

**Министерство высшего и среднего специального
образования БССР**

**БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

Г.Л. ВЕЛКЕ

**ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНОЧНЫХ ЛИНИЙ**

(Об.232. Электрооборудование)

А в т о р е ф о р а т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Минск 1970 г.

Работа выполнена на кафедре электрических машин и электропривода Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и в Минском специальном конструкторском бюро автоматических линий Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности СССР.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Л.Б.ГЕЙЛЕР

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И.В.ХАРИЗМЕНОВ,
кандидат технических наук, доцент Г.А.САПУН

Ведущее предприятие -

Минский завод автоматических линий

Автореферат разослан " ____ " _____ 1970г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1970г.

на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

О дне защиты будет сообщено в газете "Вечерний Минск".

Отзывы (в двух экземплярах, заверенных и скрепленных печатью) просим направлять по адресу: г.Минск, 27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт. Ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета,
кандидат технических наук

Л.Червинский Л.Червинский

Автоматизация производственных процессов является одним из главных, решающих средств, обеспечивающих прогресс в развитии народного хозяйства. Особую роль в техническом прогрессе играет машиностроение. От темпов автоматизации этой ведущей отрасли промышленности в значительной мере зависит успех технического перевооружения всего народного хозяйства.

Широкое применение автоматических станочных линий на предприятиях машиностроения дает большой экономический эффект, значительно повышает производительность труда и улучшает качество продукции.

В последние годы темпы автоматизации значительно ускорились. Если в начале 1961 года в машиностроении нашей страны насчитывалось около 650 автоматических линий, то в 1965 году их было уже 2965.

В целях удовлетворения возрастающих потребностей в автоматических линиях Совет Министров СССР в сентябре 1969 года принял постановление об ускоренном развитии мощностей по их производству для предприятий автомобильной, тракторной и подшипниковой промышленности, сельскохозяйственного машиностроения и других отраслей народного хозяйства. Согласно этому постановлению производство автоматических линий к 1974 году увеличится в 4 раза.

Автоматические линии создаются на базе универсальных, специальных и агрегатных станков. Принцип действия автоматических линий, их структура и компоновка определяются типом обрабатываемой детали, видом технологической обработки и требуемой производительностью.

В последние годы при автоматизации технологических процессов в машиностроении все более широкое применение находят силовые узлы с электромеханическим (асинхронным) приводом. Управление работой агрегатов автоматической линии и согласование их действия выполняются средствами электроавтоматики.

Особенностью автоматических линий, используемых в массовом производстве, является интенсивная работа их оборудования. Обслуживающий персонал, состоящий из наладчика и одного - двух операторов, ведет непрерывный контроль за работой большого количества станочного и вспомогательного оборудования, состоянием режущих

инструментов и качеством обрабатываемых деталей, а при необходимости осуществляет оперативное вмешательство.

Напряженная работа персонала обуславливает необходимость вовлечь на оборудование выполнение максимально возможного количества функций, освободив человека для выполнения трудно автоматизируемых операций. Возникает задача введения автоматических устройств, контролирующих основные параметры работы узлов и механизмов и предотвращающих работу механизмов и линий в целом в ненормальных и аварийных режимах.

Среди таких устройств видное место принадлежит защите электроприводов, которая предотвращает выход из строя оборудования и уменьшает время простоев, способствует повышению надежности, долговечности и производительности автоматических линий.

Предстоящее резкое увеличение выпуска автоматических линий делает особенно актуальной задачу всестороннего исследования работы электрооборудования, в том числе защиты — одного из его важнейших элементов.

Реферируемая диссертационная работа посвящена вопросам защиты асинхронных электроприводов автоматических станочных линий. Исследования в этом направлении, проводимые при участии автора в течение ряда лет в Минском специальном конструкторском бюро автоматических линий, являются частью работ бюро по созданию надежных систем управления автоматических линий.

При комплексном подходе к решению этих вопросов под защитой электропривода следует понимать защиту всех его компонентов: двигателей, силовых цепей, цепей управления и приводимых механизмов. Эффективность работы защиты двигателя от перегрузки достигается лишь при правильном выборе двигателя по мощности.

Специфику работы электроприводов автоматических линий определяют следующие факторы:

1. Интенсивная работа механизмов в циклических режимах.
2. Необходимость обеспечения заданной производительности.
3. Малое количество и напряженная работа обслуживающего персонала.
4. Применение асинхронных короткозамкнутых двигателей.

5. Малая мощность и большое количество двигателей.
6. Определенность циклов и стабильность нагрузок.
7. Наличие протяженных электрических коммуникаций.
8. наличие автоматического управления, преимущественно в функции пути.
9. Большое количество аппаратуры в цепях управления.
10. Стремление к уменьшению габаритных размеров систем управления.

Работы в области теории и практики защиты, проводимые многими организациями, посвящены широкому кругу задач.

Основная цель при решении вопросов защиты в автоматических линиях заключается в том, чтобы на основе учета специфики работы асинхронных электроприводов в линиях выяснить требования к защите и определить рациональные способы и средства удовлетворения этих требований.

Работа состоит из пяти глав, содержание которых кратко излагается ниже.

