоих случаях для решения возможны два основных направления:

- 1) определение напряжения на зажимах двигателей, участвующих в самозапуске, с целью установления его возможности при заданном моменте статических сопротивлений;
- 2) определение необходимой величины мощности двигателей, участвующих в самозапуске при заданном уровне остаточного напряжения.

При решении обеих задач необходимо исходить из того, чтобы напряжение у двигателей было достаточным для обеспечения положительного избыточного момента в течение всего процесса разгона, при допустимом нагреве обмоток.

Если первая задача возникает при самозапуске двигателей напряжением как до, так и выше 1000 В, то вторая решается исключительно при самозапуске низковольтных электродвигателей. Такое положение объясняется широким применением для обеспечения самозапуска низковольтных двигателей устройств АПВ, где уровень остаточного напряжения нормируется напряжением срабатывания катушек включения низковольтных аппаратов.

Помимо указанных задач, возможны для решения и другие вопросы, так или иначе связанные с самозапуском двигателей, например, определение допустимого количества двигателей при групповом самозапуске, определение тока самозапуска, расчет допустимого времени разгона и т.п.

Расчет искомых значений величин при самозапуске двигателей начинают со схемы замещения рассматриваемого узла электроснабжения (рис. 2.22).

Анализ схемы замещения единичного двигателя показывает, что при неизменных значениях сопротивлений обмоток статора  $R_1$ ,  $X_1$ ,  $R_0$ ,  $X_0$  и ротора  $R_2'$ ,  $X_2'$  комплексное сопротивление двигателя со стороны зажимов статора

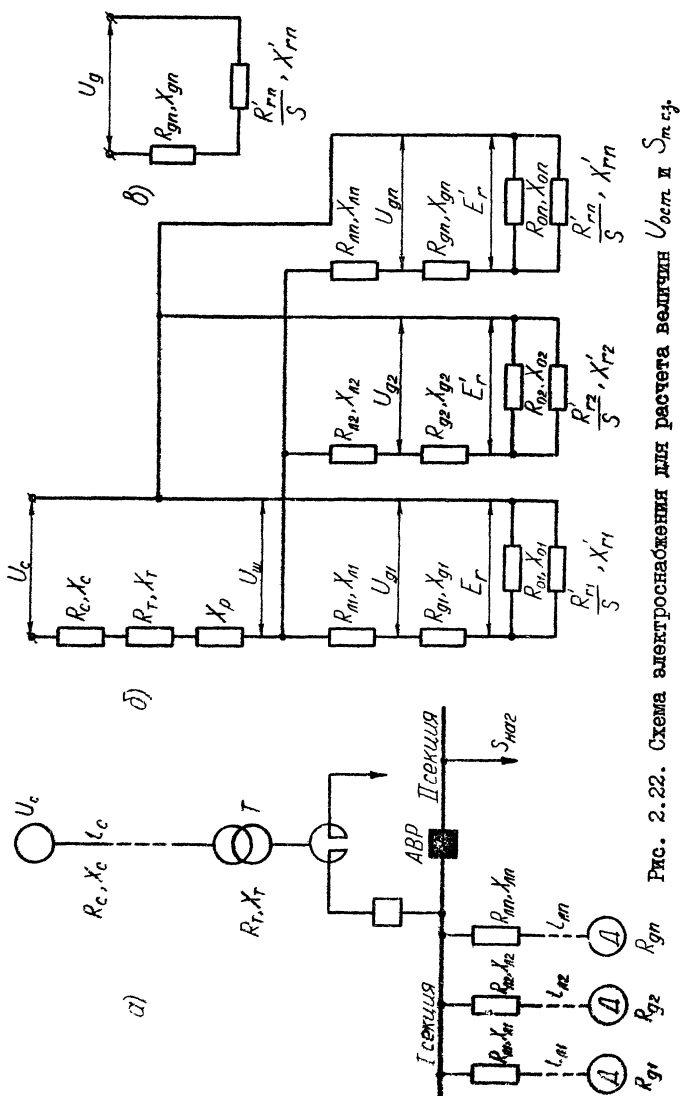


Рис. 2.22. Схема электроснабжения для расчета величин  $U_{ост}$  и  $S_{м.с.з.}$



$$\bar{Z}_g = R_1 + jX_1 + \frac{(R_o + jX_o) \left( \frac{R_2'}{S} + jX_2' \right)}{\left( R_o + \frac{R_2'}{S} \right) + j(X_o + X_2')} \quad (2.9)$$

как по величине, так и по фазе зависит только от скольжения.

Причем активное сопротивление двигателя

$$R_g = \operatorname{Re}(\bar{Z}_g) = R_1 + \frac{\frac{R_2' Z_o^2}{S} + R_o (Z_2')^2}{Z_o^2 + (Z_2')^2 + 2 \left( \frac{R_2' R_o}{S} + X_2' X_o \right)}, \quad (2.10)$$

а индуктивное

$$X_g = \operatorname{Im}(\bar{Z}_g) = X_1 + \frac{X_2' Z_o^2 + X_o (Z_2')^2}{Z_o^2 + (Z_2')^2 + 2 \left( \frac{R_2' R_o}{S} + X_2' X_o \right)}, \quad (2.11)$$

где

$$Z_2' = \sqrt{\left( \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_2')^2}, \quad Z_o = \sqrt{R_o^2 + X_o^2}.$$

При изменении скольжения от  $S = 1$  до  $S = S_k$  влиянием сопротивления намагничивающей цепи при расчетах самозапуска двигателей можно пренебречь, тогда схема замещения единичного двигателя упрощается (рис. 2.22, в).

С учетом этого допущения полное сопротивление двигателя

$$\bar{Z}_g = \left( \frac{C_1 R_2'}{S} + R_{1g} \right) + j(C_1 X_2' + X_{1g}), \quad (2.12)$$

где

$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_o} \approx 1 + \frac{X_1}{X_o}.$$

С достаточной степенью точности в расчетах можно принимать  $C_1 \approx 1,03$ .

Ток статора двигателя  $I_1$ , будет равен приведенному току ротора

$$I_2' = I_1 \frac{Z_o}{Z_o + Z_2'} \approx I_1, \quad (2.13)$$

так как обычно  $Z_0 \gg Z_2'$  и током намагничивания пренебрегают.

Напряжение на выводах единичного двигателя в момент включения

$$U_g = U_c \frac{Z_g}{Z_g + Z_A + \chi_p + Z_r + Z_c} \quad (2.14)$$

Напряжение на шинах при включении единичного двигателя

$$U_{ш} = U_c \frac{Z_g + Z_A}{Z_g + Z_A + \chi_p + Z_r + Z_c} \quad (2.15)$$

Мы рассмотрели процесс самозапуска одного двигателя, но так как, в основном, всегда осуществляется самозапуск группы двигателей, то в выражениях (2.14 и 2.15) необходимо учитывать суммарное сопротивление двигателей  $Z_{gx}$  с учетом их текущего скольжения. Скольжение можно определить по характеристикам выбега агрегатов, если они имеются, или с достаточной степенью точности по формуле

$$S = S_y + \frac{m_r t_s}{T_j}, \quad (2.16)$$

где  $m_r$  — тормозной момент;

$S_y$  — скольжение в установившемся (рабочем) режиме.

Тогда формулы для определения  $U_{ш}$  и  $U_g$  примут вид

$$U_{ш} = U_c \frac{Z_{gx} + Z_{Ax}}{Z_{gx} + Z_{Ax} + \chi_p + Z_r + Z_c}, \quad (2.17)$$

$$U_g = U_{ш} \frac{Z_g}{Z_g + Z_A} \quad (2.18)$$

При самозапуске двигателей от предварительно нагруженного источника питания (например, самозапуск осуществляется после срабатывания АВР секции) расчет остаточного напряжения, как на выводах отдельных двигателей, так и на шинах секции необходимо проводить с учетом сопротивления нагрузки (рис. 2.22).

В этом случае формула (2.17) примет вид

$$U_{ш} = U_c \frac{(Z_{gx} + Z_{Ax}) \parallel Z_H}{Z_c + Z_r + \chi_p + (Z_{gx} + Z_{Ax}) \parallel Z_H} \quad (2.19)$$

Наиболее тяжелым режимом является самозапуск после группово-

го выбега двигателей одинаковых механизмов, протекающего как индивидуальный выбег. С учетом характера изменения сопротивления и кратности тока двигателя в зависимости от времени выбега при существующих длительностях бестоковой паузы (рис. 2.23), обусловленной срабатыванием схем защит и автоматики, токи самозапуска при повторном включении двигателей будут близки к пусковым. Это положение во многих случаях существенно упрощает задачу расчета остаточных напряжений и позволяет при расчетах режимов самозапуска в любой точке сети считать сопротивления двигателей равными пусковым. Расчеты удобнее проводить в относительных единицах (о.е.), приведенных к базисным условиям, причем за базисные величины принимается мощность питающего трансформатора и номинальное напряжение на шинах —  $S_T$ ,  $U_H$ .

Из рис. 2.22 имеем

$$U_c = U_H \left( 1 + \frac{Z_c + Z_T + Z_P}{Z_H} \right). \quad (2.20)$$

Тогда из выражения (2.19) получаем

$$U_{*H} = U_c \frac{1}{1 + Z_{\theta H} \left( \frac{1}{Z_{*Z}} + \frac{1}{Z_{*H}} \right)}, \quad (2.21)$$

где  $Z_{\theta H} = Z_{*c} + Z_{*T} + Z_{*P}$  — внешнее сопротивление до рассматриваемых шин;

$Z_{*Z} = Z_{gZ} + Z_{л.З}$  — сопротивление самозапускаемой нагрузки.

Если принять, что условная нагрузка в относительных единицах равна

$$S_{*H} = \frac{S_H}{S_{\sigma}} = \frac{S_H}{S_T} = \frac{1}{Z_{*H}},$$

а условная самозапускаемая мощность  $S_{*Z} = 1/Z_{*Z}$ , то тогда остаточное напряжение на шинах

$$U_{*H} = U_c \frac{1}{1 + Z_{\theta H} (S_{*Z} + S_{*H})}. \quad (2.22)$$

Остаточное же напряжение на выводах рассматриваемого двигателя при самозапуске будет равно

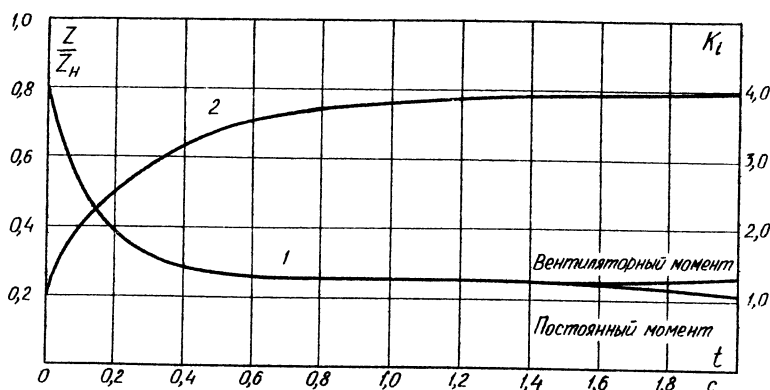


Рис. 2.23. Кривые изменения сопротивления (1) и кратности тока двигателя (2) в зависимости от времени при входе.

$$*_g = \frac{U_{*g} Z_g}{Z_g + Z_n} = \frac{U_c Z_g}{(Z_g + Z_n) [1 + Z_{*n} (S_{*j} + S_n)]}, \quad (2.23)$$

где  $Z_n$  — сопротивление линии от шин до выводов рассматриваемого двигателя, в о.е.;

$S_{*g} = 1/Z_g$  — условная мощность рассматриваемого двигателя при самозапуске.

Если по нормируемому минимально допустимому остаточному напряжению необходимо определить предельную мощность самозапускаемых двигателей, то из выражения (2.22) получим

$$S_{*j} = \frac{1 - U_{*ост}}{U_{*ост} Z_{*n}} - S_n. \quad (2.24)$$

При самозапуске электродвигателей от ненагруженного источника питания (например, АПВ трансформатора, шин, линии) величина максимально допустимой мощности самозапускаемых двигателей определится из выражения

$$S_{*j} = \left( \frac{1,05}{U_{*ост}} - 1 \right) \frac{1}{Z_{*n}}. \quad (2.25)$$

В формуле 2.25 величина базисного напряжения принята 1,05,<sup>1</sup> так как в методике, в основном, рассматривается самозапуск двигателей от цехового трансформатора, а эта величина определяет его напряжение холостого хода.

## 2.9. Определение критерия максимально возможной суммарной мощности самозапускаемых двигателей в зависимости от применяемых способов обеспечения самозапуска

Эффективное использование того или иного способа самозапуска двигателей напряжением до 1000 В, в конечном итоге, зависит от допустимой загрузки источника питания (например, цехового трансформатора) токами самозапускаемых двигателей. Предельно допустимую мощность источника питания при самозапуске двигателей, способную обеспечить необходимое остаточное напряжение, назовем —  $S_{м.с.з.}$ .

Каждый из существующих способов обеспечения самозапуска имеет свое критическое остаточное напряжение  $U_{ост}$ . Так при использовании способа АПВ двигателей, при восстановлении напряжения сети, величина  $U_{ост}$  будет зависеть от вида коммутирующего ключа, применяемого в устройствах способа.

При использовании в качестве вышеуказанного ключа контактов электромеханических или герконовых реле уровень  $U_{ост}$  должен быть не менее  $0,8 U_n$ , определяемого напряжением втягивания  $U_{ср}$  катушки управления контактора (МП). В случае же применения в качестве ключа управляемого диода (тиристора), что получило преимущественное распространение в настоящее время,  $U_{ср}$  возрастает до  $0,9 U_n$  из-за питания катушки выпрямленным однополупериодным током.

Правда, несмотря на ряд технико-экономических недостатков группового АПВ, на что уже указывалось выше, применение ступенчатого группового АПВ позволяет поднять уровень  $S_{м.с.з.}$ . В этом случае тоже играет определенную роль фактор используемого коммутирующего ключа, но определяющим выступает сложность и инерционность технологического процесса. Ступенчатое групповое АПВ позволяет повысить  $S_{м.с.з.}$ , по сравнению с индивидуальным АПВ, в 1,5 + 2 раза.

Наиболее перспективным решением при пассивных способах самозапуска двигателей является применение каскадного АПВ по уровню восстанавливающегося напряжения. В этом случае предел расширения

$S_{м.с.з}$  непосредственно зависит от длительности бестоковой паузы системы электроснабжения  $t_{\delta n}$

$$t_{с.з} = t_{кр} - t_{\delta n}, \quad (2.26)$$

где  $t_{с.з}$  - время, отпущенное автоматикой в схемах электроснабжения на разворот ответственных двигателей рассматриваемого технологического процесса. Это время является одним из важнейших факторов, влияющих на максимальную загрузку источника питания при высоких напряжениях включения самозапускаемых ответственных двигателей.

Способы активного воздействия на якоря коммутационных аппаратов в бестоковую паузу системы электроснабжения позволяют наиболее полно использовать источник питания при самозапуске двигателей. При их применении  $S_{м.с.з}$  уже не зависит от напряжения срабатывания  $U_{сб}$  контакторов (МП), а всецело определяется уровнем напряжения "Опрокидывания" двигателей, которое может быть определено аналитически.

Для асинхронных двигателей нарушение устойчивости ("опрокидывание" двигателя) происходит при

$$U_{кр} = U_H \sqrt{\frac{m_c K_2}{\beta_m}}, \quad (2.27)$$

где  $K_2$  - коэффициент загрузки электродвигателя;  
 $\beta_m$  - кратность максимального вращающего момента.

Для синхронных двигателей критическое напряжение, при котором происходит выпадение двигателя из синхронизма, определяется из формулы мощности

$$U_{кр} = \frac{K_2 P_X}{E}, \quad (2.28)$$

где  $E, X$  - э.д.с. и реактивное сопротивление СД в установившемся или переходном режиме,

$$E = \sqrt{\left( U_o + \frac{Q_o X}{U_o} \right)^2 + \left( \frac{P_o X}{U_o} \right)^2}, \quad (2.29)$$

где  $U_o$  - напряжение на шинах;  
 $P_o, Q_o$  - активная и реактивная мощности предшествующего режима, определяемые выражениями

$$P_o = K_2 P_H, \quad Q_o = P_o \operatorname{tg} \varphi.$$

Зависимость критического напряжения  $U_{кр}$  от типа и загрузки двигателей показана на рис. 2.24.

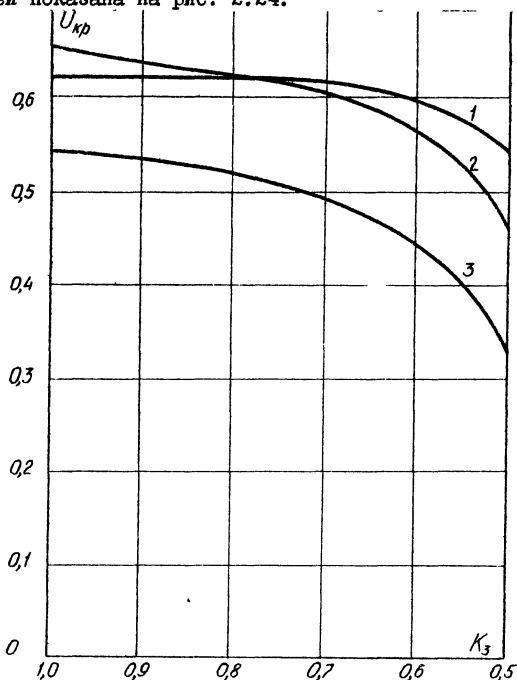


Рис. 2.24. Зависимость критического напряжения от коэффициента загрузки двигателей: 1 - для асинхронных двигателей 6 кВ; 2 - для двигателей 0,4 кВ; 3 - для синхронных двигателей 6 кВ.

В предыдущем параграфе подчеркивалось, что практически приходится сталкиваться с двумя различными состояниями источника питания при самозапуске двигателей:

- самозапуск двигателей от ненагруженного трансформатора;
- самозапуск двигателей от предварительно загруженного трансформатора.

Исходя из этих условий режима получены зависимости, определяющие предельно допустимую мощность источника питания при самозапуске двигателей

$$S_{мз} = \frac{1}{K_{тп}} \left( \frac{105}{U_{осм}} - 1 \right) \cdot \quad (2.30)$$

$$S_{m.c.з} = \frac{1}{X_{rp}} \left( \frac{U_c}{U_{ocm}} - 1 \right) S_H. \quad (2.31)$$

Если принять в выражениях (2.30 и 2.31)

$$X_{rp} = \frac{U_k \% S_\delta}{100 S_\delta},$$

где  $U_k = 5,5\%$  — для цеховых трансформаторов, то можно получить зависимость  $S_{m.c.з} = f(U_{ocm})$  (рис. 2.25). При этом построение кривых необходимо проводить с учетом, что на высокой стороне трансформатора питающее напряжение отлично от номинального за счет самозапуска высоковольтных двигателей.

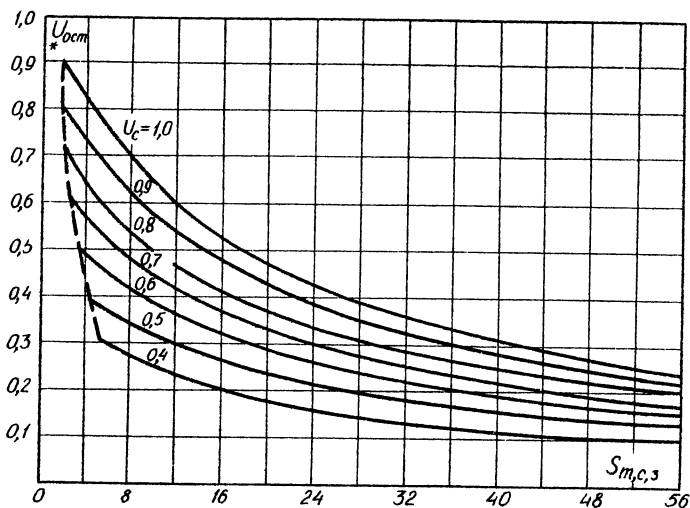


Рис. 2.25. Зависимость относительной максимально допустимой самозапускаемой мощности от уровня остаточного напряжения, обусловленного напряжением сети.

Полученные зависимости являются критерием максимально возможной суммарной мощности самозапускаемых двигателей в зависимости от использования способов обеспечения самозапуска.



Анализ этих зависимостей показывает, что при использовании для целей самозапуска двигателей напряжением до 1000 В активных способов воздействия на якоря коммутационных аппаратов в бестоковую паузу наблюдается дефицит установленной мощности цеховых трансформаторов. Другими словами, встает проблема "расширения" этой мощности. Эта проблема может быть решена двумя путями: установкой более мощных трансформаторов, что явно неэкономично для народного хозяйства, или искусственным повышением вращающих моментов АД в режимах самозапуска.

Второй путь "расширения" установленной мощности цехового трансформатора в режимах самозапуска посредством искусственного повышения крутящих моментов АД является более перспективным, поэтому исходя из этого направления и поставлены наши дальнейшие исследования.

## 2.10. Устройство активного воздействия на якорь контактора (МП) в бестоковую паузу

Как уже отмечалось выше, способы активного воздействия на якоря коммутационных аппаратов в бестоковую паузу системы электроснабжения имеют целый ряд технико-экономических преимуществ.

Принципиальная схема устройства приведена на рис. 2.26. Схема содержит: генератор импульсов на микросхеме  $D1$  серии К176ЛА7; транзисторный ключ на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , включенных по составной схеме; задатчик времени удержания на транзисторе  $VT3$ , конденсаторе  $C3$  и резисторе  $R5$ ; два стабилизированных источника питания на конденсаторах  $C1$  и  $C5$ , служащих, соответственно, для питания катушки пускателя и микросхемы (генератора); узел контроля напряжения сети на динисторе  $VD6$  и задания начала отсчета времени удержания; мостовой выпрямитель питания устройства на диодах  $VD2 + VD5$ . Работает схема следующим образом.

При нажатии кнопки  $S2$  "Пуск" катушка К пускателя получает питание от диодного моста  $VD2 + VD5$ . Пускатель срабатывает, через контакт К схема получает питание. Динистор  $VD6$  открывается в моменты достижения мгновенного значения выпрямленного напряжения сети напряжения включения динистора. Выпрямленное напряжение сети прикладывается к динистору  $VD6$  через резисторы  $R1$  и  $R2$ . После открытия динистора происходит заряд конденсаторов питания  $C1$  и  $C2$  по цепи: плюс диодного моста -  $C1$  - диод  $VD8$  -  $C2$  - диод  $VD9$  - динистор  $VD6$  - резистор  $R1$  - контакт К - минус диодного моста.

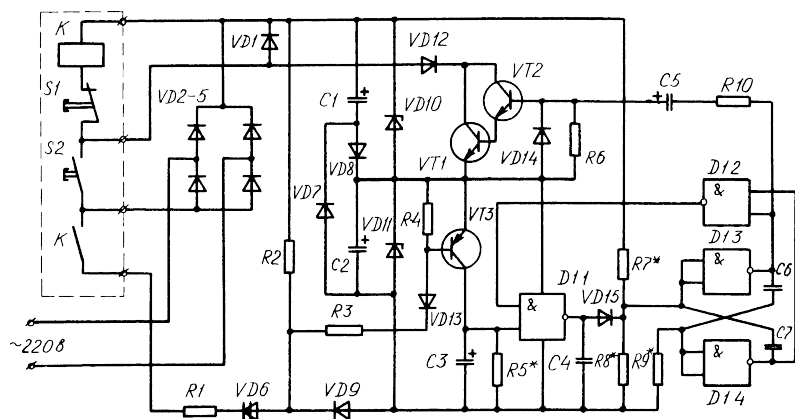


Рис. 2.26. Принципиальная схема устройства УАВ-I.

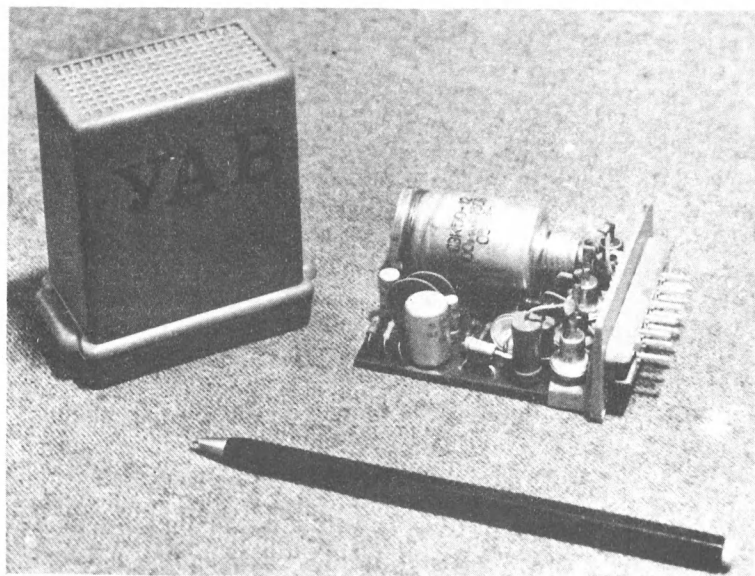


Рис. 2.27. Внешний вид устройства УАВ-I

Работа устройства определяется моментом начала работы генератора или моментом достижения напряжения на конденсаторе С2 требуемой величины. Генератор начинает работать при напряжении на С2 порядка 5 + 6 В. От момента нажатия кнопки "Пуск" до момента начала работы генератора требуется ее удержание. Необходимое время удержания кнопки "Пуск" составляет

$$t_{yg} \approx R_1 C_2 \frac{U_{min.c2}}{U_{g.cb} - (0,2 \div 0,3) U_{max.c1}} \quad (2.32)$$

где  $U_{min.c2}$  — минимальное напряжение на С2, при котором начинает работать генератор;

$U_{g.cb}$  — среднее значение выпрямленного диодным мостом напряжения питания;

$U_{max.c1}$  — напряжение стабилизации стабилитрона VD 10 или максимальное напряжение на С1;

(0,2 : 0,3) — степень заряда конденсатора С1 к моменту начала работы генератора.

Минимальное время удержания кнопки "Пуск" нажатой при параметрах  $R1 = 6,8 \text{ кОм}$  и  $C2 = 200 \text{ мкФ}$  схемы составляет 0,1 с.

После отпускания кнопки S 2 "Пуск" ток в катушке пускателя создается импульсным разрядом конденсатора С1 по цепи: плюс конденсатора С1 — катушка К — диод VD 12 — транзистор VT1 — конденсатор С2 — диод VD 7 — минус конденсатора С1. При закрытом транзисторе VT1 ток в катушке замыкается через диод VD 1. Диод VD 12 защищает транзисторы VT1 и VT2 от подачи на них обратного напряжения с моста при нажатой кнопке "Пуск". Существенно важным при работе устройства в режиме удержания пускателя с помощью энергии конденсатора С1 является то, что происходит импульсный подзаряд конденсатора С2, как видно из приведенного выше, по цепи разряда конденсатора С1. Этим достигается постоянство напряжения питания микросхемы и, следовательно, полная независимость частоты генератора от напряжения питания его.

Собственно генератор импульсов собран на элементах D 1.3 и D 1.4 микросхемы, охваченных перекрестными обратными связями на элементах R 9, C 6 и R 8, C 7. Величиной резистора R 9 определяется длительность выходного положительного импульса генератора, который снимается с выхода элемента D 1.3. Частота следования импульсов определяется величиной сопротивления резистора R 8 и сигналом обратной связи по напряжению на времязадающем конден-

саторе С1, поступающем через резистор  $R7$ . В данной схеме частота генератора практически обратно пропорциональна напряжению на конденсаторе С1. Этим обеспечивается постоянство тока в катушке пускателя при разряде на нее конденсатора С1.

Положительные импульсы с выхода генератора поступают через дифференцирующую цепь на резисторе  $R10$  и конденсаторе С5 на базу транзистора VT2 ключа, вызывая его открытие. После окончания действия импульса на выходе дифференцирующей цепи возникает отрицательный сигнал, который замыкается через диод VD14.

На элементах D1.1 и D1.2 реализована схема предотвращения срыва работы генератора. Срыв генератора наступает при одновременном заряде конденсаторов С6 и С7. Если произошел срыв генератора, то при наличии единичного сигнала на входе элемента D1.1 с конденсатором С3 устранение срыва происходит следующим образом. При срыве генератора на выходах элементов D1.3 и D1.4 присутствуют единичные сигналы, которые, поступая на D1.2, вызывают появление на его выходе нулевого сигнала. Нулевой и единичный сигналы по входу D1.1 вызывают появление на его выходе единичного сигнала, который через диод VD15 поступает на вход D1.3. Элемент D1.3 устанавливается при этом в нулевое состояние, что является выходом генератора из срыва в режим генерации. Конденсатором С4 производится гашение импульсных помех, возникающих на выходе D1.1 при нормальной работе генератора. Появление этих помех обусловлено неидеальностью элементов микросхем, а именно — конечным временем (не мгновенно) смены состояний элементов D1.3 и D1.4.

Задание выдержки времени удержания пускателя осуществляется транзистором VT3, конденсатором С3 и резистором R5. Если динистор VD6 периодически включается, то через резистор R3 и диод VD13 открывается периодически транзистор VT3. Через транзистор VT3 периодически подзаряжается конденсатор С3, чем обеспечивается поддержание по входу D1.1, подключенному к этому конденсатору, единичного сигнала. При снижении напряжения сети до уровня, при котором не происходит включение динистора VD6, транзистор VT3 оказывается постоянно закрытым и подзаряда конденсатора С3 не происходит. Тогда конденсатор С3 разряжается на резистор R5 и при снижении напряжения на нем до уровня, соответствующего нулевому сигналу на входе элемента D1.1, этот элемент принимает единичное состояние. В итоге, единичным сигналом D1.1 через диод VD15 блокируется работа генератора на элементах D1.3 и D1.4,

что вызывает прекращение работы транзисторного ключа и отключение пускателя.

Работа устройства в режиме выдержки времени удержания пускателя происходит следующим образом. При снижении напряжения сети до уровня уставки, задаваемой динистором  $VD\ 6$ , происходит его закрытие. Напряжение на конденсаторе  $CI$ , лишенном подзаряда от сети, начинает уменьшаться. Благодаря цепи обратной связи (резистор  $R7$ ) увеличивается частота генератора, чем обеспечивается постоянство тока в катушке  $K$ . Происходит импульсный подзаряд конденсатора  $C2$  питания генератора. По истечении заданного времени удержания, определяемого постоянной времени разряда конденсатора  $C3$  на резистор  $R5$ , блокируется работа генератора, и пускатель отключается.

Отключение пускателя без выдержки времени производится кнопкой  $SI$  "Стоп".

Таким образом, предлагаемое устройство обеспечивает более эффективное использование энергии предварительно заряженного конденсатора, значительно снижает потребление мощности управления из сети, а также обеспечивает высокую стабильность выдержки времени отпадания якорей магнитных пускателей, так как выдержка времени не зависит от характера изменения напряжения источника питания.

Устройство было создано по заказу предприятия Сибхимпром-энерго и передано для изготовления и широкого внедрения. Конструктивно оно оформлено в виде приставки (рис. 2.27), что создает определенные удобства в эксплуатации, практически не зависит от напряжения штатной катушки управления. У последних экземпляров устройств потребляемый ток снижен почти в 20 раз. Емкость времязадающего предварительно заряженного конденсатора  $CI$  в 16 раз меньше емкости конденсатора  $CI$  устройства с непрерывной стабилизацией тока в катушке контактора (рис. 2.16) и в 25 раз меньше емкости конденсатора  $CI$  устройства с дополнительной катушкой (рис. 2.15).

Первая модификация устройства получила название УАВ-1: устройство активного воздействия на якорь контактора (МП) в бестоковую паузу системы электроснабжения. На устройство получено авторское свидетельство на изобретение, оно успешно прошло промышленную апробацию, и по заказу Кемеровского предприятия "Сибхимпром-энерго" кафедра Электрооборудования Кемеровского технологического института в 1985 году приступила к изготовлению устройств.

## Г л а в а   т р е т ь я

## САМОЗАПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

## 3.1. Общие положения

Широкое применение сетевой автоматики (АПВ и АВР) в системах электроснабжения современных промышленных предприятий позволило существенно сократить длительность перерывов питания приемников электрической энергии, сделать перерывы питания кратковременными, находящимися обычно в пределах 0,5 – 5,0 с. Это в какой-то мере повысило надежность бесперебойного снабжения электрической энергией промышленных потребителей, но и, в свою очередь, поставило ряд задач, требующих теоретического и практического решений.

Наиболее сложной и эффективной из них явилась задача самозапуска двигателей, суть которой заключается в том, что на промышленных предприятиях отказались от необоснованного массового отключения двигателей при кратковременных исчезновениях (глубоких понижениях) напряжения в питающей сети и при его восстановлении, чем во многих случаях предотвращается нарушение технологического процесса и повышается надежность электроснабжения промышленных предприятий.

Самозапуск двигателей особенно важен для промышленных установок, в которых остановка механизмов сопряжена с длительным расстройством технологического процесса, опасностью для жизни людей и большим материальным ущербом. К таким установкам, прежде всего, можно отнести вентиляционные и насосные агрегаты шахт, весь комплекс химических и нефтехимических заводов, нефтедобывающие установки и др.

Однако самозапуск целесообразен и для менее ответственных установок, остановка которых приводит к экономическому ущербу, некоторому ухудшению безопасности. Такое положение объясняется тем, что при внезапной остановке электродвигателей большинства технологических машин, механизмов и установок, при отсутствии самозапуска длительность простоя во много раз превышает длительность нарушения электроснабжения. Это связано с рядом организационно-технических шагов и действий, которые необходимы при восстановлении нормального технологического процесса производства.

Указанная постановка вопроса значительно расширяет область применения самозапуска и позволяет выделить обеспеченность этих

режимов в отдельстоящую проблему. Несмотря на то, что решением этой проблемы занимаются ведущие предприятия нашей страны: ГПИ "Тяжпромэлектропроект", ГИАП, трест Энергочермет, п/о "Союзхим-промэнерго", ВНИИЭ, МЭИ и др., которые проводят большую методическую и практическую работу по обеспечению самозапуска ряда механизмов, нельзя сказать о полной обеспеченности самозапуска двигателей. Связано это, как нам думается, с тем, что до сих пор отсутствует предприятие, организация или министерство, в прямые обязанности которого были бы внесены эти вопросы. Необходимо объединить большой накопленный опыт и вынести решение проблемы самозапуска двигателей на промышленных предприятиях на стадию внедрения в производство.

Считают, что при применении быстродействующей защиты исключается надобность в защите минимального напряжения. В этом случае практически все двигатели сохраняются в работе и отпадает необходимость отключения части из них. Это относится и к случаю, когда общее время бестоковой паузы не превышает 0,2 - 0,4 с при работе автоматических устройств АПВ и АВР.

Многочисленными исследованиями подтверждено, что самозапуск асинхронных двигателей с КЗ ротором, как индивидуальный, так и групповой, не вызывает особых трудностей.

Однако, несмотря на данную апробацию в системах собственных нужд электрических станций, режимы самозапуска до сих пор не нашли инженерного аналитического решения. Это объясняется тем, что продолжительность самозапуска двигателей во многом зависит от особенностей самих двигателей, приводимых механизмов, типа котлов и вида используемого топлива, а также от схем первичных соединений источников питания. Учет всех перечисленных факторов в процессе выбега и самозапуска очень затруднителен, а обобщение тех или иных параметров вносит в расчеты существенную погрешность, поэтому, как правило, обязательно проводится экспериментальная проверка обеспеченности самозапуска двигателей собственных нужд для каждой электрической станции.

Примерно такие же факторы накладываются на режим самозапуска и на промышленных предприятиях, причем анализ режимов даже усложнен из-за наличия параллельно включенных синхронных двигателей и батарей статических конденсаторов. Но, несмотря на сложные аналитические решения, самозапуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором обеспечивается, в ряде случаев, только настрой-

кой релейной защиты и автоматики.