В первой главе анализируются вопросы нагрева и режимы работы асинхронных электродвигателей в приводах автоматических станочных линий, для которых наиболее характерны циклические режимы работы. При значительной частоте включений проверку по нагреву удобно производить путем сравнения числа включений двигателя в час с допустимым, определяемым нормированными пределами нагрева. Целесообразно ввести понятие допустимого числа пусков ненагруженного двигателя в час Z_d , понимая под этой величиной допускаемое пределами нагрева число пусков в час ненагруженного двигателя без дополнительных маховых масс. При этом предполагается, что двигатель в течение цикла вращается, а каждому последующему пуску предшествует механическое торможение.

Влияние условий, отличных от идеальных, учитывается введением дробного коэффициента условий работы

$$C = C_1 C_2 C_3, \quad (I)$$

определяемого наличием дополнительных маховых масс (C_1), видом переходных процессов (C_2), степени загрузки в статическом режиме (C_3). Этот коэффициент представляет собой отношение

допустимого числа циклов в час при данных условиях работы $Z_{доп}$ к числу Z_c :

$$C = \frac{Z_{доп}}{Z_c} \quad (2)$$

Температура двигателя в рассматриваемом циклическом режиме не превысит допустимую, если удовлетворяется условие

$$Z_{доп} \leq Z_{доп}, \quad (3)$$

где $Z_{доп}$ - число циклов в час при данных условиях работы.

В диссертации проанализирована зависимость величины коэффициента C от различных факторов. Показано, в частности, влияние на величину C отсутствия или наличия в циклическом режиме пауз (соответственно $C_{доп}$ и $C_{пр}$). Получены зависимости

$$C_{доп} = 1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^{\beta} \varepsilon, \quad (4)$$

$$C_{пр} = (1 - \varepsilon)(1 + \alpha)\beta - \varepsilon \left[\left(\frac{P}{P_n}\right)^{\beta} - 1\right]. \quad (5)$$

где ε - относительная продолжительность работы или включения, α - коэффициент потерь, β - коэффициент ухудшения теплоотдачи при заторможенном двигателе, P_n и P - номинальная и действительная мощность двигателя.

В отличие от величины $C_{доп}$ коэффициент $C_{пр}$ определяется не только параметрами режима ($\varepsilon, P/P_n$), но и параметрами двигателя (α, β); при этом $C_{доп} > C_{пр}$, а разность между ними не зависит от степени загрузки двигателя. Даны графические зависимости для определения $C_{доп}$ и $C_{пр}$.

В главе приводится классификация режимов в зависимости от наличия пауз.

Конструкция станочных узлов и узлов других механизмов может предусматривать в периоды между операциями как отключение двигателя, так и вращение механизма (или двигателя) на холостом ходу. Оба варианта встречаются, например, в приводах вращения инструмента силовых узлов агрегатных станков и автоматических линий.

Вопрос о предпочтительности одного из этих режимов решается с учетом многих факторов, однако определяющим критерием являются

энергетические соображения. Из других факторов следует назвать повышение надежности аппаратуры и уменьшение удельного веса вспомогательного времени при отсутствии частых пусков, а также уменьшение количества динамических ударов. Роль этих факторов будет возрастать в связи с тенденцией увеличения скорости резания и повышением производительности. В пользу отключения двигателя говорят такие соображения, как отсутствие соединительных муфт и конструктивное упрощение кинематических цепей.

В работе рассмотрен вопрос о целесообразности отключения двигателя в циклических режимах с точки зрения уменьшения потерь, и получено аналитическое выражение для критерия целесообразности отключения двигателя:

$$\frac{Z_{\text{оос}}}{Z_0} \leq (1-\varepsilon) \left\{ \alpha\beta + \left[\beta + \varepsilon(1-\beta) \right] \left(\frac{P_H}{P_H} \right)^2 - \varepsilon(1-\beta) \left(\frac{P}{P_H} \right)^2 \right\}, \quad (6)$$

где P_H — мощность холостого хода механизма.

Показано, что даже при отсоединении двигателя от механизма на холостом ходу теоретически существует такое сочетание параметров, при котором предпочтительно отключать двигатель. Приведены аналитические и графические зависимости, позволяющие оценить целесообразность отключения двигателя при различных сочетаниях параметров режима и двигателя.

Рассмотрены вопросы нагрева асинхронного короткозамкнутого двигателя при пуске, исходя из представления процесса нагрева как адиабатического и протекающего при неизменном сопротивлении обмоток. Это в большинстве случаев допустимо в связи с кратковременностью процесса пуска.

Для оценки повышения температуры обмотки асинхронного двигателя за время пуска τ получено соотношение

$$\tau = \kappa T_{\text{по}} \sigma_N^2 \left(\frac{I_K}{I_N} \right)^2 \frac{M_H}{M_K} J, \quad (7)$$

где при пуске на холостом ходу

$$J = J_0 = \int_0^1 \frac{1}{p} dv; \quad (8)$$

при пуске с постоянным статическим моментом μ_c

$$T = T_c = \int_0^* \frac{j^2}{\mu - \mu_c} dv; \quad (9)$$

K - коэффициент, равный для изолированных медных проводов 0,005; T_{no} - электрохимическая постоянная времени пуска, пропорциональная маховому моменту привода; d_n - расчетная плотность тока в обмотке; I_n, I_c, M_n, M_c - соответственно токи и моменты номинальные и в точке опрокидывания; j и μ - доливые величины тока и момента по отношению к опрокидывающим значениям; v - долевая величина скорости по отношению к синхронной.