Большой интерес представляет самозапуск асинхронных двигателей с фазным ротором, поскольку они не рассчитаны на пуск от полного напряжения сети с выведенным реостатом. Однако, из практики эксплуатации известны случаи успешного применения прямого пуска асинхронных двигателей с фазным ротором и наоборот, когда пуск двигателей без реостата в цепи ротора происходит в тяжелых условиях или же вообще невозможен.

Двигатели с фазным ротором широко применяются в металлургии, химии и других отраслях промышленности. В США, например, эти двигатели используются на электрических станциях в качестве привода вентиляторов и дымососов для повышения их к.п.д.

Поскольку такие двигатели обычно имеют ослабленное крепление лобовых частей обмоток ротора и статора, то самозапуск с замкнутыми кольцами может быть применен крайне редко и, как правило, требуется дополнительное усиление этих креплений, а вероятность включения в противофазу выбегающего двигателя вынуждает устанавливать время бестоковой паузы не менее 1 с.

В связи с изложенным нами выше была поставлена задача разработки таких способов обеспечения самозапуска синхронных двигателей, которые бы позволили практически решить эту проблему.

Все высоковольтные СД по техническим условиям их эксплуатации при ограничении на нагрев демпферной пусковой обмотки допускают один пуск из горячего состояния или два пуска с интервалами до нескольких минут из холодного состояния. Отсюда следует более высокие по сравнению с АД требования к проведению процесса самозапуска СД, так как в случае его срыва последующий пуск двигателя возможен только после полного охлаждения обмоток в течение длительного времени.

Процесс самозапуска СД включает не только разгон под действием асинхронного момента обмоток демпферной и возбуждения, но и синхронизацию с момента подачи постоянного напряжения возбуждения. Процессу самозапуска предшествует гашение магнитного поля обмотки возбуждения с целью ограничения ударных токов и момента при повторном включении (как исключение, гашения поля можно не производить при большом сопротивлении сети) [3, 13, 17]. Проведение этапов самозапуска не требуется для двигателей, не выпавших из синхронизма. Средством удержания СД в синхронизме является форсировка напряжения возбуждения [3, 17, 18]. Допустимое, по условию



невпадения из синхронизма двигателя, время нарушения питания зависит от электрохимической постоянной времени  $T_j$  привода и сопротивления сети или напряжения сети в процессе самозапуска (рис. 3.1) [13].

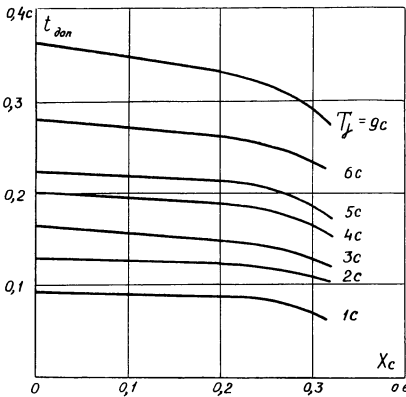


Рис. 3.1. Зависимость допустимого времени отключения близкого короткого замыкания быстродействующей защитой, при котором сохраняется устойчивая работа номинально нагруженного СД от сопротивления сети  $X_c$  и постоянной времени агрегата  $T_j$ .

Способ проведения процесса самозапуска определяется прежде всего механическими характеристиками двигателя. Эксплуатируемые в промышленности СД обладают значениями пускового момента, от которого зависит успешность разгона двигателя, при замкнутой на активное сопротивление обмотке возбуждения и входного момента, определяющего синхронизирующие свойства СД, при скольжении 0,05 и замкнутой накоротко обмотке возбуждения, большими или меньшими номинального. Как правило, большие номинального значения моментов имеют быстроходные неявнополюсные двигатели типов СТД, СТМ, СДС, СДН и др., меньшие номинального — тихоходные явнополюсные (с числом пар полюсов более  $5 + 6$ ) двигатели типов ДСК, СЛК, СЛК2, СЛМ и др. [13, 17]. В связи с неблагоприятными характеристиками (пониженными значениями) асинхронного момента самозапуск тихоходных СД наиболее сложен [3, 13, 14].

Среди способов управления разгоном и синхронизацией при самозапуске СД в настоящее время для практического применения предпочтительными являются способы, основанные на управлении по цепи обмотки возбуждения в функции угла  $\theta$  двигателя, равного углу

между магнитными полями статора и ротора или продольной осью обмотки возбуждения [14,15,16]. В проблеме самозапуска тихоходных СД под нагрузкой с применением управлений по цепи обмотки возбуждения имеется ряд неиспользованных вопросов, что сдерживает его внедрение в промышленность. Среди них прежде всего – определение и техническая реализация управлений, при которых двигателем развивается максимальный электромагнитный момент во всем рабочем диапазоне скольжений. Недостаточность входного момента создает трудности в обеспечении вхождения двигателя в синхронизм под нагрузкой. Практика самозапуска СД требует при реализации управлений использовать устройства измерения угла  $\theta$  способом, исключающим подсоединение к валу привода. Важна также организация управления возбуждением СД с целью удержания его в синхронизме, а для выпавшего из синхронизма необходимо наиболее быстрое гашение поля обмотки возбуждения с целью сокращения времени перерыва питания. Поэтому необходима разработка новых способов и технических средств самозапуска СД под нагрузкой.

### 3.2. Удержание двигателя в синхронизме при кратковременных нарушениях питания

При нарушениях питания СД в первую очередь предпринимаются действия по удержанию его в синхронизме, сводящиеся к подаче форсированного возбуждения [12,17,18]. Введение форсировки производится в функции уровня напряжения на статоре двигателя: при снижении напряжения до  $(0,8 + 0,85) U_n$  форсировка вводится на время  $20 + 50$  с, а при снижении напряжения менее  $0,4 U_n$  действие форсировки прекращается спустя наперед заданное время  $0,2 + 0,3$  с [17,18].

С точки зрения сохранения СД в синхронизме время действия форсировки равно времени возрастания внутреннего угла  $\theta$  до критического значения  $\theta_{кр}$ . Величина  $\theta_{кр}$ , определяемая известным способом площадей [12], непосредственно зависит от значения синхронного момента при выбеге. Принято считать синхронный электромагнитный момент прямо пропорциональным величине остаточного напряжения на статоре СД, что служит обоснованием применения форсировки возбуждения в функции напряжения на статоре [12]. При этом знак момента не учитывается. Между тем знак электромагнитного момента при выбеге определяется режимом работы СД – генератор-

ным или двигательным. Очевидно, что в двигательном режиме при ускоряющем (положительном) моменте нужно форсировать возбуждение, а в генераторном режиме при тормозящем (отрицательном) моменте — гасить поле обмотки возбуждения. Указанные режимы определяются, например, местом короткого замыкания в сети.

На рис.3.2 приведена схема электроснабжения одного из производств Кемеровского ПО "Азот", для которой произведен анализ коротких замыканий в точках К1 + К6 на выбег одного из СД системы.

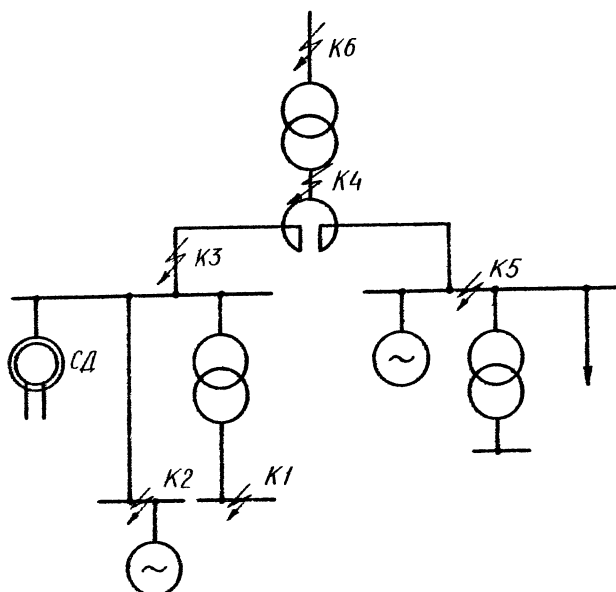


Рис. 3.2. Пример для оценки эффективности форсировки возбуждения СД в типовой схеме электроснабжения.

Все короткие замыкания в этой схеме по отношению к выделенному СД либо отсекают его от питания (точки К3, К4, К6), либо оставляют его в работе параллельно с сетью (точки К1, К2, К5) с пониженным напряжением. Для этой схемы проведено исследование режимов выбега СД типа ДСКП-260/24-36 с номинальным и форсированным в 1,5 раза возбуждением и с гашением поля обмотки возбуждения на активное сопротивление. При коротких замыканиях в точках К2 и К3 с низким

уровнем остаточного напряжения, равном, соответственно,  $0,26 U_H$  и  $0,15 U_H$  влияние форсировки возбуждения прямо противоположно (рис. 3.3). Если двигатель продолжает работать параллельно с сетью, что имеет место при коротком замыкании в точке К2, то форсировка возбуждения способствует сохранению угла  $\theta$ . Электромагнитный момент в этом случае является знакопеременным, причем вначале после затухания апериодической составляющей (в течение  $0,04$  с) — всегда положительный (рис. 3.3). Если же короткое замыкание произошло со стороны источника питания (точка К3), то двигатель также спустя время затухания апериодической составляющей момента переходит в генераторный режим с знакостоянным отрицательным моментом (рис. 3.3). Подача форсированного возбуждения

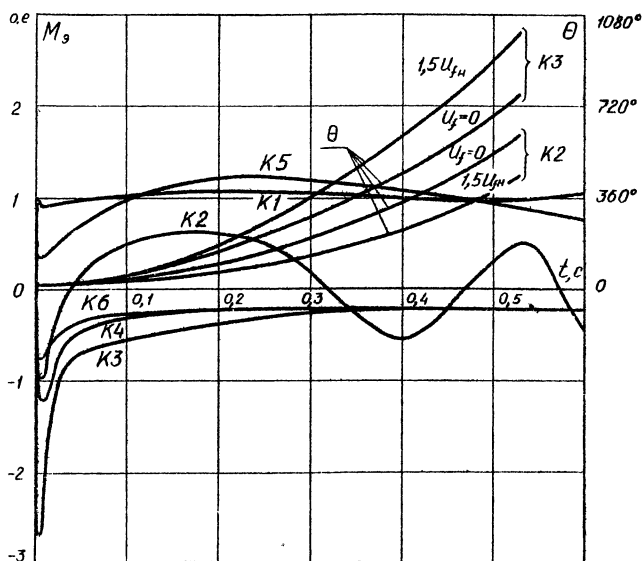


Рис. 3.3. Зависимость изменения во времени среднего значения электромагнитного момента СД и угла нагрузки  $\theta$  от точки короткого замыкания в сети.

только ускоряет торможение СД, сокращая время достижения критического угла  $\theta$  (рис. 3.3). Подобные закономерности имеют место при коротких замыканиях в других точках сети.

Мгновенное значение момента СД при пренебрежении активным сопротивлением статора определяется через мгновенные значения линейных токов и напряжений

$$M = \frac{2}{3} (i_B u_{BC} + i_A u_{AC}). \quad (3.1)$$

Функциональная схема устройства управления форсировкой в функции электромагнитного момента приведена на рис. 3.4. Блок I содержит измерительные трансформаторы токов  $i_A$ ,  $i_B$  и напряжений  $u_{BC}$ ,  $u_{AC}$ . В блоке 2 формируется по выражению (3.1) сигнал момента  $M$ , который после прохождения РС-фильтра нижних частот 3, которым выделяется среднее значение момента  $M_{cp}$ , поступает на дифференциатор 4, осуществляющий дискретное дифференцирование сигнала  $M_{cp}$ . В схему входят три триггера Шмитта ТШ, элемент задержки

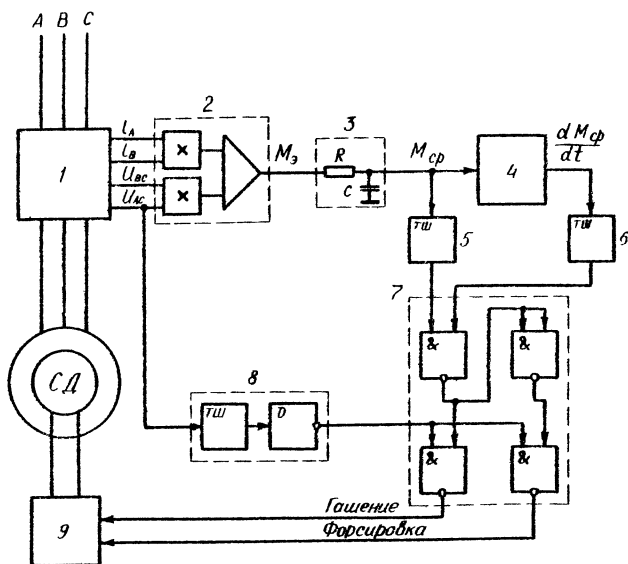


Рис. 3.4. Способ управления форсировкой возбуждения СД в функции электромагнитного момента.

жки  $D$ , блок логики 7 и возбудитель 9. Работает схема следующим образом. При уменьшении напряжения сети ниже заданного уровня (обычно  $0,8 \div 0,85 U_n$ ), контролируемого блоком 8, на его выходе с задержкой, равной времени затухания аperiodической составляющей момента СД, появляется сигнал логической единицы, которым включается в работу блок логики 7. Если среднее значение электромагнитного момента  $M_{ср}$  положительно и момент  $M_{ср}$  возрастает, то единичными сигналами с триггеров Шмитта 5 и 6, поступающими в блок логики 7, на его выходе появляется нулевой сигнал по выходу "Форсировка". По этому сигналу возбудитель 9 переводится в режим форсированного возбуждения. Если момент  $M_{ср}$  отрицателен или момент  $M_{ср}$  положителен, но убывает, то на выходе "Гашение" появляется нулевой сигнал, которым возбудитель 9 переводится в режим гашения поля обмотки возбуждения СД.

Достоинство управления форсировкой в функции электромагнитного момента в том, что оно более точно соответствует существу сохранения СД в синхронизме по сравнению с управлением в функции напряжения на статоре.

### 3.3. Гашение магнитного поля обмотки возбуждения

Многочисленными исследованиями установлено, что повторное включение выпавшего из синхронизма СД, не сопровождающееся возникновением опасных для него ударных токов и моментов, может быть произведено при условии, если к моменту включения ток обмотки возбуждения, уменьшенный в процессе гашения магнитного поля в ней, составляет не более  $0,5 I_{фн}$  [3, 13, 17]. Показателем эффективности способа гашения магнитного поля является время  $t_r$  гашения его до указанной величины тока возбуждения. При проведении самозапуска СД нужно наиболее быстро погасить поле, что дает возможность провести повторное включение двигателя с максимальной начальной частотой вращения, а это значительно облегчает и упрощает процесс разгона и вхождения в синхронизм и, следовательно, повышает надежность самозапуска.

В настоящее время в статических возбудителях всех типов, выполненных на основе управляемых тиристорных схем выпрямления переменного напряжения, предусмотрено гашение поля переводом выпрямителя в инверторный режим [18]. Этот способ гашения магнитного поля полностью вытеснил способ гашения на разрядное аккumуля-

сопротивление, ранее широко применявшийся в схемах с электромашиным возбудителем. Считается, что гашение поля инвертированием происходит быстрее, чем на сопротивление при том условии, что возбудитель остается под напряжением, составляющем не менее  $0,6 U_H$  [18]. Этот уровень напряжения является предельным, при котором продолжает функционировать система управления возбудителем. Если напряжение на возбудителе оказывается меньше  $0,6 U_H$ , то инвертирование становится невозможным и гашение поля происходит с максимальной постоянной времени, определяемой малыми активными сопротивлениями обмотки возбуждения и питающего трансформатора возбудителя. Время же гашения поля на разрядное сопротивление не зависит от уровня остаточного напряжения питания возбудителя.

Таким образом, эффективность способов гашения магнитного поля инвертированием и на разрядное сопротивление оказывается по-разному зависящей от величины остаточного напряжения на возбудителе. А так как эффективность и надежность самозапуска СД во многом предопределяется эффективностью гашения магнитного поля обмотки возбуждения, то представляется важным и совершенно необходимым при внедрении самозапуска произвести выбор такого способа гашения, при котором достигается наибольшее быстроедействие.

При всех нарушениях питания, когда напряжение на возбудителе оказывается менее  $0,6 U_H$ , всегда гашение поля на сопротивление эффективнее инвертирования. Для случаев, когда остаточное напряжение на возбудителе сохраняется в пределах  $U_{ост} \geq 0,6 U_H$ , выбор более эффективного способа гашения поля произведем на основе сравнения времен гашения до заданных значений тока  $I_{фк}$  возбуждения.

Все нарушения питания СД, при которых остаточное напряжение на возбудителе может быть равно и более  $0,6 U_H$ , относятся к одной из двух групп. В первую группу входят посадки напряжения, вызванные коротким замыканием на отходящих от общих шин линиях, отделенных от рассматриваемого двигателя большими индуктивными сопротивлениями реакторов, трансформаторов и т.д. Выпавший из синхронизма двигатель отключается от сети для гашения поля, возбудитель остается подключенным к шинам с пониженным напряжением. Вторую группу образуют нарушения питания, сопровождаемые действием схем АВР, АПВ, когда шины некоторое время отключены от питания, а СД остаются подключенными к шинам. Выбегавшие СД поддерживают на шинах затухающее напряжение, под которым находятся и возбудители этих СД.

Примем следующие обозначения:

$U_f, i_f$  - напряжение и ток обмотки возбуждения;  
 $U_{fn}, I_{fn}$  - номинальное напряжение и ток обмотки возбуждения;  
 $R_f$  - активное сопротивление обмотки возбуждения;  
 $L_{fs}$  - индуктивность обмотки возбуждения, определенная с учетом сопротивлений статорной цепи СД;  
 $K_r = R_r/R_f$  - кратность сопротивления разрядного сопротивления  $R_r$ ;  
 $K_H = U_{fn}/U_n$  - кратность напряжения инвертирования  $U_{fn}$ ;  
 $K_c = U/U_n$  - коэффициент изменения напряжения питания возбудителя;  
 $K_{or} = I_{fn}/I_{fk}$  - кратность тока обмотки возбуждения  $I_{fk}$  в конце режима гашения поля.