Выражения для интегралов имеют следующий вид:

а) при соответствии механической характеристики двигателя упрощенной формуле Клосса

$$T_c = f(s_n, s_c, \mu_c); \quad T_o = \frac{1}{2s_n}; \quad (10)$$

где s_n - критическое скольжение;

s_c - скольжение при относительном статическом моменте нагрузки μ_c ;

б) при линейной аппроксимации неустойчивой ветви механической характеристики и кривой зависимости тока от скорости (в этом же диапазоне скоростей)

$$T_c = \frac{j_n^2}{1-\mu_n} \left[\left[j_n + \frac{2(j_n-1)(\mu_n-\mu_c)}{1-\mu_n} \right] \ln \frac{1-\mu_c}{\mu_n-\mu_c} - 2(j_n-1) \right] + \frac{(j_n-1)^2}{(1-\mu_n)^3} \left[\frac{(1-\mu_n)^2 - (\mu_n-\mu_c)^2}{2} - 2(\mu_n-\mu_c) \ln \mu_n + (\mu_n-\mu_c)^2 \ln \frac{1-\mu_c}{\mu_n-\mu_c} \right], \quad (11)$$

где j_n, μ_n - относительные величины пусковых тока и момента;

Величина T_o получается при подстановке в соотношение (11) значения $\mu_c = 0$.

Анализ показывает, что отношение T_o/T_n практически не зависит от кратности пускового тока, что позволяет получить зависимость

$$\frac{J_a}{J_c} = \frac{c_n \frac{1}{\mu_n}}{c_n \frac{1 - \mu_c}{\mu_n - \mu_c}} \quad (12)$$

На основании приведенных соотношений получены выражения для предельно допустимого махового момента электропривода, разгон которого вызывает повышение температуры обмоток двигателя до предельной величины.

Вторая глава посвящена анализу критериев выбора структуры и средств защиты силовых цепей в асинхронных электроприводах автоматических станочных линий.

Под силовыми цепями в автоматических линиях понимают распределительную сеть внутри линии от вводного устройства до электродвигателей. Схема силовых цепей, длина и сечение проводов определяются взаимным расположением и количеством силовых узлов, компоновкой электрооборудования, протяженностью автоматической линии. Принципиально защита силовых цепей может осуществляться автоматическими выключателями (автоматами) и плавкими предохранителями, однако в условиях автоматизированного многодвигательного электропривода следует отдать предпочтение автоматам благодаря ряду их существенных преимуществ перед предохранителями (относительная стабильность характеристик, многократность действия, удобство отыскания сработавшего аппарата и меньшее время восстановления работоспособности схемы, меньшая вероятность однофазной работы двигателей, пригодность некоторых типов автоматов для защиты двигателей от перегрузки, возможность отключения цепей при наладке и ремонте).

Расчет схемы защиты состоит в выборе аппаратов, защитные характеристики которых соответствуют перегрузочным характеристикам защищаемого объекта. Если рассматривать совокупность элементов силовой цепи (аппараты и провода) и двигатель как единый объект, то требования к схеме защиты такого объекта удобно представить в виде так называемой обобщенной защитной характеристики схемы.

В главе приведена обобщенная защитная характеристика силовой цепи асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В зависимости от величины кратности тока нагрузки схема защиты должна

обеспечивать следующее: при токах от 0 до некоторого допустимого значения I_{don} - несрабатывание; от тока I_{don} до пускового I_n - срабатывание с обратно зависимой выдержкой времени; от тока I_n до возможного значения ударного тока при переходных процессах I_{acc} - срабатывание с небольшой независимой выдержкой времени; при больших токах - мгновенное срабатывание.

Обеспечение требований обобщенной защитной характеристикой достигается соответствующим выбором защитных устройств и их параметров, схем защиты, а также монтажных и конструктивных решений. Показана степень совпадения защитных характеристик некоторых аппаратов с отдельными участками обобщенной характеристики. Отмечается предпочтительность использования автоматов, имеющих помимо отсечки обратно зависимую характеристику срабатывания. Так, экспериментальные исследования защитных характеристик и характеристик термической устойчивости автоматов типа АП50-3М (с номинальными токами расцепителей от 1,6 до 25 а и током срабатывания 13 I_n) показали, что в зоне небольших кратностей тока (4-10) для автоматов с различными номинальными токами среднее время превышения допустимого нагрева катушек изменяется в среднем от 3 до 70 сек. Следовательно, при использовании автоматов такого типа и возможных малых токах аварийных режимов необходимо иметь аппарат, отключающий цепь за время, меньшее времени термической устойчивости аппарата.

Проведено экспериментальное исследование характеристик автоматов с гидравлическими замедлителями срабатывания типа АК63-3МТ, защитные характеристики которых наиболее близко совпадают с обобщенной. Показано влияние нагрева на характеристику срабатывания, а также выявлены закономерности ложных срабатываний при циклических режимах вследствие накопления в гидравлической системе сигналов о перегрузке.

Методика выбора автомата с электромагнитными расцепителями для защиты одного двигателя (индивидуальная защита) и нескольких двигателей (групповая защита) различна и приведена в табл. I, где $I_{н.д}$ - номинальный ток расцепителей автомата, а $I_{н.д}$ - номинальный ток электродвигателя, а I_{acc} и I_{max} - соответственно действующее и амплитудное значения тока отсечки, а $I_{m.min}$ - наименьшее возможное значение тока короткого замыкания, а $I_{a.min}$ при

Таблица I

Условия выбора	Вид защиты	
	Индивидуальная	Групповая
Выбор номинального тока расцепителей автомата	$I_{н.а} > I_{н.в}$	$I_{н.а} > \sum_{i=1}^n I_{н.д.и}$
Проверка на помехозащищенность (отстройка от ударных токов при пуске и реверсе электродвигателя)	$(1-q) I_{отс} > I_{у.п}$ или $(1-q) I_{отс} > I_{у.р}$	$(1-q) I_{отс} >$ $> \sqrt{2} \sum_{i=1}^p I_{н.д.и} + \sum_{j=1}^m I_{у.и}$
Проверка на отключение минимальных токов короткого замыкания	$(1+q) I_{отс} \leq I_{кз.мин}$	$(1+q) I_{отс} \leq I'_{кз.мин}$

групповой защите рассчитывается для электродвигателя меньшей мощности); n - число одновременно работающих электродвигателей; m - число одновременно пускаемых и реверсируемых противозключением электродвигателей; p - число одновременно работающих электродвигателей к моменту включения m электродвигателей; q - коэффициент, учитывающий абсолютное значение пределов разброса тока отсечки автомата; $I_{у.п}$ и $I_{у.р}$ - соответственно максимальные значения ударного тока при пуске и реверсе электродвигателя при повышенном напряжении сети, а.

Специфика работы автоматов в автоматических линиях такова, что важнейшим требованием при выборе автоматов является обеспечение срабатывания при наименьших возможных токах короткого замыкания. Этот ток возникает при однофазном или двухфазном коротком замыкании в точках, электрически наиболее удаленных от понижающих трансформаторов (например, при замыкании на зажимах электродвигателя между двумя фазами, в которые включены нагревательные элементы тепловых реле).

Для определения тока $I_{кз.мин}$ при двухфазном коротком замыкании построены кривые $I_{кз.мин} = f(\ell_n)$ для силовых трансформаторов различной мощности, где ℓ_n - приведенная длина цепи короткого замы-

кания, представляющая собой сумму длин участков и элементов цепи и равная длине медного провода сечением 10 мм^2 с таким же сопротивлением, как и цепь короткого замыкания.

Общее сопротивление цепи определяется, в основном, сопротивлением проводов и нагревательных элементов тепловых реле. Сопротивления других элементов (обмоток трансформаторов, шинных оборот, катушек автоматов, переходных контактов и т.д.) составляют несколько процентов от общего сопротивления и учитываются с помощью коэффициента запаса K_3 .

Таким образом, приведенная длина может быть выражена в виде

$$l_n = K_3 \left[\sum_{i=1}^n l_{ni} + l_{n(m.p.)} \right], \quad (13)$$

где $l_{ni} = l_i K_{ni}$ — приведенная длина i -го участка цепи, имеющего длину l_i ;

$K_{ni} = \frac{Z_{ni}}{Z_{m.p.}}$ — коэффициент приведения сопротивления проводов;

Z_{ni} — сопротивление i -го участка провода;

$Z_{m.p.}$ — сопротивление i -го участка медного провода сечением 10 мм^2 ;

$l_{n(m.p.)} = \frac{Z_{m.p.}}{Z_{m.p.}}$ — длина провода, эквивалентная сопротивлению нагревательного элемента теплового реле $Z_{m.p.}$.

Анализ кривых $I_{k3 \text{ min}} = f(l_n)$ показывает, что для значений $l_n > 100$ м параметры трансформатора практически не влияют на величину тока $I_{k3 \text{ min}}$. Отмечается, что приведенные длины реальных цепей в автоматических линиях обычно превышают 100 м. Это позволяет для цепей 380 в получить формулу

$$I_{k3 \text{ min}} = \frac{85000}{l_n}. \quad (14)$$

В экспериментальным путем произведена оценка возможных величин ударных токов при пуске и реверсе двигателей серии АОЭ мощностью до 10 квт и приведена таблица ударных токов. Напряжение на обмотку статора подавалось при переходе через нуль одного из фазных напряжений.

В работе анализируется влияние на выбор защиты различных монтажных и конструктивных решений. Отмечено, что групповая защита

обеспечивает необходимые электрические и технологические блокировки и позволяет уменьшить количество защитных аппаратов и площадь панелей шкафов управления. Площадь панелей, занятая автоматами, при групповой защите электродвигателей силовых узлов в автоматических линиях уменьшается на 20%. Показано, что компоновка электрооборудования автоматических линий определяет структуру защиты силовых цепей, во многих случаях обуславливая необходимость секционирования. Указана специфика выбора вводных и секционных автоматов.

В третьей главе рассмотрены особенности защиты двигателей от перегрузки в автоматических станочных линиях. Основной причиной выхода из строя электродвигателя является ускоренный износ изоляции вследствие повышения температуры, вызванного чаще всего возрастанием тока. В соответствии с этим защитные устройства реагируют, в основном, на увеличение температуры или тока и могут быть разбиты на две большие группы: устройства температурной защиты (обычно встроенные) и устройства токовой защиты (обычно вынесенные). Приведена примерная классификация защитных устройств по принципу действия и расположению чувствительного элемента.