Рассмотрим процесс гашения поля при нарушениях, относящихся к первой названной выше группе. В этом случае процесс гашения инвертированием без учета демпферной обмотки СД описывается уравнением

$$L_{fs} \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = -K_c K_H U_{fn}. \quad (3.2)$$

С учетом равенства  $U_{fn} = R_f I_{fn}$  уравнение приводится к виду

$$T_{fs} \frac{di_f}{dt} + i_f = -K_c K_H I_{fn}, \quad (3.3)$$

где  $T_{fs} = L_{fs}/R_f$  - постоянная времени гашения поля.

Решением уравнения (3.3) при начальном условии  $i_f(0) = I_{fn}$  является

$$i_f = I_{fn} - K_c K_H + (1 + K_c K_H) e^{-\frac{t}{T_{fs}}}. \quad (3.4)$$

Время снижения тока  $i_f$  до значения  $I_{fk}$  составляет

$$\tau_{H1} = T_{fs} \ln \frac{K_c K_H + 1}{K_c K_H + K_{or}}. \quad (3.5)$$

Процесс гашения поля на разрядное сопротивление описывается уравнением

$$L_{fs} \frac{di_f}{dt} + (R_f + R_r) i_f = 0. \quad (3.6)$$

Решением этого уравнения является



$$i = I_{\text{н}} e^{-\frac{t}{T_{\text{д}}(K_r+1)}} \quad (3.7)$$

Время снижения тока  $i_{\text{д}}$  до значения  $I_{\text{дк}}$  составляет

$$t_R = \frac{T_{\text{д}}}{K_r+1} \ln \frac{1}{K_{\text{ор}}} \quad (3.8)$$

Гашение поля инвертированием эффективнее гашения на разрядное сопротивление при условии

$$t_{\text{н1}} < t_R \quad (3.9)$$

С учетом (3.5) и (3.8) неравенство (3.9) приводится к виду

$$\ln \frac{K_c K_n + 1}{K_c K_n + K_{\text{ор}}} < \frac{1}{K_{\text{ор}} + 1} \ln \frac{1}{K_{\text{ор}}} \quad (3.10)$$

откуда инвертирование эффективнее, если

$$K_c K_n > \frac{K_{\text{ор}} \frac{1}{K_r+1} - K_{\text{ор}}}{1 - K_{\text{ор}} \frac{1}{K_r+1}} \quad (3.11)$$

По неравенству (3.11) построены на рис. 3.5а графики при ра-

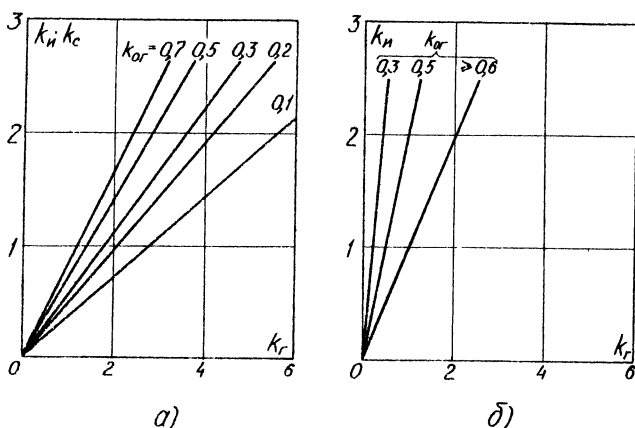


Рис. 3.5. Сравнительная эффективность гашения поля инвертированием и на разрядное сопротивление:  $\alpha$  — возбудитель под напряжением сети,  $\delta$  — возбудитель под э.д.с. возбуждающего синхронного двигателя.

эличных значениях  $K_{ог}$ . Каждая кривая графика делит плоскость на две области: выше кривой, когда время гашения поля инвертированием меньше времени гашения поля на сопротивление, ниже кривой, когда гашение поля на сопротивление эффективнее инвертирования.

Применим полученные разбиения плоскости параметров  $K_c$ ,  $K_n$  и  $K_r$  для сравнительного анализа эффективности способов гашения поля инвертированием, производимое в серийных статических возбудителях, и на разрядное сопротивление, в качестве которого используем встроенное в них пусковое сопротивление. Для серийных статических возбудителей значение  $K_n$  не превышает максимальной кратности форсировки возбуждения, которая составляет  $1,6 + 1,7$ , а кратность пускового сопротивления равна  $3 + 5$  [18]. Поэтому

$K_r = 3 + 5$ . Как видно из рис. 3.5а, для СД, участвующих в самозапуске и для которых достаточно обеспечить гашение поля до  $K_{ог} = 0,5$ , при указанных значениях  $K_n$  и  $K_c$  даже при отсутствии посадки напряжения с  $K_c = 1$  гашение поля на сопротивление происходит быстрее, чем инвертированием. При этих значениях  $K_c$ ,  $K_n$  и  $K_r$  гашение поля инвертированием эффективнее при глубоком гашении до  $K_{ог} = 0,2$  и ниже. Однако такого глубокого гашения поля при самозапуске СД не требуется. Поэтому при самозапуске СД в режиме, когда возбудитель в течение времени выбега двигателя находится под напряжением сети, преимущество имеет способ гашения поля на сопротивление. Если учесть возможность увеличения кратности разрядного сопротивления, а также то, что режимы самозапуска всегда сопровождаются общими посадками напряжения в сети, то преимущества гашения поля на сопротивление еще более возрастают.

Рассмотрим гашение поля инвертированием в режиме, когда возбудитель находится под э.д.с. выбегающего СД. В этом случае инвертирование длится в течение такого времени  $t'$ , пока э.д.с. будет более  $0,6 U_n$ . Далее гашение происходит с постоянной времени замкнутой накоротко обмотки возбуждения. Общее время гашения обозначим  $t_{н2}$ . Уравнение цепи обмотки возбуждения в процессе гашения поля имеет вид

$$L_{\Sigma} \frac{dI_f}{dt} + R_f I_f = \begin{cases} U_f & \text{если } e_f \geq 0,6 U_n, \\ 0 & \text{если } e_f < 0,6 U_n, \end{cases} \quad (3.12)$$

где  $0,6 U_n$  — минимальная величина э.д.с.  $e_f$  СД, при которой происходит инвертирование.

Напряжение  $u_f$  на обмотке возбуждения пропорционально напряжению питания  $e_f$  питания возбудителя и кратности  $K_H$  инвертирования

$$u_f = K_H K_e e_f. \quad (3.13)$$

Э.д.с.  $e_f$  пропорциональна угловой частоте  $\omega$  вращения СД и току  $i_f$

$$e_f = K_e' \omega i_f. \quad (3.14)$$

Поэтому можно записать

$$u_f = K_H K_e K_e' \omega i_f. \quad (3.15)$$

При синхронной частоте вращения  $\omega_c$  и номинальном токе  $I_{fH}$  напряжение  $u_f$  равно  $K_H U_{fH}$ . С учетом равенства  $U_{fH} = R_f I_{fH}$  из (3.15) получаем

$$K_e K_e' \omega_c = R_f \quad (3.16)$$

и напряжение  $u_f$  определится выражением

$$u_f = K_H \frac{\omega}{\omega_c} R_f i_f. \quad (3.17)$$

На основании этого равенства уравнение (3.12) цепи обмотки возбуждения после преобразований примет вид

$$T_{fs} \frac{di_f}{dt} + i_f = \begin{cases} -K_H \frac{\omega}{\omega_c} i_f, & \text{если } \omega i_f \geq 0,6 \omega_c I_{fH}, \\ 0, & \text{если } \omega i_f < 0,6 \omega_c I_{fH}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Предположим, что во время выбега частота не изменяется, т.е.  $\omega = \omega_c = \text{const}$ . Обозначим при этом полное время гашения поля через  $t_{н20}$ , а длительность инвертирования —  $t'_0$ . Тогда из (3.18) следует

$$T_{fs} \frac{di_f}{dt} + i_f = \begin{cases} -K_H i_f, & \text{если } i_f \geq 0,6 I_{fH}, \\ 0 & \text{если } i_f < 0,6 I_{fH}. \end{cases} \quad (3.19)$$

Длительность инвертирования  $t'_0$  определяется из равенства, являющегося интегралом первого уравнения системы (3.19)

$$T_{fs} \ln i_f \int_{0,6 I_{fH}}^{I_{fH}} = \int_0^{t'_0} (1 + K_H) dt, \quad (3.20)$$

откуда

$$t'_0 = T_{fs} \frac{1}{1+K_H} \ln \frac{1}{0,6} . \quad (3.21)$$

Полное время гашения определяется интегрированием обоих уравнений (3.19)

$$T_{fs} \ln i_x \Big|_{I_{xk}}^{I_{xH}} = \int_0^{t'_0} (1+K_H) dt + \int_{t'_0}^{t_{H20}} dt = t_{H20} + K_H t'_0 , \quad (3.22)$$

откуда с учетом (3.21)

$$t_{H20} = T_{fs} \ln \frac{I_{xH}}{I_{xk}} - K_H t'_0 = T_{fs} \left[ \ln \frac{1}{K_{or}} - \frac{K_H}{1+K_H} \ln \frac{1}{0,6} \right] . \quad (3.23)$$

Если гашение поля происходит до  $K_{or} \geq 0,6$ , то

$$t_{H20} = T_{fs} \frac{1}{1-K_H} \ln \frac{1}{K_{or}} . \quad (3.24)$$

Гашение поля инвертированием эффективнее гашения поля на сопротивление, если  $t_{H20} < t_R$  или с учетом (3.8)

$$\ln \frac{1}{K_{or}} - \frac{K_H}{1+K_H} \ln \frac{1}{0,6} < \frac{1}{1+K_r} \ln \frac{1}{K_{or}} , \quad (3.25)$$

откуда

$$K_H > \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{K_r}\right) \frac{\ln 0,6}{\ln K_{or}} - 1} . \quad (3.26)$$

При гашении поля до  $K_{or} \geq 0,6$  инвертирование эффективнее, если

$$K_H > K_r . \quad (3.27)$$

Неравенствам (3.26) и (3.27) соответствуют области плоскости параметров  $K_H$  и  $K_r$ , лежащие выше графиков, приведенных на рис. 3.5б. Из графиков видно, что при  $K_r = 3 + 5$  и  $K_H \leq 1,7$  гашение поля на сопротивление всегда происходит быстрее, чем инвертированием.

Поскольку частота вращения  $\omega$  СД при выбеге уменьшается, то процесс гашения поля в инверторном режиме замедляется. Это вытекает из сравнения уравнений (3.18) и (3.19), поскольку уменьшение частоты  $\omega$  эквивалентно уменьшению кратности инвертирования  $K_H$ . А при уменьшении  $K_H$ , как следует из (3.23), полное время гашения  $t_{H20}$  возрастает. Поэтому  $t_{H2} > t_{H20}$ .

Проведенный сравнительный анализ эффективности гашения поля инвертированием и на разрядное сопротивление показал, что при ис-

пользовании серийных возбудителей СД в режиме их самозапуска, когда достаточно погасить поле до  $0,5 I_{\text{сн}}$ , самое быстрое гашение поля независимо от вида нарушения питания достигается на активное сопротивление. В качестве разрядного сопротивления оказывается достаточным использовать встроенное в возбудитель пусковое сопротивление. Для повышения эффективности гашения поля можно увеличить разрядное сопротивление. Гашение поля инвертированием только затрудняет самозапуск.

При гашении поля на активное сопротивление необходимо уточнить способ технической реализации его. Здесь возможны два пути: только подключение параллельно обмотке возбуждения разрядного сопротивления или одновременно с подключением сопротивления принудительное выключение тиристоров выпрямителя статического возбудителя. Если после подключения сопротивления возбудитель принудительно не выключается (рис. 3.6), то характер протекания процесса гашения поля, как показали исследования, зависит от уровня напряжения питания возбудителя. При исчезновении напряжения затухание тока в обмотке возбуждения происходит по внешней цепи с минимальным сопротивлением, содержащем обмотку питающего трансформатора  $T_p$  возбудителя и последний из открытых тиристоров  $T$  возбудителя (рис. 3.6). Постоянная времени  $T_r$  и время гашения  $t_r$  максимальны. Если трансформатор остается под напряжением, то время гашения состоит из интервала от момента подключения разрядного сопротивления до момента естественного отключения тиристоров возбудителя (предполагается, что импульсы на открытие тиристоров не поступают) и времени собственного гашения на сопротивление с постоянной  $T_{rs}/(K_r+1)$ . В этом случае полное время гашения оказывается зависящим еще и от кратности  $K_r$  разрядного сопротивления, что иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 3.7 и построенном при сохранении полного напряжения на возбудителе. Постоянная времени гашения  $T_r$  минимальна при определенном сопротивлении  $R_r$ , а не обратно пропорциональна ему, как в выражении (3.18).

Таким образом, если во время гашения поля выпрямитель возбудителя остается включенным, то эффективность гашения на сопротивление может существенно снизиться. Чтобы осуществить наиболее быстрое гашение поля СД на сопротивление при любых нарушениях питания и независимо от кратности этого сопротивления, необходимо принудительно выключать тиристоры выпрямителя возбудителя, применяя известные схемы конденсаторной коммутации [24]. Практические схе-

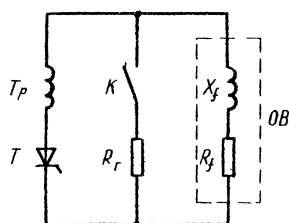


Рис. 3.6. Способ гашения магнитного поля СД на активное сопротивление.

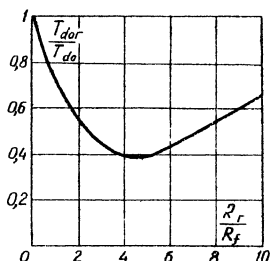


Рис. 3.7. Зависимость постоянной времени гашения  $T_{dor}$  от кратности гасящего сопротивления.

мы гашения поля на активное сопротивление приведены в п. 3.7.

Следует отметить, что повысить эффективность гашения поля инвертированием при любых возможных нарушениях питания СД оказывается принципиально невозможным.

### 3.4. Способы разгона синхронного двигателя до подсинхронной скорости

После восстановления нормального питания СД происходит сначала разгон до подсинхронной скорости, и затем синхронизация с момента подачи на обмотку возбуждения постоянного напряжения. Под подсинхронной скоростью понимается та скорость, при которой после подачи постоянного возбуждения СД входит в синхронизм.

При самозапуске тихоходных СД, используемых в основном в качестве приводов поршневых компрессоров, с пониженными значениями момента во всем диапазоне рабочих скольжений, центральной является проблема максимального повышения электромагнитного момента при всех рабочих скольжениях. Известны способы повышения электромагнитного момента СД, основанные на однократном и непрерывном изменении кратности пускового сопротивления [18]. Недостатком способов является относительно небольшое увеличение момента СД. Предложены вентильно-конденсаторные системы возбуждения при асинхронном пуске СД [23] путем последовательного включения с пусковым сопротивлением  $R_n$  конденсатора. Этим способом достигается повы-

шение пускового момента при одновременном уменьшении входного, что затрудняет последующую синхронизацию двигателя. Способу присущ также тот недостаток, что для его реализации требуется применение неэлектролитических конденсаторов большой емкости с высоким рабочим напряжением [23]. Поэтому для высоковольтных СД большой мощности этот способ практического значения не имеет.

Наиболее эффективными являются способы, основанные на подключении к обмотке возбуждения возбудителей с изменяющимися во времени по определенным законам напряжения на обмотке возбуждения или сопротивлением в цепи этой обмотки [14-16]. Характерным для этих способов является метод их выбора и обоснования, сводящийся к применению к возбудителю с заранее известной структурой наперед заданного закона управления и последующим определением оптимальных значений параметров управления по максимуму электромагнитного момента СД. При решении вопросов самозапуска тихоходных СД эти управления не всегда обеспечивают необходимое повышение электромагнитного момента во всем рабочем диапазоне скольжений. Поэтому представляется важным знать пределы повышения электромагнитного момента СД независимо от конкретного исполнения возбудителя, что неразрывно связано с вопросом определения без связи со структурой возбудителя оптимальных управлений возбуждением по критерию максимума электромагнитного момента СД при всех скольжениях. Тогда реализация найденных законов управления сводится к чисто инженерной задаче, решение которой может быть произведено различными способами в зависимости от имеющихся в распоряжении разработчика технических средств.

Оптимальный закон изменения напряжения  $U_f$  на кольцах обмотки возбуждения при подключении к ней возбудителя произвольного исполнения, при котором среднее значение момента  $M_f$ , обусловленного взаимодействием тока возбуждения  $I_f$  с потокоцеплением статора, максимально при ограничениях на максимальное значение напряжения на кольцах обмотки возбуждения (из условия электропрочности изоляции)

$$U_f \leq U'_{fm} \quad (3.28)$$

и действующее значение тока возбуждения (из ограничения тепловыделений в обмотке возбуждения, причем на любом интервале времени, равном периоду  $T$  изменения тока возбуждения, мощность тепловыделений не превышает заданную допустимую)

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_f^2 dt} = I_{fm}, \quad (3.29)$$

определенный в результате решения соответствующей вариационной задачи, имеет вид

$$u_{f\text{опт}} = U_{fm} \operatorname{sign} \{ \sin(\theta + \varphi) \}, \quad (3.30)$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} s T'_a. \quad (3.31)$$

Решение (3.30) показывает, что оптимально напряжение на обмотке возбуждения должно изменяться скачком, принимая граничные значения  $\pm U_{fm}$  в функции угла  $\theta$  и скольжения  $S$  в моменты времени, когда угол  $\theta$  между сходящимися магнитными полями статора и обмотки возбуждения равен  $\varphi$ . Амплитуда напряжения  $U_{fm}$ , ограниченная согласно (3.28) значением  $U'_{fm}$ , выбирается одновременно из условия (3.29), чтобы действующее значение тока при оптимальном управлении не превысило  $I_{fm}$ .