Для защиты от перегрузки асинхронных короткозамкнутых двигателей в автоматических линиях целесообразно использовать тепловые биметаллические реле. В пользу такого решения говорят следующие факторы:

1. Большое количество и малая мощность двигателей в автоматических линиях исключают применение встроенных защит. Например, в продукции Минского завода автоматических линий из общего количества 14500 двигателей (за некоторый период времени) только 6% составили двигатели мощностью свыше 10 квт (77% - до 4 квт, 94% - до 10 квт).

2. Автоматические линии предназначены для обработки определенных одной или нескольких деталей и характеризуются постоянством режимов резания. Постоянство циклов обработки и относительная стабильность нагрузок позволяют использовать тепловые реле для защиты двигателей в циклических режимах (несмотря на различие постоянных времени нагрева реле и двигателя).

3. В станочных электроприводах такой недостаток вынужденной защиты (в частности, тепловой), как различие температуры окружающей среды и двигателя, играет второстепенную роль. В то же время серийный выпуск тепловых реле с номинальными токами, перекрывающими диапазон токов двигателей в автоматических линиях создает определенные возможности при выборе реле, а наличие регулировки тока уставки позволяет корректировать работу реле в условиях эксплуатации, которые не всегда могут быть учтены на стадии проектирования и при наладке линии на заводе-изготовителе.

4. Вероятность работы двигателя на двух фазах при использовании автоматов мала, а небольшая длительность работы двигателя во время одного цикла оводит защиту при обрыве фазы, в основном, к отключению заторможенного двигателя при следующем пуске. В.А.Клейменовым показана пригодность теплового реле для защиты двигателя при обрыве фазы, а проведенные в реферируемой работе экспериментальные исследования дают удовлетворительные результаты по защите заторможенного двигателя тепловым реле как в однофазном, так и в трехфазном режимах. Эффективность работы тепловых реле увеличится при внедрении реле с ускоренным срабатыванием при несимметричных режимах.

5. Существенным достоинством теплового реле являются малое время возврата и независимость его от времени охлаждения двигателя, удобство замены нагревательных элементов и реле при переналадке и выходе их из строя. Соответствующее согласование характеристик автоматов и реле позволяет предохранить последние от выхода из строя при коротких замыканиях. Исследования термической устойчивости тепловых реле серии ТРН показали необходимость их защиты другими аппаратами при кратностях тока выше I₂-I₄. Опыт эксплуатации подтверждает, что такую защиту обеспечивают автоматы с обратной зависимой характеристикой срабатывания (например, типа АК63-3МГ).

6. Тепловые реле в автоматических линиях являются эффективным средством предохранения механизмов и режущих инструментов.

В ряде случаев длительность работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором настолько непродолжительна, что даже при значительных перегрузках температура обмотки двигателя не достигает предельных значений. В таких случаях отпадает необходимость

в использовании защиты от перегрузки.

Если статическая характеристика рабочей машины такова, что устойчивая работа двигателя при перегрузке возможна лишь в пределах устойчивой части его механической характеристики, то наибольшим возможным током при перегрузке является критический ток. Дальнейшая перегрузка приводит к опрокидыванию двигателя. Опрокидывание вызывается также обрывом фазы при статическом моменте, превышающем критический момент двигателя в однофазном режиме. В этих случаях должна сработать защита, предназначенная для отключения заторможенного двигателя в трехфазном и однофазном режимах.

Получены аналитические зависимости для границы применения защиты двигателя от перегрузки в виде допустимых при работе без защиты относительных значений времени работы $\frac{t_{pd}}{T}$ (в кратковременном режиме) и продолжительности включения ϵ (в повторно-кратковременном режиме):

$$\frac{t_{pd}}{T} = \ln \frac{(I_k/I_{cp})^2 + a}{(I_k/I_{cp})^2 - 1}, \quad (15)$$

$$\epsilon = \frac{\beta(1+a)}{(I_k/I_{cp})^2 - 1 + \beta(1+a)}, \quad (16)$$

где I_k — отношение критического тока двигателя к номинальному;
 I_{cp} — отношение тока срабатывания теплового реле к номинальному току двигателя.

Показано, что при этом можно не считаться с возможностью обрыва фазы, а также получены зависимости критического момента и скольжения в однофазном режиме от тех же величин трехфазного режима

$$S_k^m = \frac{S_k}{2 + 0,75 S_k}, \quad (17)$$

$$M_k^m = \frac{M_k}{2 + S_k}. \quad (18)$$

Исследования показали, что защита заторможенного двигателя в трехфазном и однофазном режимах при отсутствии теплового реле может быть обеспечена автоматическими выключателями с гидравлическими замедлителями срабатывания (даже при повышении номинального тока расцепителей на 20–25% по отношению к номинальному току двигателя). Подобные решения целесообразны в ряде случаев при защите в автоматических линиях двигателей ускоренных перемещений силовых узлов и двигателями электромеханических ключей для зажима деталей.

Содержанием четвертой главы является исследование возможностей тепловой защиты как средства предохранения механизмов и повышения надежности автоматических линий.

Отмечено наличие предпосылок для такого использования тепловой защиты в автоматических линиях (в частности, постоянство циклов и относительная стабильность нагрузок, особенно характерная для силовых узлов с электромеханическим приводом). Подчеркнуто, что наибольшая эффективность предотвращения отказов оборудования достигается путем сочетания электрических и механических защитных устройств и соответствующего согласования их параметров.

Основным узлом автоматической линии является силовой стол для создания ускоренных и рабочих перемещений, а при необходимости — выдержки на жестком упоре. На силовом столе устанавливаются сверлильно-расточные, подрезно-расточные, фрезерные бабки или многошпиндельные коробки с приводом главного движения (вращения инструмента). Удельный вес электродвигателей приводов силовых столов и вращения инструмента в общем количестве электродвигателей автоматической линии достигает 70–85%.

На примере конструкции и работы силового стола ИЗАД показано, как распределяются функции между механической и электрической защитой и взаимодействие этих защит.

Для правильной оценки возможных последствий при отказах и выбора средств предотвращения этих последствий рекомендуется построение структурной схемы логической цепи взаимозависимости явлений при отказах, так называемой схемы возможных отказов. Анализ такой цепи позволяет уяснить причину отказов, правильно определить наиболее существенные связи явлений при возможных отказах механизма и выбрать средства защиты, места установки защитных устройств,

параметры и целесообразное взаимодействие этих устройств. В качестве примера приведена схема возможных отказов взаимодействующих между собой приводов подачи и вращения инструментов.

Эффективность работы защитных устройств подтверждается результатами исследования надежности автоматических линий ЛМ172 (для обработки деталей из стали) и ЛМ215 (для обработки деталей из чугуна). Анализ данных по остановам и простоям линий, зарегистрированных за период обследования (28 смен на линии ЛМ172 и 45 смен на линии ЛМ215), свидетельствует о том, что значительное число остановов связано со срабатыванием защиты электродвигателей от перегрузки (табл.2 и 3).

Таблица 2

Остановы линии	ЛМ172	ЛМ215
Общее число остановов линии вследствие отказов оборудования и инструментов и для технического обслуживания	443	205
Число остановов линии вследствие срабатывания тепловой защиты	98	23
Число остановов линии вследствие срабатывания защиты к общему числу остановов, %	22,1	11,2

Таблица 3

Простой линии	ЛМ172	ЛМ215
Общее время простоя линии по техническому обслуживанию и устранению отказов оборудования и инструментов, мин	3708	2170
Время простоя линии вследствие срабатывания тепловой защиты, мин	646	62,6
Время простоя линии при срабатывании защиты к общему времени простоя, %	17,4	2,9

Простои при этих остановках не так продолжительны, как остальные, из-за меньшей трудоемкости работ по устранению неполадок. Среднее время восстановления при срабатывании защиты от перегрузки оказывается меньше среднего времени восстановления при остальных остановках на линии ЛМ172 в 1,4 раза, на линии ЛМ215 - в 4 раза.

В свою очередь, время восстановления при срабатывании защиты зависит от причины срабатывания и колеблется в широких пределах.

Проведенные технико-экономические расчеты показывают, что уменьшение времени простоев за счет срабатывания тепловой защиты позволяет на линии ЛМ172 получить дополнительно 10600 деталей в год.

Коэффициент технического использования автоматической линии можно выразить в виде

$$K_T = \frac{1}{1 + \beta + \beta_3} \quad (19)$$

или

$$K_T = \frac{1}{1 + \beta + \bar{t}_{\text{вс}} \lambda_3} \quad (20)$$

где β - удельная длительность простоя линии по техническому обслуживанию и отказам, не связанным со срабатыванием защиты от перегрузки;

β_3 - удельная длительность простоя линии по отказам, вызвавшим срабатывание защиты от перегрузки;

$\bar{t}_{\text{вс}}$ - среднее время восстановления работоспособности линии при отказе, вызвавшем срабатывание защиты от перегрузки;

λ_3 - интенсивность срабатывания защиты от перегрузки.

Отказы оборудования линии, при которых должна сработать защита от перегрузки, при отсутствии (отказе) защиты резко увеличат среднее время восстановления. Поэтому отсутствие защиты снижает коэффициент технического использования линий - основной показатель их работоспособности.

Исследование надежности автоматических линий в эксплуатации позволяет сделать ряд выводов, которые подтверждаются, в частности, результатами обследования линий ЛМ172 и ЛМ215:

1. Применение фрикционных муфт в кинематических цепях механизмов (привод подачи силовых столов, привод транспортных устройств) обеспечивает эффективное предохранение от перегрузок элементов кинематической цепи и электродвигателя.

2. Наиболее благоприятные условия для использования тепловой защиты электродвигателя вращения инструмента в качестве средства предохранения инструментов и механизмов имеются при малом числе

шпинделей (от I до 4), при выполнении черновых операций (фрезерование, зенкерование, расточка и т.п.), при сверлении отверстий большого диаметра (диаметром 15-20 мм и более) и нарезании в этих резьбы. Срабатывание тепловой защиты чаще наблюдается при обработке деталей из стали, что объясняется худшими условиями работы инструмента, чем при обработке чугуна. Так, число срабатываний устройств тепловой защиты, приходящихся на одно устройство за 1000 циклов работы, для линии LM172 (0,266) в 4,8 раза превышает соответствующее число для линии LM215 (0,055).

3. Тепловая защита электродвигателей ускоренных перемещений силовых столов в состоянии предотвратить образование задиров на направляющих из-за загрязнения или отсутствия смазки.

4. Недостатком тепловой (токовой) защиты электродвигателя по сравнению с температурной считается то, что она реагирует не на температуру обмотки электродвигателя - основной лимитирующий параметр перегрузки, а на величину тока, косвенно определяющую нагрев. В то же время тепловая защита двигателя именно как защита токовая может быть использована в качестве средства защиты механизма от перегрузки благодаря тому, что ток двигателя возрастает с увеличением момента на валу.