Максимальный момент при оптимальном управлении равен

$$M_{\text{опт}} = M_{\kappa_3} + M_{f\text{гон}} = M_{\kappa_3} + \frac{2 U U_{fm} \chi_{ad}}{\pi R_f \chi_a \sqrt{1 + (s T'_a)^2}}, \quad (3.32)$$

где  $M_{\kappa_3}$  — момент СД при замкнутой накоротко обмотке возбуждения.

Основная особенность и практическое значение графика  $M_{\text{опт}}$  в том, что он представляет предел повышения электромагнитного момента СД при управлении возбуждением (рис. 3.8). Всякое превышение момента  $M_{\text{опт}}$  связано либо с перенапряжением на кольцах обмотки возбуждения, либо с перегрузкой ее по току. График  $M_{\text{опт}}$ , значения которого довольно несложно рассчитываются по выражению (3.32), нужно использовать для сравнения и приближения к нему характеристик асинхронного момента СД при любых законах управления возбуждением с использованием возбудителей любого технического исполнения. С помощью этого графика при известном моменте нагрузки находится предельное скольжение при выбеге СД и допустимое время перерыва питания  $t_{\text{пн}}$ , которое должно быть непременно обеспечено схемами защиты сети, АВР и АПВ.

Из сравнения графиков  $M_{\text{опт}}$ ,  $M_{\text{ан}}$  и  $M_{\kappa_3}$  видно, что существуют большие возможности в повышении момента при скольжениях менее



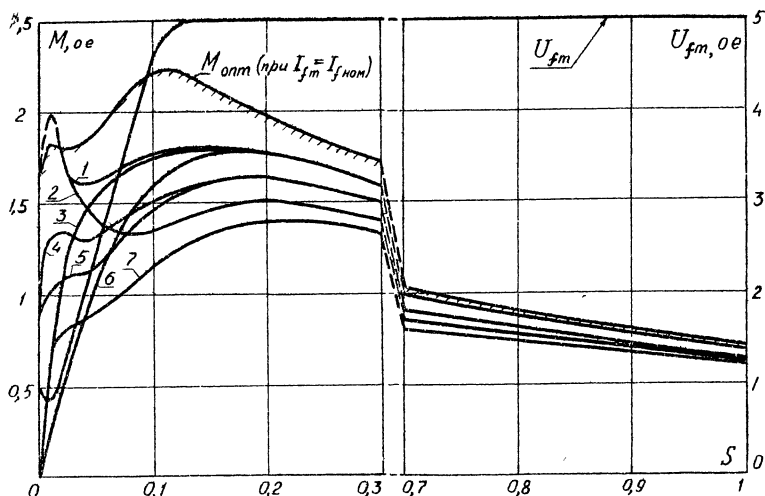


Рис. 3.8. Электромагнитные моменты СД типа ДСКП-260/24-36 при 1 - циклической подаче однополярного номинального возбуждения через шунтируемое сопротивление ( $M_{огр}$ ); 2 - циклическом симметричном номинальном напряжении ( $M_{уб}$ ); 3 - циклически вводимом сопротивлении ( $M_{кц}$ ); 4 и 5 - циклическом возбуждении, чередующемся с гашением поля на сопротивление, соответственно, при форсированном в 1,5 крат ( $M_{гор}$ ) и номинальном ( $M_{гр}$ ) напряжении; 6 - замкнутой обмотке возбуждения на пусковое сопротивление ( $M_{рп}$ ); 7 - замкнутой накоротко обмотке возбуждения ( $M_{кз}$ ).

0,2 + 0,3. Пусковой момент, несмотря на применение наилучшего - оптимального - возбуждения, растет незначительно. Как следует из (3.32) пусковой момент можно повысить только одним способом - увеличить допустимую амплитуду напряжения  $U_{fm}$ .

Оптимальное возбуждение реализуется на базе реверсивного тиристорного выпрямителя. Кратность форсировки напряжения определяется графиком  $U_{fm}$  (рис. 3.8), рассчитанном согласно выражений (3.28) и (3.29). Максимальная кратность форсировки практически равна кратности пускового сопротивления (3-5 крат), применяемого при обычном пуске СД.

В серийно выпускаемых возбудителях не предусматриваются указанные кратности форсировки напряжения [18], что, естественно, является препятствием практического применения оптимального управления возбуждением. Если ориентироваться на использование серийных возбудителей, у которых кратность форсировки равна  $I,6 + I,7$ , то следует говорить лишь о практически реализуемом оптимальном возбудителе, с применением которого можно добиться максимального повышения электромагнитного момента, но который всегда будет не выше  $M_{opt}$ .

С точки зрения простоты практической реализации, минимального числа силовых элементов и их достаточности в возбудитель должны входить управляемый источник напряжения  $U_B$  и переменное активное сопротивление  $R_B$ , соединенные последовательно (рис. 3.9). При применении этого возбудителя двигателем при всех скольжениях развивается максимальный момент в случае, если напряжение  $U_B$  и сопротивление  $R_B$  изменяются скачком, принимая только граничные значения, в функции угла  $\theta$ , скольжения  $S$  и тока возбуждения  $i_f$  (рис. 3.9) согласно законов

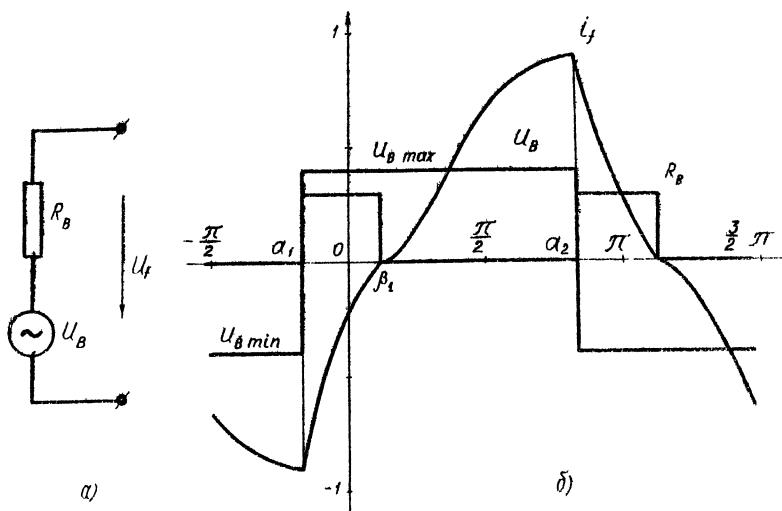


Рис. 3.9. Процессы при оптимальном управлении возбуждением.

$$\begin{aligned} U_s &= U_{s.cp} + \Delta U_s \operatorname{sign}\{\sin(\theta + \alpha(s))\}, \\ R_s &= R_{s.cp} - \Delta R_s \operatorname{sign}\{\sin(\theta + \alpha(s))\} \operatorname{sign} i_f, \end{aligned} \quad (3.33)$$

где  $\alpha(s)$  – угол коммутации напряжения  $U_s$ , являющийся функцией скольжения  $s$ ;

$U_{s.cp}$ ,  $R_{s.cp}$  – средние значения  $U_s$  и  $R_s$  в допустимых пределах их изменения;

$\Delta U_s$ ,  $\Delta R_s$  – амплитуды  $U_s$  и  $R_s$  относительно их средних значений.

Из выражений (3.33) следует, что коммутация напряжения  $U_s$  и введение сопротивления  $R_s$  производятся одновременно, а шунтируется сопротивление  $R_s$  при переходе тока  $i_f$  через нулевое значение (рис. 3.9). Физический смысл найденного управления в том, что подачей напряжения  $U_s$  достигается получение наибольшей амплитуды изменения тока  $i_f$ , а кратковременным введением сопротивления  $R_s$  достигается уменьшение фазового сдвига между током  $i_f$  и наводимой вращающимся полем статора в обмотке возбуждения э.д.с. Как известно из теории электрических машин, электромагнитный момент пропорционален и амплитуде тока в обмотке ротора, и косинусу указанного сдвига фаз.

Для некоторых частных случаев исполнения возбудителя (рис. 3.9) ниже приведены в общем виде интервалы углов коммутации  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  подачи, соответственно максимальному и минимальному напряжению возбуждения  $U_s$ , и соответствующие графики на рис. 3.10.

Для возбудителя с одним источником напряжения  $U_s$  при  $R_s \equiv 0$  независимо от среднего значения  $U_{s.cp}$  углы коммутации равны углам для строго оптимального возбудителя

$$\alpha_1 = -\varphi = -\arctg s T'_d, \quad \alpha_2 = \alpha_1 + 180^\circ. \quad (3.34)$$

При отсутствии источника напряжения  $U_s$  имеем способ циклического введения сопротивления, описанный в [16], отличающийся от него законом управления – вводится сопротивление  $R_s$  в функции угла  $\theta$  и скольжения  $s$  при углах  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , а шунтируется в момент времени, когда  $i_f = 0$  при  $\theta = \beta_1$ .

Для возбудителя с симметричным напряжением  $U_s$  получены следующие интервалы углов коммутации

$$-\arctg \frac{s X'_f}{R_f} < \alpha_1 < -\arctg \frac{s X'_f}{R_f + R_{s.max}}, \quad \alpha_2 = \alpha_1 + 180^\circ. \quad (3.35)$$

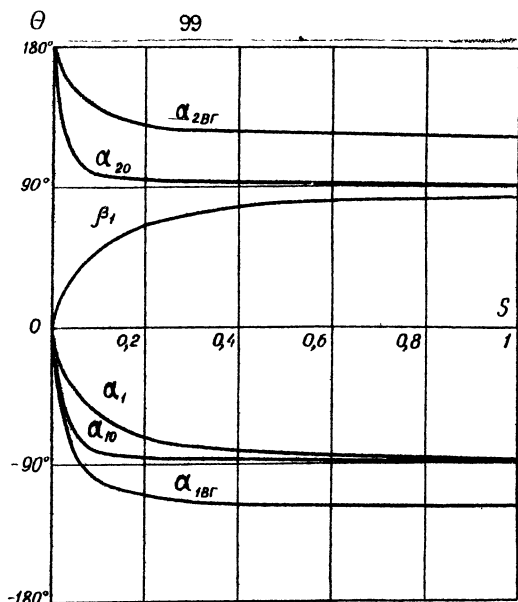


Рис. 3.10. Углы коммутации:  $\alpha_{10}$  и  $\alpha_{20}$  — для оптимального управления;  $\alpha_1, \beta_1$  — для циклически вводимого сопротивления;  $\alpha_{1\beta}, \alpha_{2\beta}$  — для циклического возбуждения с гашением поля.

Для возбудителя с однополярным возбуждением  $U_B \geq 0$  при  $R_B \neq 0$  и  $i_f \geq 0$  (ток  $i_f$  должен быть одного направления, что достигается подачей форсированного возбуждения) значения углов коммутации лежат в интервалах

$$\alpha_1 < -\arctg \frac{S X'_f}{R_f}, \quad \alpha_2 > 180^\circ - \arctg \frac{S X'_f}{R_f + R_{B, \max}}. \quad (3.36)$$

При этом способе управления только при  $i_f \geq 0$  одновременно с подачей напряжения  $U_B$  шунтируется  $R_B$ , а при выключении  $U_B$  вводится  $R_B$ . Интервал  $(\alpha_2 - \alpha_1)$  по углу включенного состояния возбуждения всегда превышает интервал  $(360^\circ + \alpha_1 - \alpha_2)$  подключения сопротивления (при скольжениях менее 0,1 + 0,15 различия в интервалах достигают  $80^\circ - 90^\circ$ ).

Знание интервалов (3.35) и (3.36) углов коммутации позволяет строить эффективные алгоритмы их вычисления. На рис. 3.8 показаны графики моментов для некоторых частных способов исполнения оптимального возбудителя.

Проведенный анализ разработанного оптимального возбуждения СД по таким важнейшим эксплуатационным показателям, как влияние точности воспроизведения углов коммутации на величину дополнительного момента  $M_{\text{доп}}$ , влияние демпферной обмотки на управление и изменения тока статора и времени разгона при применении оптимального управления позволил установить следующее. Дополнительный момент  $M_{\text{доп}}$  пропорционален косинусу угла ошибки в воспроизведении угла коммутации  $\alpha$ . Из этого результата следует слабая чувствительность оптимального момента к погрешностям управления, но только относительно оптимальных углов. Так при ошибке в угле коммутации до  $20^\circ$  дополнительный момент уменьшается только на 6%. Значит, углы коммутации возбуждателя должны быть определены с высокой точностью для того, чтобы при неизбежных погрешностях в их воспроизведении техническими средствами снижение момента было бы минимальным. Демпферная обмотка не влияет на вид законов управления и оказывает незначительное влияние на значения углов коммутации. Поэтому углы коммутации допустимо определять по наиболее простым выражениям (3.34), (3.35) и (3.36), полученным без учета демпферной обмотки. Ток статора СД при применении оптимального возбуждения при пуске возрастает на несколько процентов и остается большим при всех скольжениях (рис. 3.11). Но, вследствие повышенного момента СД, его разгон происходит в 1,5 + 1,6 раз быстрее. Поэтому во времени потребление тока двигателем при оптимальном возбуждении меньше, чем при разгоне с пусковым сопротивлением.

В целом разработанные способы управления возбуждением при разгоне и сопоставление графиков моментов позволяют выбрать наилучший для практической реализации. Возможным решением задачи организации разгона СД является применение различных способов управления возбуждением при разных скольжениях, где имеются сравнительные преимущества по величине момента. В этом случае определяющим фактором является также простота перехода от одного управления возбуждения к другому.

### 3.5. Определение моментов включения возбуждения при вхождении двигателя в синхронизм под нагрузкой

В настоящее время для оценки вхождения синхронного двигателя в синхронизм пользуются критерием 100% вероятности синхронизации,

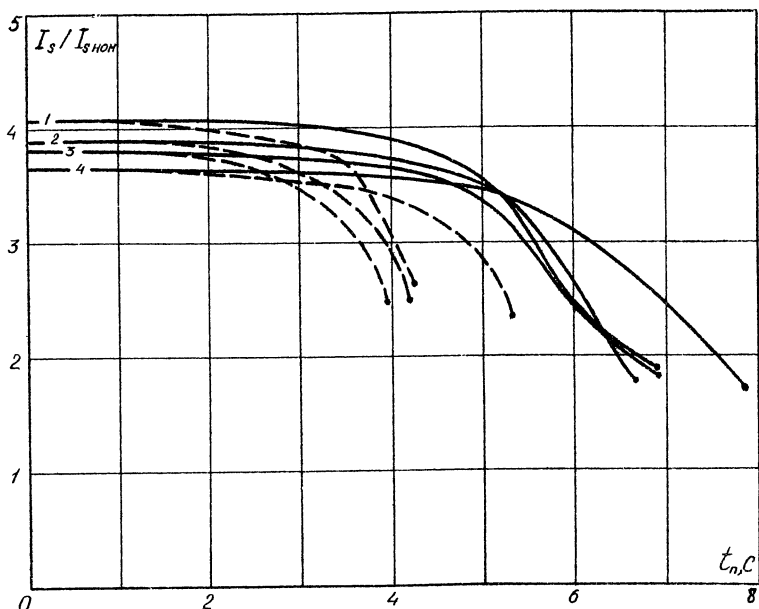


Рис. 3.11. Токи статора ДСКП-260/24-36 при разгоне с пусковым сопротивлением (сплошные линии) и оптимальным возбуждением (пунктирные линии): 1 - момент сопротивления  $M_c = 1$ , напряжение сети  $U_c = 1$ ; 2 -  $M_c = 0,8$ ,  $U_c = 0,95$ ; 3 -  $M_c = 0,9$ ,  $U_c = 0,95$ ; 4 -  $M_c = 0,8$ ,  $U_c = 0,9$ .

определяющим величину критического скольжения  $S_{кр}$ , до которого должен развернуться двигатель перед включением напряжения возбуждения. Это скольжение определяется через кратность максимального синхронного момента  $M_{см}$ , кратность форсировки  $K_\phi$  и электромеханическую постоянную времени  $T_j$  по выражению [3,13,17]

$$S_{кр} = 1,05 \sqrt{\frac{M_{см}}{T_j}} K_\phi. \quad (3.37)$$

Считается, что определенный усреднением коэффициент 1,05 дает запас по скольжению при синхронизации порядка 20 - 30%.

Существует более полный критерий, которым учитывается динамическая составляющая  $\delta$  асинхронного момента демпферной обмотки

и момент явнотолжности  $M_a$  [19]

$$S_{кр} = \frac{1}{0,79 \left( 0,26 \frac{M_a}{M_{cm}} - 0,75 \right) \beta + 0,3 \frac{M_a}{M_{cm}} \left( 0,2 - 0,77 \frac{M_g^2}{M_{cm}^2} \right) \frac{M_c^2}{M_{cm}^2}} \sqrt{\frac{M_{cm}}{T_j}} \quad (3.38)$$

При использовании критериев (3.38) и (3.37) нужно всегда помнить о пределах их применимости. Во-первых, разгон до критического скольжения должен быть обеспечен электромагнитным моментом СД при короткозамкнутой обмотке возбуждения [17,19]. Во-вторых, возбуждение может быть включено при произвольном угловом положении ротора. Именно при этих допущениях получены выражения (3.37) и (3.38). Поэтому, если при скольжении в момент включения возбуждения асинхронный момент двигателя при короткозамкнутой обмотке возбуждения окажется не соответствующим этому скольжению, то синхронизация может быть достигнута только с учетом углового положения ротора, т.е. возбуждение должно быть подано при благоприятном угле  $\theta$  между осью ротора и полем статора.