5. Срабатывание тепловой защиты электродвигателя во многих случаях является сигналом о необходимости проведения технического обслуживания (замены затупившегося инструмента, очистки и смазки механизма и т.д.).

Н я т а я г л а в а содержит анализ целесообразных вариантов схем защиты цепей управления автоматических линий с учетом параметров источников питания и аппаратуры. Рассмотрены как общие вопросы защиты цепей управления, так и специфические, относящиеся к цепям постоянного тока с низким уровнем напряжения. В связи с наметившейся тенденцией применения автоматических выключателей в работе сделан упор на особенности их применения.

Сложность нахождения целесообразного решения защиты цепей управления в автоматических линиях обуславливают следующие факторы: большая разветвленность в монтажном отношении электрических коммуникаций; большое количество коммутационных, командных, исполнительных и защитных аппаратов; низкий уровень напряжения питания;

наличие проводов большой протяженности и маломощных источников питания, ограничивающих величины токов в аварийных режимах.

В последние годы в станкостроении получили распространение узлы и элементы слаботочной техники, что способствовало повышению надежности и долговечности, уменьшению потребляемой мощности и габаритных размеров системы управления. Наибольшее применение находит аппаратура постоянного тока с низким уровнем напряжения, например 24в, которая в сочетании с элементами радиоэлектроники позволяет осуществлять рациональные системы управления.

Важную роль играет источник питания для таких схем. Показано, что предпочтительно применение источников, собранных по трехфазной мостовой схеме выпрямления. Исследования ряда источников (как выпускаемых серийно, так и собранных из серийных элементов) показали, что их внешние характеристики можно аппроксимировать прямыми. Получены расчетные параметры источников: E_0 - э.д.с. холостого хода и Z - внутреннее сопротивление.

К схемам защиты цепей управления низкого напряжения предъявляется ряд требований, важнейшие из которых следующие:

- а) достаточная эффективность работы средств защиты при всех значениях токов короткого замыкания;
- б) несрабатывание при токах включения;
- в) координация действий аппаратов защиты, обусловленная требованиями системы управления;
- г) удобство отыскания места короткого замыкания;
- д) быстрое восстановление работоспособности;
- е) небольшая величина падения напряжения в аппаратах защиты в рабочем режиме.

Осуществление в реальных схемах этих требований приводит к тому, что цепи управления и система их защиты приобретает ряд характерных структурных особенностей.

В работе обоснована необходимость секционирования цепей управления автоматических линий для обеспечения надежной защиты. Необходимость секционирования вызывается, в частности, наличием бросков тока при включении устройств с емкостями и сигнальных ламп.

Для сигнальных ламп получены зависимость тока от времени при включении и соотношение между суммарным током группы ламп I_{Σ} и

током отсечки автомата $I_{отс.д.}$, необходимое для выбора автоматов в цепях сигнализации:

$$I_{отс.з.} \leq (0,20 \div 0,25) I_{отс.д.} \quad (21)$$

Секционирование способствует также быстрейшему отысканию места повреждения и придает гибкость системе управления (особенно при наладке).

Необходимое взаимодействие секционных аппаратов защиты достигается путем введения соответствующих блокировок. Разработаны и внедрены варианты секционированных схем защиты.

Дробление нагрузки по узлам производится из соображений надежности работы защиты с учетом конструктивно-технологических особенностей автоматической линии.

Схема замещения секционированной цепи управления представляет собой параллельное соединение n ветвей, подключенных к источнику питания. Сопротивление каждой ветви составляет:

$$\begin{aligned} R_{нагр.1} &= z_{д1} + R'_{нагр.1}; & R_{нагр.2} &= z_{д2} + R'_{нагр.2}; \\ R_{нагр.i} &= z_{дi} + R'_{нагр.i}; & R_{нагр.n} &= z_{дn} + R'_{нагр.n}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $z_{дi}$ — сопротивление автомата и подводящих проводов, ом,
 $R'_{нагр.}$ — сопротивление схемного элемента коммутации, ом.

Для определения тока в одном из узлов цепи (например, в i -м) следует выделить искомую ветвь (источник с параллельно включенным эквивалентным сопротивлением R_0), представив остальную часть цепи в виде активного двухполюсника.

В этом случае эквивалентное сопротивление

$$R_0 = \frac{1}{\sum_{k=1}^{i-1} \frac{1}{R_{нагр.k}} + \sum_{k=i+1}^n \frac{1}{R_{нагр.k}}}, \quad (23)$$

ток через автомат i -й ветви при коротком замыкании за автоматом ($R_{нагр.i} = 0$)

$$I_{дi} = \frac{E_d}{z \left(1 + \frac{z_{дi}}{R_0} \right) + z_{дi}}, \quad (24)$$

кратность тока при коротком замыкании в i -й ветви по отношению к току нагрузки

$$K_{ki} = 1 + \frac{R_{норд i} (1 + \frac{2}{R_0})}{2 + Z_{ki} (1 + \frac{2}{R_0})} \quad (25)$$

Уменьшение параллельно подключенного сопротивления вызывает уменьшение тока через автомат i -й ветви, что может явиться причиной несрабатывания автомата при коротком замыкании. Наименьшее допустимое значение эквивалентного сопротивления R_m для заданных типов источника и автомата можно определить исходя из условия, что наибольший допустимый длительный ток источника равен номинальному I_N .