Эти критерии всегда дают адекватный результат при пуске двигателя со значениями статического момента нагрузки, не превышающего допустимого по техническим условиям эксплуатации - обычно  $(0,3 + 0,6) M_n$ . Однако в режимах самозапуска нагрузка может быть любой величины вплоть до номинальной. В этих случаях решающим при оценке успешности синхронизации становится не только синхронный момент обмотки возбуждения, но и асинхронный момент демпферной обмотки. Например, для тихоходного СД типа ДСКП-260/24-36, нагруженного на поршневой компрессор с постоянной времени  $T_j = 3,7$  с, величина критического скольжения  $S_{кр}$ , вычисленная по (3.37) равна 3,7% и по (3.38) - 4,08%, а разгон этого двигателя с номинальной нагрузкой при короткозамкнутой обмотке возбуждения возможен до скольжения 7%. Таким образом, нарушено одно из условий применимости критериев. В подобных случаях критерии не дают практического ответа на вопрос о способе осуществления синхронизации двигателя под нагрузкой.

В связи с этим для обеспечения втягивания СД в синхронизм под нагрузкой необходимо уметь определять множество значений угла  $\theta$  и скольжения  $S$ , образующие зоны синхронизации, при которых включение возбуждения приведет к синхронизации двигателя. Эти зоны определяются в результате решения уравнения динамики синхронного электропривода, записанного в фазовых переменных "угол  $\theta$  -

скольжение  $S$  "с учетом всех составляющих электромагнитного момента двигателя. Уравнение имеет вид

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{M_c - M_a - M_n - M_g \sin 2\theta - i_{ff}/I_{fn} M_{cm} \sin \theta}{s T_j}, \quad (3.39)$$

где  $M_c$  - статический момент нагрузки;

$M_a$  - постоянная (не зависящая от угла  $\theta$ ) составляющая асинхронного момента [12, 19];

$M_n$  - периодическая составляющая асинхронного момента, зависящая от угла  $\theta$  и скольжения  $S$  [12, 19];

$M_g$  - момент явнопольности [19];

$M_{cm}$  - максимальное значение синхронного момента при номинальном возбуждении;

$I_{fn}$  - номинальный ток возбуждения;

$i_{ff}$  - составляющая мгновенного значения тока обмотки возбуждения, создаваемая в ней напряжением возбудителя. Мгновенное значение тока  $i_{ff}$  при  $t \geq 0$  (от момента включения возбуждения на синхронизацию) определяется выражением

$$i_{ff} = I_{fn} + (I_{fo} - I_{fn}) e^{-\frac{t}{T_d}}, \quad (3.40)$$

где  $I_{fo}$  - значение тока  $i_{ff}$  в момент включения возбуждения, определяемое как

$$I_{fo} = i_f(-0) - i_{fk3}(-0), \quad (3.41)$$

где  $i_f(-0)$  - полный ток возбуждения до начала вхождения в синхронизм;

$i_{fk3}(-0)$  - составляющая тока короткозамкнутой обмотки возбуждения, наведенного в ней вращающимся полем статора, при взаимодействии с которым создается момент, входящий в  $M_a$  и  $M_n$ .

Решением уравнения (3.39) при фиксированном токе  $i_{ff} = I_{fc} = \text{const}$  являются фазовые траектории на плоскости " $\theta - S$ ". Значения угла  $\theta$ , при которых двигатель вращается с синхронной частотой, находятся пересечением угловых характеристик синхронного момента и момента явнопольности с линией момента сопротивления из уравнения

$$M_g \sin 2\theta + \frac{I_{fc}}{I_{fn}} M_{cm} \sin \theta = M_c. \quad (3.42)$$

При загрузке двигателя более  $(0,2 + 0,3) M_n$  уравнение имеет



два решения  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , причем  $\theta_1$  соответствует устойчивому вращению СД, а  $\theta_2$  — неустойчивому (при малейшем изменении момента сопротивления двигатель либо уходит от угла  $\theta_2$  к углу  $\theta_1$ , либо выпадает из синхронизма). Решения уравнения (3.39), проходящие через точку  $\theta_2$ , называемые сепаратрисами, разбивают фазовую плоскость "  $\theta$ - $S$  " на области с разным характером движения. На рис. 3.12 с сепаратрисами, которые рассчитаны для синхронного двигателя ДСКП-260/24-36 при номинальной нагрузке и  $I_{fc} = I_{fn}$ , в области I движение устойчиво — двигатель входит в синхронизм, если ток  $i_{ff}$  в момент включения возбуждения не менее значения  $I_{fc}$ , при котором построена сепаратриса границы области. Вне области I движение неустойчиво — двигатель после включения возбуждения выходит на асинхронный режим с установившимся скольжением  $S_{уст}$ . При изменении значений  $\theta$  и  $S$  в пределах области устойчивости после включения возбуждения, как показал анализ, ток  $i_{ff}$  возрастает незначительно. Тогда для успешного вхождения двигателя в синхронизм достаточно, чтобы в момент включения возбуждения ток  $I_{fo}$  был бы не менее  $I_{fc}$ , а значения угла  $\theta$  и скольжения  $S$  лежали в области устойчивости с границей, построенной для тока  $I_{fc}$ .

Установление факта синхронизации на основании полученного условия достаточно просто выполнить, если области устойчивости на плоскости "  $\theta$ - $S$  " с параметром  $I_{fc}$  (рис. 3.12) преобразовать в эквивалентные области на плоскости "  $\theta$ - $I_{fo}$  " (при учете равен-

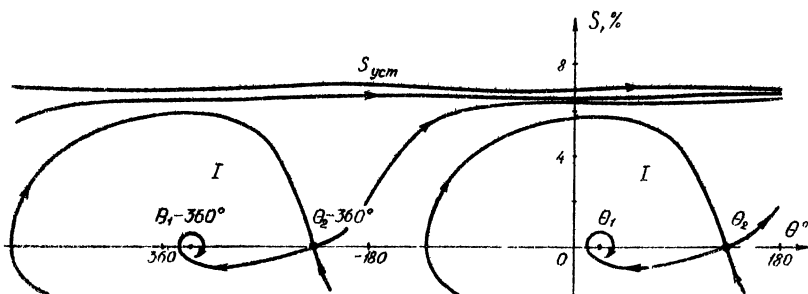


Рис. 3.12. Разбиение фазовой плоскости движения СД на области устойчивости.

ства  $I_{fo} = I_{fc}$  по условию синхронизации) с параметром  $S$  (рис. 3.13). Здесь устойчивому движению соответствует множество значений  $\theta$  и  $I_{fo}$ , лежащих выше очередных границ. Затем на эту же плоскость " $\theta - I_{fo}$ " наносятся графики токов  $I_{fo}$  в зависимости от угла  $\theta$  для заданного способа разгона СД до момента включения возбуждения на синхронизацию. Тогда множество точек  $\theta$  и  $S$  пересечения графиков токов с границами областей устойчивости, перенесенные на плоскость " $\theta - S$ ", образуют границы зон синхронизации (рис. 3.14).

На рис. 3.13 и 3.14 приведены построения по определению зон синхронизации для ДСКП-260/24-36 при различных способах его разгона. Видно, что форма зоны синхронизации зависит от способа разгона СД. Для способов разгона с циклической подачей возбуждения нанесены линии подачи 8 и отключения 9 напряжения такой полярности, которая совпадает с полярностью напряжения при синхронизации.

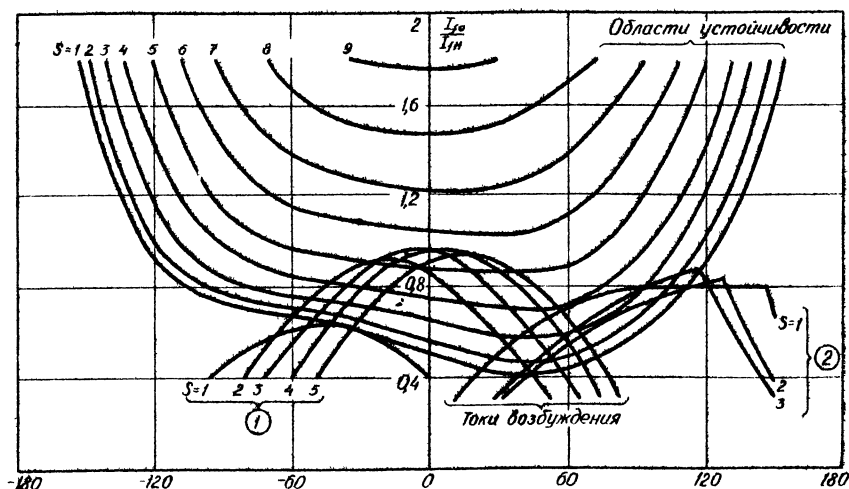


Рис. 3.13. Границы областей устойчивости и начальных значений тока возбуждения при разгоне с пусковым сопротивлением (1) и циклическим возбуждением, чередующимся с гашением поля на активное сопротивление (2).

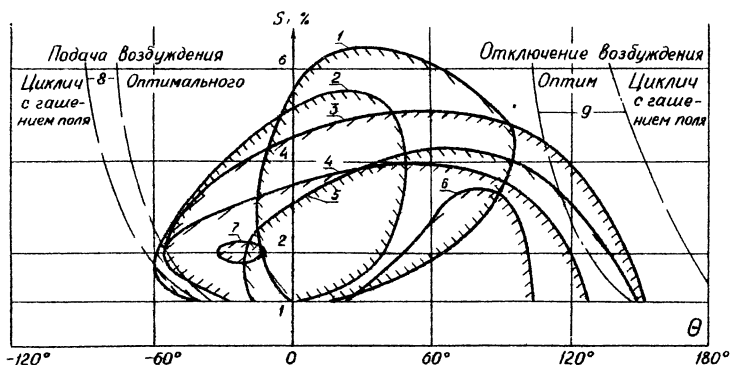


Рис. 3.14. Зоны синхронизации после разгона СД с: 1 - циклически вводимым сопротивлением; 2 и 7 - пусковым сопротивлением и 3 и 4 - циклическим однополярным номинальным возбуждением, чередующимся с гашением поля на сопротивление; 5 - однополярным циклическим номинальным возбуждением; 6 - оптимальным возбуждением (для 4 и 7 напряжение на синхронизацию подается номинальное, в остальных случаях - форсированное кратностью 1,7); 8 и 9 - линии подачи и снятия циклического напряжения возбуждения.

Так как зоны для этих способов находятся между отключенными линиями 8 и 9, то при уменьшении в цикле подачи возбуждения скольжения ниже верхней границы зоны для вхождения в синхронизм последующего отключения возбуждения не потребуется. В случае включения на синхронизацию форсированного возбуждения кратности  $K_{\phi}$  необходимо на рис. 3.13 либо в  $K_{\phi}$  раз уменьшить ординаты границ областей устойчивости, либо в  $K_{\phi}$  раз увеличить ординаты графиков токов.

С учетом изложенного определение зон синхронизации производится в следующей последовательности [25]:

1. По уравнению (3.16) при фиксированных значениях тока  $i_{fd} = I_{fd}$  рассчитываются сепаратрисы. Результаты расчетов представляются в виде границ областей устойчивости на плоскости "  $\theta - I_{fd}$  " с параметром  $S$  (рис. 3.13).

2. Для заданного способа разгона двигателя рассчитываются при фиксированных значениях скольжения  $S$  зависимости тока  $I_{fd}$  от угла  $\theta$ .

3. Совмещаются на плоскости " $\theta - I_{\text{до}}$ " графики границ областей устойчивости и токов  $I_{\text{до}}$  с учетом кратности форсировки напряжения возбуждения, подаваемого на синхронизацию.

4. Определяются из пересечения границ областей устойчивости и графиков тока  $I_{\text{до}}$  величины скольжения  $S$  и угла  $\theta$ . По этим значениям  $\theta$  и  $S$  строятся зоны синхронизации.

В процессе расчета используются параметры нагрузки, схемы замещения двигателя, учитывается способ разгона и форсировка.

Естественно, приведенное определение зон синхронизации посредством решения уравнения динамики (3.16) может быть выполнено только с применением ЭВМ. Поэтому представляется целесообразным выработка на основе полученных зон практических рекомендаций по обеспечению синхронизации под нагрузкой. Как видно из рис. 3.14 при всех способах разгона до подсинхронной скорости синхронизация возможна после включения возбуждения при  $\theta = 0^\circ$  - в момент совпадения магнитных полей статора и ротора. Величина скольжения в момент включения возбуждения определяется пересечением графика асинхронного момента СД при заданном способе разгона с линией момента нагрузки и проверяется в процессе пробных пусков двигателя.

В существующих тиристорных возбудителях подача возбуждения на синхронизацию СД производится в функции скольжения, с выдержкой времени, тока статора и угла  $\theta$  [18]. Наиболее эффективным считается способ подачи возбуждения в функции скольжения, который и реализован в возбудителях серий ТВУ-180 и ТВ. Но, как следует из изложенного, этот способ подачи возбуждения пригоден при самозапуске малозагруженных двигателей. Синхронизация по времени заложена в возбудителях серии ТВУ-320, а по уменьшению тока статора - в возбудителях серий ТЕ8-320 и ТВУ-320. Подача возбуждения при благоприятном значении угла  $\theta$  и по скольжению реализована в возбудителях серии ТВ, выпускаемых производственным объединением "Уралэлектротяжмаш". Очевидно, что при самозапуске СД под нагрузкой предпочтение имеют возбудители серии ТВ.

### 3.6. Измерение внутреннего угла $\theta$ синхронного двигателя

Для практического внедрения самозапуска СД под нагрузкой необходима разработка способа и устройства измерения угла  $\theta$  без подсоединения к валу двигателя. В ряде отраслей промышленности, в

частности — химической, где эксплуатируются СД закрытого исполнения без свободного доступа к валу, этот способ оказывается единственно возможным. Кроме того, с точки зрения эксплуатации способ имеет существенные преимущества перед способами измерения угла с использованием датчиков положения ротора СД [20, 21].

Суть способа измерения угла  $\theta$  без доступа к валу заключается в определении его значения через продольную составляющую потока сцепления статора  $\Psi_a$  согласно выражения

$$\Psi_a = U_s \cos \theta = \frac{1}{p} \left[ U_f - R_f i - \frac{\delta' T_{ad} p + 1}{T_{ad} p + 1} \chi_f' p i_f \right] \frac{\chi_a}{\chi_{ad}} \cdot \frac{T_{ad} p + 1}{T_{ad} p + 1}, \quad (3.43)$$

полученного в результате решений полной системы уравнений Парка-Горва для СД.

При воспроизведении этого выражения на электронных схемах возникают основные три погрешности, от которых зависит точность измерения угла  $\theta$ .

Прежде всего имеется погрешность, обусловленная неточным заданием параметров демпферной обмотки, определяющих постоянные времени  $T_{ad}'$ ,  $T_{ad}$  и коэффициент рассеяния  $\delta'$  в выражениях

$$\frac{\delta' T_{ad}' p + 1}{T_{ad}' p + 1}, \quad (3.44)$$

$$\frac{T_{ad} p + 1}{T_{ad} p + 1}. \quad (3.45)$$

Здесь существенно то, что воспроизведение выражения (3.45), которому соответствует операция дифференцирования (так как  $T_{ad}' > T_{ad}$ ) крайне нежелательно, потому что это ведет к возрастанию уровня помех в электронных схемах.

Произведенная оценка модулей выражений (3.44) и (3.45) и фазовых сдвигов, вносимых ими при изменении скольжения СД во всем рабочем диапазоне показала, что без заметной погрешности выражением (3.44) можно пренебречь, а замену выражения (3.45) постоянной величиной, равной 1, следует учитывать введением (прибавлением) к углу  $\theta$  поправку

$$\Delta \theta = \arctg S T_{ad}' - \arctg S T_{ad}. \quad (3.46)$$

Другим источником погрешности при измерении угла  $\theta$  является

ся погрешность, обусловленная изменением индуктивного сопротивления  $X_f$  обмотки возбуждения вследствие насыщения магнитопровода ротора. Эта погрешность устраняется введением блока нелинейности, воспроизводящей зависимость  $X'_f(i_f)$  от величины тока  $i_f$  обмотки возбуждения [22]. Во многих случаях с целью упрощения электронных схем указанной зависимостью можно пренебречь, произведя замену  $X'_f$  не оторой постоянной величиной  $\bar{X}_f$ , которая, как показали эксперименты, должна быть принята близкой к индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки возбуждения.

Таким образом, с учетом изложенного, для воспроизведения на электронных схемах целесообразно использовать следующую упрощенную зависимость

$$\psi_d = u_s \cos \theta \approx \frac{1}{p} (u_f - R_f i_f - \bar{X}_f p i_f) \frac{X_d}{X_{ad}} = - \frac{X_d}{X_{ad}} \cdot \frac{e_s}{p}, \quad (3.47)$$

где

$$e_s = u_f - R_f i_f - \bar{X}_f p i_f = - \frac{X_{ad}}{X_d} p \psi_d = \frac{X_{ad}}{X_d} u_s \sin \theta \quad (3.48)$$

— значение э.д.с., наводимой в обмотке возбуждения вращающимся полем статора.

Основной погрешностью при технической реализации зависимостей (3.47) или (3.43) является погрешность выполнения интегрирования. В процессе работы СД происходит изменение активного сопротивления  $R_f$  обмотки возбуждения вследствие изменения ее температуры, вытеснения тока, а также возникают погрешности в изменении тока  $i_f$ . Это приводит к тому, что значение э.д.с.  $e_s$  определяется с погрешностью, величина которой реально непредсказуема. Тогда при интегрировании  $e_s$  согласно (3.47) возникает прогрессирующая (накапливающая во времени) погрешность в определении  $\psi_d$ . Практически установлено, что после подачи в обмотку возбуждения, приводящего к ее нагреву, погрешность в определении  $\psi_d$  достигает 100% уже через 3–5 с. Данная погрешность устраняется введением периодической коррекции, описанной в [22]. Ниже приведен более простой и технологический вариант периодической коррекции.

Схема устройства измерения угла  $\theta$  по значениям напряжения  $u_f$  и тока  $i_f$  обмотки возбуждения приведена на рис. 3.15. Схема содержит блоки формирования э.д.с.  $e_s$  на усилителе 1, блок интегрирования на усилителе 2 и блок масштабирования на усилителе 3 и

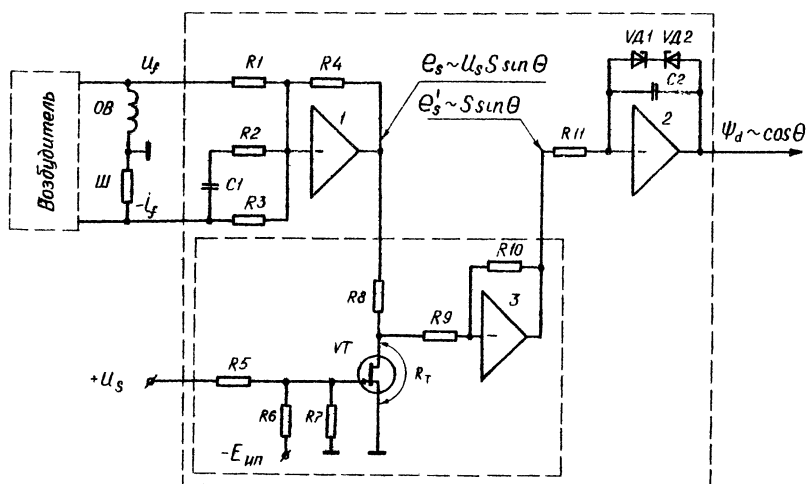


Рис. 3.15. Схема устройства бесконтактного измерения угла  $\theta$  синхронного двигателя.

транзисторе VT. Без учета блока масштабирования работает схема следующим образом. На усилителе I согласно выражения (3.48) из значений  $U_f$  и  $i_f$ , снимаемых, соответственно, с колец обмотки возбуждения и шунта III, формируется э.д.с.  $e_s$ . Достаточно при произвольно заданном значении резистора  $R_4$  элементы схемы принять равными

$$R_1 = R_4, \quad R_3 = \frac{R_1}{R_f}, \quad C = \frac{\bar{X}_f}{R_1}, \quad R_2 \ll R_4. \quad (3.49)$$

На усилителе 2 интегрированием  $e_s$  получают согласно (3.47) значение  $\psi_d = U_s \cos \theta$ . Достаточно принять

$$R_{11} C = \frac{X_{ad}}{X_d}. \quad (3.50)$$

Стабилитронами VD1 и VD2 осуществляется коррекция блока интегрирования. При этом падение напряжения в обоих направлениях на последовательно включенных стабилитронах должно быть равно амплитуде потокоосцепления статора  $\Psi = U_s$ , пропорционального напряжению сети (3.47).

Если самозапуск СД сопровождается посадкой напряжения сети  $U_s$ , то амплитуда сигнала  $E_s$  также будет изменяться пропорционально  $U_s$ . Для устранения зависимости  $E_s$  от  $U_s$  введен блок масштабирования. На вход блока поступает сигнал  $E_s$ , зависящий от  $U_s$ , а на выходе образуется независящий от  $U_s$  сигнал  $E'_s$ . Для работы блока масштабирования достаточно выбрать параметры схемы из соотношения

$$\left(1 + \frac{R_6}{R_5} + \frac{R_6}{R_7}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{70}}{R_8} + \frac{R_{70}}{R_9}\right) = \frac{E_{нп}}{U_{отс}}, \quad (3.51)$$

где  $R_{70}$  — сопротивление исток-сток открытого транзистора VT;  $U_{отс}$  — напряжение отсечки транзистора VT.

Кроме этого, параметры схемы должны быть такими, чтобы напряжение между истоком и стоком транзистора VT не превышало бы 0,2 В.

Описанное устройство позволяет измерять угол  $\theta$  только при вращении с асинхронной скоростью. При синхронной скорости с постоянным углом  $\theta$  отсутствует коррекция блока интегрирования и его сигнал может быть равен любому возможному значению. Погрешность измерения угла  $\theta$  с учетом насыщения составляет  $5^\circ$ , без учета насыщения —  $10^\circ + 15^\circ$ . Эти погрешности в процессе самозапуска с применением оптимальных управлений возбуждением допустимы, так как практически не ведут к уменьшению электромагнитного момента СД при разгоне. Одновременно с помощью устройства возможно измерять скольжение  $S$  по периоду сигнала потокоцепления  $\Psi_\alpha$  или сигнала в.д.с. скольжения  $E_s$ .

### 3.7. Устройство самозапуска синхронного двигателя

Функциями устройства самозапуска выпавшего из синхронизма двигателя, в соответствии с изложенным, являются гашение магнитного поля обмотки возбуждения, разгон и синхронизация. На этапе разгона в общем случае требуется подача управляемого возбуждения с целью повышения асинхронного момента. Характерным для всех способов управления возбуждением является наличие и достаточность двух значений углов коммутации (на включение максимального и минимального напряжения возбуждения), что подтверждается выражениями (3.34 + 3.36). С целью получения наибольшего эффекта в повышении асинхронного момента в широком диапазоне скольжений оказы-



вается, как видно из рис. 3.8, целесообразным на разных интервалах скольжений применять различные способы управления возбуждением. Это требует изменения структуры возбудителя в функции скольжения.

В связи с отмеченными особенностями общая структура устройства самозапуска может быть представлена в виде, изображенном на рис. 3.16. На рисунке обозначены: 1 - возбудитель, 2 - устройство измерения угла  $\theta$  и скольжения  $S$ , 3 и 4 - формирователи углов коммутации на включение максимального напряжения возбуждения и его отключение, 5 - блок логики для управления структурой возбудителя и 6 - выходные формирователи импульсов. Элементной базой устройства самозапуска являются интегральные микросхемы. Конкретные схемы отдельных блоков определяются выполняемыми функциями устройства самозапуска, требованиями точности, надежности и другими эксплуатационными показателями, типами применяемых элементов. Ниже приводятся схемы апробированных блоков для устройства самозапуска, осуществляющего гашение поля на активное сопротивление, разгон с применением пускового сопротивления и циклической подачи однополярного напряжения возбуждения, чередующегося с гашением поля на сопротивление, и точную синхронизацию по углу  $\theta$  и скольжению  $S$ .

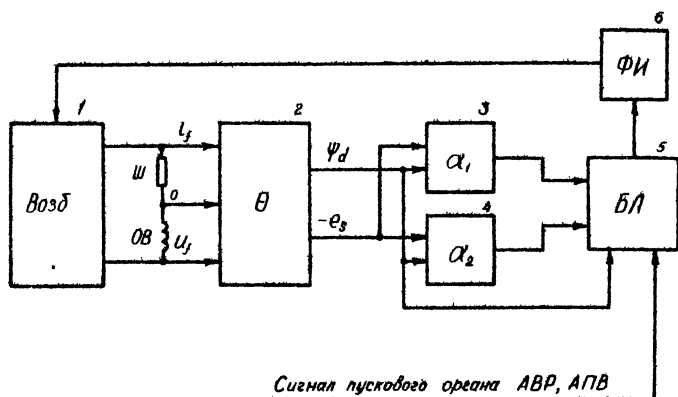


Рис. 3.16. Функциональная схема устройства самозапуска СД.

Схема возбудителя устройства самозапуска содержит источник питания, активное сопротивление, используемое при гашении поля обмотки возбуждения и при разгоне СД, и тиристоры узла коммутации, с помощью которых осуществляются необходимые переключения. Источник питания и активное сопротивление имеются в схемах всех серийных возбудителей [18].

На рис. 3.17 приведена схема возбудителя с узлом коммутации с последовательно включенным коммутирующим конденсатором  $C2$ . В нормальном режиме работы СД сигналом  $U_{yc}$  открыт силовой тиристор ТС и на обмотку возбуждения ОВ подается напряжение  $U_B$  с выпрямителя. При выбеге снимается сигнал  $U_{yc}$ , а импульсом  $U_{yx}$  открывается коммутирующий тиристор ТК, и ОВ оказывается замкнутой на пусковое сопротивление  $R_n$ . Происходит гашение поля. После восстановления питания СД происходит его разгон с пусковым сопротивлением  $R_n$ . При разгоне с применением циклического возбуждения попеременно открываются тиристоры ТС (подается возбуждение) и ТК (происходит гашение поля). С момента достижения двигателем подсинхронной скорости удерживается постоянно открытым ТС, снимает-

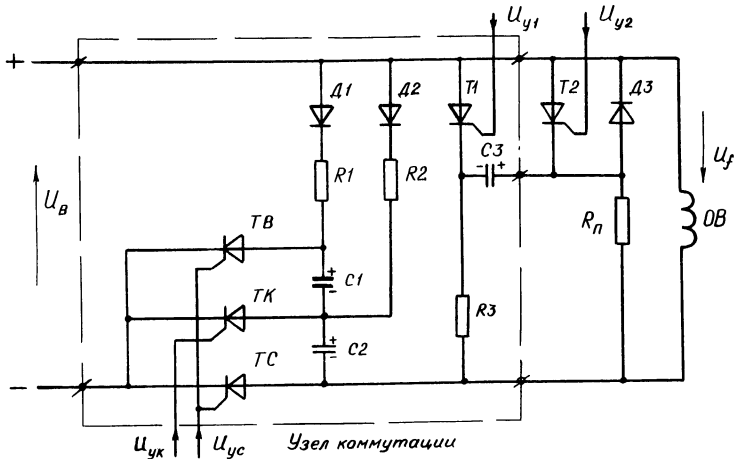


Рис. 3.17. Узел коммутации для циклического возбуждения с гашением поля на сопротивление (схема с последовательной коммутирующей емкостью).

ся сигнал  $U_{y2}$  и импульсом  $U_{y1}$  открывается тиристор Т1, что приводит к закрытию тиристора Т2 емкостью С3 и отключению пускового сопротивления  $R_n$ . Заряд всех коммутрующих емкостей С1 ÷ С3 происходит от напряжения  $U_b$ . Тиристор вспомогательный ТВ служит для подключения к тиристору ТК запирающей его емкости С1. Силовыми элементами схемы являются тиристоры ТК, ТС, Т1. С помощью этого узла коммутации можно точно управлять цепью возбуждения СД при самозапуске. Недостатком является наличие постоянно обтекаемого током возбуждения тиристора ТС, что требует принятия мер по его охлаждению.

На рис. 3.18 дана схема возбудителя с узлом коммутации с параллельно включенным коммутующим конденсатором С1. В этой схеме в цепи подачи возбуждения имеется только коммутующий тиристор ТК. По сигналу  $U_{yb}$  устройством управления выпрямителем возбудителя (УУВ) открываются его тиристоры ТВ1 ÷ ТВ3 и на обмотку возбуждения СД подается напряжение  $U_b$ . Закрытие возбудителя производится в два этапа. Сначала снимается сигнал  $U_{yb}$ , что приводит к прекращению поступления управляющих сигналов на тиристоры ТВ1 ÷ ТВ3. Затем через промежуток времени, когда напряжение на фазе трансформатора Тр, в которой находится последний из открытых тиристоров ТВ1 ÷ ТВ3, изменит свою полярность на противоположную,

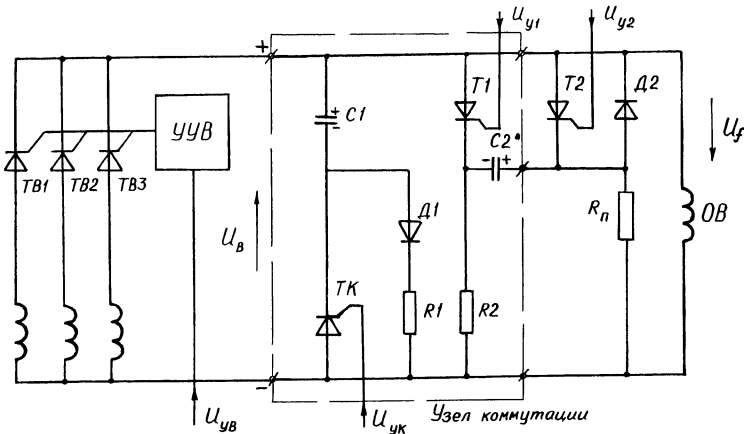


Рис. 3.18. Узел коммутации для циклического возбуждения с гашением поля на сопротивление (схема с параллельной коммутующей емкостью).

подается сигнал  $U_{yk}$  на тиристор ТК. Тогда зарядом конденсатора С1 через тиристор ТК закрывается выпрямитель, и обмотка возбуждения оказывается замкнутой на пусковое сопротивление  $R_n$ . Гашение поля при выбеге происходит на сопротивление  $R_n$ . По сравнению с предыдущей схемой этот узел коммутации имеет то преимущество, что в нем отсутствует силовой тиристор ТС. Однако точность управления цепью возбуждения может быть ниже за счет введения указанной задержки времени, предшествующей открытию тиристора ТК.

В описанных возбудителях с целью их упрощения при разгоне пусковое сопротивление  $R_n$  постоянно подключено к обмотке возбуждения. При включенном возбудителе по сопротивлению протекает ток, величина которого составляет не более 20% от номинального тока возбуждения. Это не приводит ни к перегрузке возбудителя, рассчитанного на форсированный режим, ни к значительному повышению выделения тепла в пусковом сопротивлении.

Устройство измерения угла  $\theta$  и скольжения  $S$  выполняется по схеме, приведенной на рис. 3.15.

Назначением формирователей 3 и 4 является получение сигналов для управления тиристорами узла коммутации возбудителя при определенных положениях ротора, задаваемыми углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 3.10) Схема формирователя приведена на рис. 3.19. Для настройки формирователя необходимо аппроксимировать графики углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  функцией вида

$$\alpha = -K_\alpha \arctg s T_\alpha, \quad (3.52)$$

где  $K_\alpha$  и  $T_\alpha$  — постоянные аппроксимации.

Работает устройство следующим образом. Величина напряжения  $U_{\delta x}$  в точке "а" при значениях сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , равных (в относительных единицах)

$$R1 = T_\alpha, \quad R2 = \frac{X_{ad}}{X_d}, \quad (3.53)$$

с учетом (3.48) составляет

$$U_{\delta x} = \frac{\frac{X_{ad}}{X_d} \psi_d - T_\alpha e_s}{\frac{X_{ad}}{X_d} + T_\alpha} = \frac{u_s \sqrt{1 + (s T_\alpha)^2}}{1 + \frac{X_d}{X_{ad}} T_\alpha} \cos(\theta + \varphi), \quad (3.54)$$

где

$$\varphi = \arctg s T_\alpha. \quad (3.55)$$

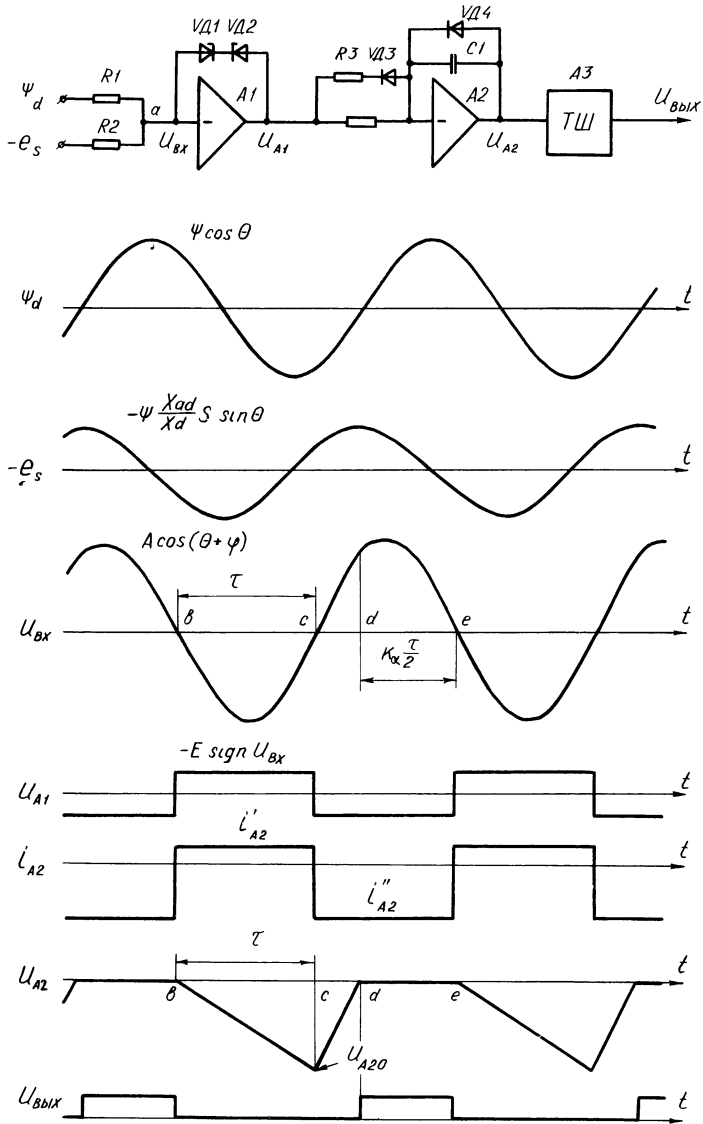


Рис. 3.19. Формирователь углов коммутации по значениям потокосцепления  $\psi_d$  и э.д.с. скольжения  $e_s$ .

На усилителе А1 собран компаратор, выделяющий знак напряжения с инвертированием

$$U_{A1} = -U_{cm} \operatorname{sign} U_{bx} = -U_{cm} \operatorname{sign} \{ \cos(\theta + \varphi) \}, \quad (3.56)$$

где  $U_{cm}$  — напряжение стабилизации стабилитронов  $VD1$  и  $VD2$ .

Это напряжение затем подается на интегратор А2. Выходной сигнал  $U_{\delta b/x}$  формирователя образуется на триггере Шмитта А3 в виде напряжения положительной полярности в момент обращения  $U_{A2}$  в нуль.

Если  $K_A = 1$ , то выходной сигнал  $U_{\delta b/x}$  должен быть сформирован при  $\theta = \alpha = -\varphi$ . Из графиков сигналов видно, что в этот момент напряжение  $U_{bx}$  максимально (3.54), т.е. величина отрезка  $de$  равна половине полупериода  $\tau$  изменения тока в обмотке возбуждения. Если  $K_A \neq 1$ , то сигнал  $U_{\delta b/x}$  должен быть сформирован при  $\theta = -K_A \varphi$ , т.е. при отрезке  $de$  равном  $K_A \tau / 2$ . Отношение отрезка  $cd$  к отрезку  $bc$  есть величина постоянная, не зависящая от скольжения,

$$\frac{cd}{bc} = \frac{\tau - K_A \tau / 2}{\tau} = 1 - \frac{K_A}{2}. \quad (3.57)$$

Обращение сигнала  $U_{A2}$  в нуль в точке  $d$  происходит следующим образом. На интервале  $bc$  на интегратор А2 через сопротивление поступает ток  $I'_{A2}$ , в результате чего время  $\tau$  преобразуется в пропорциональное ему напряжение  $U_{A20}$ . А на интервале  $cd$  током  $I''_{A2}$ , протекающем через сопротивления  $R3$  и  $R4$ , величина напряжения  $U_{A2}$  уменьшается от  $U_{A20}$  до нуля, если токи  $I'_{A2}$  и  $I''_{A2}$  относятся как

$$\frac{I'_{A2}}{I''_{A2}} = 1 - \frac{K_A}{2}. \quad (3.58)$$

Для выполнения этого равенства достаточно взять сопротивления  $R3$  и  $R4$  удовлетворяющим соотношению

$$\frac{R3}{R3 + R4} = 1 - \frac{K_A}{2}. \quad (3.59)$$

Таким образом, для формирования углов коммутации согласно выражения (3.52) достаточно в схеме установить сопротивления  $R1 + R4$ , рассчитанные по (3.53) и (3.59), а величину емкости  $C1$  выбрать из условия, чтобы во время работы усилитель А2 не входил в насыщение.

Элементом устройства самозапуска, программирующим его рабо-



буждения, амплитуда пилообразного напряжения возрастает настолько, что по сигналу, снимаемому с резистора  $R_4$ , триггер Т2 переводится в состояние "1". В результате на входы элементов 7 и 8 от триггеров Т1 и Т2 поступают "1". Тогда по сигналам от формирователей коммутации "Возб" - подачи возбуждения и "Гаш" - гашения поля - триггер Т3 периодически изменяет свое состояние и на выходе элемента И1 чередуются сигналы "1" - гашения поля и "0" - подачи возбуждения. При достижении значения скольжения, при котором должна производиться синхронизация двигателя, сигналом пилообразного напряжения с резистора  $R_3$  устанавливается триггер Т1 в состояние "0". В результате этого элементом 7 больше не пропускаются импульсы на гашение поля, и триггер Т3 постоянно находится в состоянии "1", а на выходе элемента И1 устанавливается неизменно "0", по которому подается на СД постоянное напряжение возбуждения.

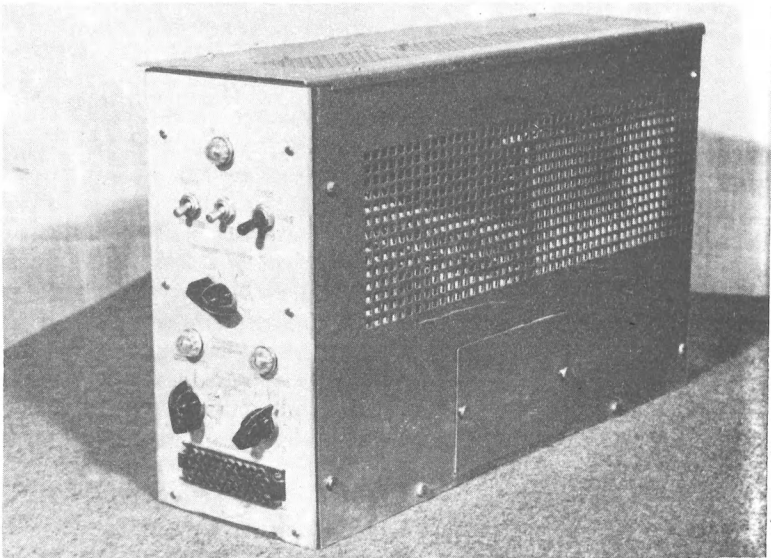


Рис. 3.21. Общий вид устройства самозапуска



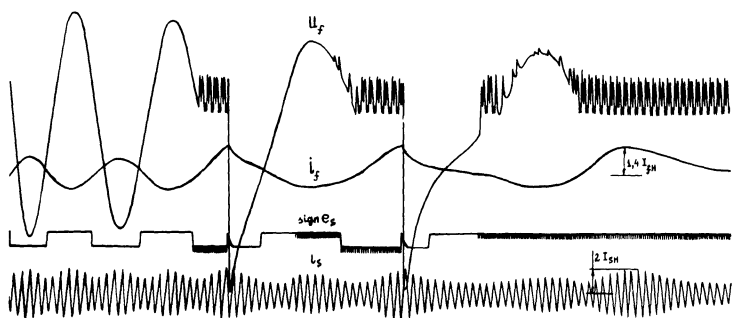
Формирователи импульсов 6 управления тиристорами возбудителя выполняются по общеизвестным схемам [24].

В описанном устройстве самозапуска очевидно, что блоки 2 измерения угла  $\theta$  и скольжения  $S$  и формирователи 3 и 4 углов коммутации будут неизменными для любого иного способа управления разгоном двигателя. Для нормальной работы схемы требуется сохранение ее питания при глубоких посадках напряжения сети. В связи с этим блок питания устройства целесообразно выполнить по схеме импульсного стабилизатора напряжения [24].

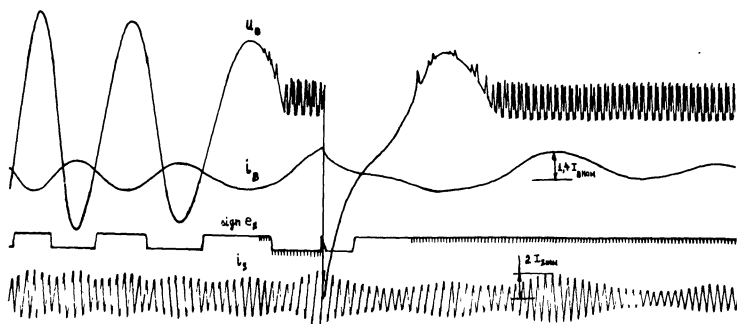
Работа устройства самозапуска иллюстрируется осциллограммами самозапуска (рис. 3.22) номинально загруженного тихоходного СД типа ДСКП-260/24-36, служащего приводом аммиачного поршневого компрессора типа 4АГ. На осциллограмме обозначено:  $u_f$ ,  $i_f$  - напряжение и ток возбуждения,  $i_s$  - ток статора,  $sign e_s$  - знак э.д.с. скольжения  $e_s$ . На сигнал  $sign e_s$  наложены импульсы управления тиристорами узла коммутации возбудителя - одиночные импульсы на гашение поля и последовательность импульсов на включение возбуждения. Моментам смены знака  $sign e_s$  соответствует  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 180^\circ$  - совпадение по направлению магнитных полей статора и ротора. При самозапуске использовано пусковое сопротивление кратности 5.

Время гашения поля обмотки возбуждения на сопротивление до значения тока обмотки, равном  $0,5 I_{fH}$  составило 0,08 с. При перерыве питания 1,8 с скольжение СД увеличилось до 0,5. При повторном включении СД от скольжения 0,5 до скольжения 0,09 разгон осуществляется с пусковым сопротивлением в течение 4,6 с. От скольжения 0,09 до скольжения 0,04 в течение 1,1 с подавалось циклическое возбуждение напряжением номинальной величины, чередующееся с гашением поля. При скольжении 0,04 согласно зоны синхронизации (рис. 3.14) было подано постоянное номинальное возбуждение, что привело к вхождению двигателя в синхронизм. Самозапуск же номинально загруженного СД по заложенной в возбудителе двигателя схеме разгона с пусковым сопротивлением и подачей возбуждения с выдержкой времени оказывается неуспешным. Таким образом, эффективным является самозапуск с управлением возбуждением при разгоне СД и синхронизацией с включением возбуждения при благоприятном положении ротора.

Об эффективности оптимального управления возбуждением свидетельствуют осциллограммы, представленные на рис. 3.23, где повышение мгновенного значения электромагнитного момента достигает 40%.

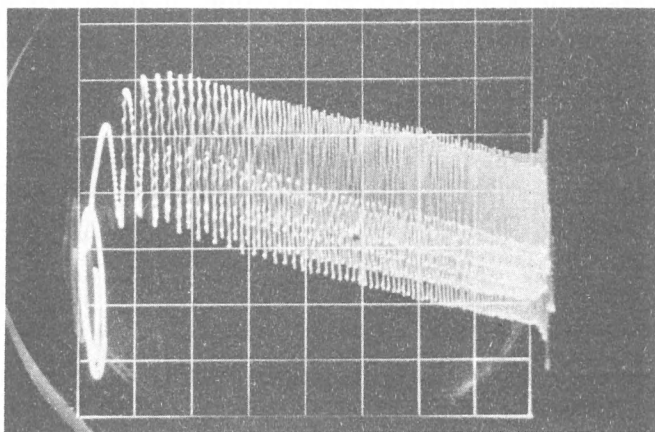


а/

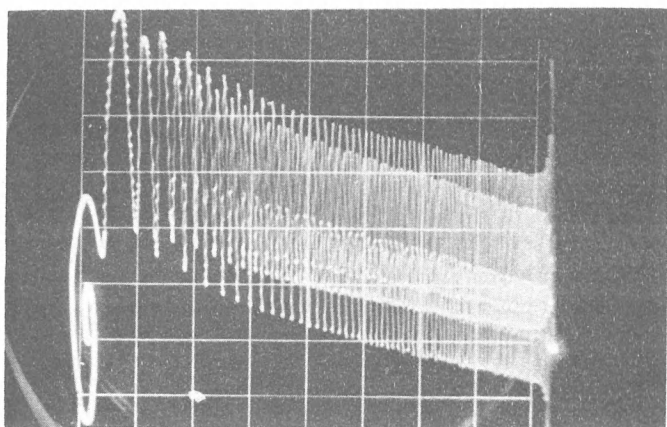


б/

Рис. 3.22. Осциллограммы самозапуска синхронного двигателя типа ДСКП-260/24-36 при подаче циклического возбуждения со скольжений 0,09 (а) и 0,07 (б) и включении возбуждения на синхронизацию при скольжении 0,04 (а, б).



а)



б)

Рис. 3.23. Мгновенные значения электромагнитного момента синхронного двигателя при разгоне с замкнутой на пусковое сопротивление обмоткой возбуждения (а) и с подачей оптимального возбуждения (б)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов К.Б. Исследование режимов самозапуска электродвигателей предприятий с непрерывным технологическим процессом. Автореф. канд. дисс. - М.: МЭИ, 1975 - 20 с.
2. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергия, 1972. - 416 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 528 с.
4. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем: (Электротехническая часть) / Минэнерго СССР. - М.: Энергоиздат, 1981. - 632 с.
5. Рубцов В.В., Заруди М.Е. АВР при наличии синхронных двигателей. Промышленная энергетика, 1957, №12, с. 17.
6. Методические указания по обеспечению самозапуска асинхронных электродвигателей напряжением до 1000 В на предприятиях химической промышленности. - М.: НИИТЭХИМ, 1971. - 50 с.
7. Куприц Ю.А., Емельянова Р.Ф. Опыт повышения надежности самозапуска заменой сердечника контактора. - Промышленная энергетика, 1972, №9, с. 13.
8. Венсловас А.И. О некоторых устройствах автопуска двигателей напряжением до 1000 В. - Промышленная энергетика, 1976, №5, с. 20-21.
9. Ибрагимов И.Г., Невзоров В.И., Шаин А.Д. Бесконтактное устройство автоматического повторного включения асинхронного двигателя. - Промышленная энергетика, 1973, №12, с.
10. Мамаев В.Ф. Устройство повторного включения электродвигателя. - Промышленная энергетика, 1975, №9, с. 30.
11. А.с. 985908 (СССР). Устройство для пуска асинхронного электродвигателя. (Кемеровский технологический институт). Авт. изобрет. Носов К.Б., Баженов В.П. и др. - Заявл. 06.05.80, №2920337/24-07; Опубл. в Б.И. 1982, №48; МКИ H02P 1/26.
12. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1978. - 415 с.
13. Голоднов Ю.М., Хоренян А.Х. Самозапуск электродвигателей. - М.: Энергия, 1974, - 144 с.
14. Соколов Н.И., Сумцов И.А., Кременецкий А.М. Ресинхрониз-

зация синхронных двигателей многократной форсировкой возбуждения. - Электричество, 1975, №5, с. 43-48.

15. Урусов И.Д., Камша М.М. Анализ некоторых способов улучшения асинхронных характеристик синхронных двигателей для обеспечения их синхронизации. - Изв. АН СССР. Энерг. и трансп., 1979, №4, с. 83-91.

16. Бабурин В.Б., Сумцов И.А. О повышении продольного электромагнитного момента машин переменного тока в асинхронном режиме/ Труды ВНИИЭ. - М.: Энергия, 1979, №57, с. 65-71.

17. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. - М.: Энергия, 1977. - 216 с.

18. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 128 с.

19. Урусов И.Д., Камша М.М. Об аналитических критериях успешной синхронизации синхронного двигателя при асинхронном пуске. - Изв. АН СССР. и трансп., 1977, №6, с. 58-69.

20. А.с. 953592 (СССР). Устройство для непрерывного измерения синуса угла  $\theta$  синхронной машины (Кемеровский технологический ин-т; Авт. изобрет. Дворак Н.М., Носов К.Б., Брагинский В.И., Бурцев Ю.В. - Заявл. 25.03.81, №3266409/18-21; Оpubл. в Б.И. 1982, №31; МКИ G 01R 25/00.

21. Иванов А.К. Бесфильтровый датчик угла между напряжением сети и э.д.с. синхронных машин. - Электр. станции, 1977, №5, с. 72-73.

22. А.с. 1049841 (СССР). Способ бесконтактного измерения угла  $\theta$  синхронного двигателя (Кемеровский технологический ин-т; Авт. изобрет. Федоров А.А., Носов К.Б., Дворак Н.М. - Заявл. 12.05.82, № 3436681; Оpubл. в Б.И. 1983, №39; МКИ G 01R 31/34

23. Назимов В.Б. Синхронный привод с вентильно-конденсаторной системой возбуждения. - Пром. энергетика, 1984, №1, с. 34-37.

24. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. Чиженко Н.М. - К.: Техника, 1978. - 447 с.

25. Носов К.Б., Дворак Н.М. О синхронизации синхронного двигателя при самозапуске с номинальной нагрузкой. - Изв. вузов СССР - Электромеханика, 1984, №12, с. 71-76.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Г л а в а п е р в а я. Критическое время перерыва электроснабжения промышленных предприятий . . . . .	9
I.1. Понятие критического времени . . . . .	9
I.2. Глубокие понижения напряжения на зажимах потребителей . . . . .	II
I.3. Внезапные исчезновения питающего напряжения на выводах электродвигателей . . . . .	15
I.4. Факторы, определяющие допустимую длительность перерывов электроснабжения технологических линий и агрегатов . . . . .	17
I.5. Методика расчета критического времени перерыва электроснабжения . . . . .	19
I.6. Способы определения критического времени . . . . .	25
Г л а в а в т о р а я. Средства и способы обеспечения самозапуска двигателей напряжением до 1000 В . . . . .	28
2.1. Общие положения . . . . .	28
2.2. Автоматическое повторное включение электродвигателей . . . . .	36
2.3. Групповое АПВ электродвигателей . . . . .	40
2.4. БАПВ электродвигателей с самоподхватом . . . . .	43
2.5. Каскадное БАПВ по уровню восстанавливающегося напряжения сети . . . . .	48
2.6. Способ активного воздействия на якорь контактора (МП) в бестоковую паузу системы электроснабжения . . . . .	52
2.7. Способы бестокового удержания якорей контакторов (МП) во включенном состоянии в нормальных и переходных режимах . . . . .	58
2.8. Методика расчета величин остаточных напряжений и максимально допустимой суммарной мощности двига-	

телей напряжением до 1000 В при их самозапуске .	60
2.9. Определение критерия максимально возможной суммарной мощности самозапускаемых двигателей в зависимости от применяемых способов обеспечения самозапуска . . . . .	68
2.10. Устройство активного воздействия на якорь кон-тактора (МП) в бестоковую паузу . . . . .	72
<b>Г л а в а   т р е т ь я . Самозапуск двигателей напряжением выше 1000 В . . . . .</b>	<b>77</b>
3.1. Общие положения . . . . .	77
3.2. Удержание двигателя в синхронизме при кратковременных нарушениях питания . . . . .	81
3.3. Гашение магнитного поля обмотки возбуждения .	85
3.4. Способы разгона синхронного двигателя до подсинхронной скорости . . . . .	93
3.5. Определение моментов включения возбуждения при вхождении двигателя в синхронизм под нагрузкой .	100
3.6. Измерение внутреннего угла синхронного двигателя . . . . .	107
3.7. Устройство самозапуска синхронного двигателя .	111
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>123</b>

Носов К.Б., Дворак Н.М.

Н84 Средства и способы самозапуска электродвигателей. - Кемеровское кн. изд-во, 1985. - 128 с.  
45 к. 2000 экз.

В книге рассказывается о самозапуске электродвигателей после кратковременных исчезновений напряжения питающей сети.

Н 2302030000  
МІ45(03) - 85

Без объявления.

ББК 3І.26І.6.



Константин Борисович Носов  
Николай Маркович Дворак

СРЕДСТВА И СПОСОБЫ  
САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Редактор Э.В. У г р ю м о в  
Художественный редактор  
В. А. К р а в ч у к  
Технический редактор Г.Н. М а н о х и н а

Подписано к печати 19.03.85. ОПО7265. Формат  
84 x 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 1. Печать  
офсетная. Усл. печ. л. 6,72. Усл. кр.-отт. 7,04.  
Уч.-изд. л. 7,89. Тираж 2000 экз. Заказ 8464.

Цена 45 коп. Заказное.

Кемеровское книжное издательство.

Полиграфкомбинат.

Адрес издательства и типографии:  
650059, г. Кемерово, ул. Ноградская, 5.