Получены выражения для токов рабочего и аварийного режимов в i -й ветви (при $R_0 = R_m$), а также кратности тока короткого замыкания

$$K_{ki} = \frac{I_{ki}}{I_i} = \frac{\frac{R_{норд i}}{Z_{ki}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{R_m} \right)}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{R_{норд i}} + \frac{1}{2} - \frac{1}{R_N}} \quad (26)$$

где $R_N = \frac{E_0}{I_N} - 2$.

Приведены полученные аналитически и подтвержденные экспериментально зависимости между параметрами при секционировании и полной нагрузке источника питания: $Z_{ki} = f(I_{н.л})$ — по условиям допустимого падения напряжения для различных источников; $K_{ki} = f(Z_{ki})$ — для аппаратов защиты с различными номинальными токами; $K_{ki} = f(I_{н.л})$ — для различных типов источников, автоматов и сопротивлений проводов.

Если принять мощность потерь в автоматах одной серии $P_{кл}$ примерно одинаковой, то можно получить зависимость кратности тока короткого замыкания K_{ki} от номинального тока автомата $I_{н.л}$. На основании уравнения

$$\frac{dK_{ki}}{dI_{н.л}} = 0 \quad (27)$$

получены формула для тока, соответствующего максимуму кратности тока короткого замыкания при отсутствии проводов ($Z_{пр i} = 0$),

$$I_{н.м.т} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{R_n}\right) \rho_{кл}} \quad (28)$$

и кривые для определения этого тока по вспомогательным коэффициентам θ и d при наличии проводов ($r_{пр} \neq 0$)

$$I_{н.м.т}^2 + \theta I_{н.м.т}^2 = d, \quad (29)$$

где

$$\theta = \frac{I_n R_n}{2 r_{пр}} \left[1 + r_{пр} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{R_n} \right) \right],$$

$$d = \frac{I_n R_n}{2 r_{пр}} \rho_{кл} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{R_n} \right).$$

Величина максимальной кратности при $I_{н.б} = I_{н.м.т}$ согласно выражению (28) составит

$$K_{н.м.т} = \frac{I_n R_n \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{R_n} \right)}{2 \sqrt{R_n \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{R_n} \right)} \cdot \frac{\rho_{кл}}{R_n}} \quad (30)$$

На основе анализа полученных зависимостей показано, что при секционировании цепей управления автоматических линий предпочтительно выбирать автоматы с малыми кратностями тока отсечки (не более $1,7 + 2,5$). Отмечено, что пользование при определении токов короткого замыкания аналитическими и графическими зависимостями, приведенными для случая предельной нагрузки, способствует значительному сокращению объема расчета.

Анализ результатов проведенных исследований позволил предложить инженерную методику расчета схем защиты цепей управления автоматических линий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования показали, что вопросы защиты всех компонентов электропривода (двигателей, силовых цепей, приводимых механизмов и цепей управления) в автоматических линиях взаимосвязаны и можно говорить о системе защиты электроприводов автоматических линий. Специфика работы автоматических линий, с одной стороны, предъявляет к защите

особые требования, с другой стороны, облегчает поиск правильных решений. Ряд положений, полученных в ходе исследования, в полной мере применим при построении защиты электроприводов других производственных механизмов и комплексов.

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. На основании анализа режимов, характерных для работы асинхронных двигателей в приводах автоматических станочных линий, рассмотрен метод оценки нагрева двигателя в циклических режимах при помощи коэффициента условий работы и допустимого числа пусков двигателя в час.
2. Предложено аналитическое выражение для критерия целесообразности отключения двигателя в циклических режимах для уменьшения средней мощности потерь за цикл.
3. Исходя из представления процесса нагрева асинхронного двигателя при пуске как адиабатического и протекающего при неизменном сопротивлении обмоток, получены соотношения для определения повышения температуры двигателя при пуске на холостом ходу и с постоянным статическим моментом.
4. На основании анализа обобщенной защитной характеристики силовой цепи асинхронного короткозамкнутого двигателя рассмотрены вопросы работы автомата в такой цепи и предложена методика их выбора при индивидуальной и групповой защите.
5. Отмечено, что конструкторско-технологические особенности автоматической линии определяют структуру защиты силовых цепей, во многих случаях обуславливая необходимость секционирования, и показана специфика выбора вводных и секционных автоматов.
6. Приведена краткая классификация защитных устройств, отмечено место, занимаемое в ней тепловыми реле, и показана целесообразность применения тепловых реле для защиты двигателей в автоматических линиях.
7. Получены аналитические выражения для границы применения защиты от перегрузки в кратковременном и повторно-кратковременном режимах.
8. Показана роль тепловой защиты как эффективного средства предохранения инструмента и механизмов и повышения надежности авто-

матических линий.

9. Рассмотрены особенности защиты цепей управления автоматических линий, обоснована необходимость секционирования этих цепей и предложена инженерная методика расчета схем защиты цепей управления.

10. Результаты настоящей работы внедрены в качестве руководящих материалов в практику проектирования СКБ автоматических линий, по проектам которого изготавливается продукция Минского завода автоматических линий. Правомерность предложенных в диссертационной работе методов выбора схем и средств защиты подтверждена опытом эксплуатации автоматических линий на ряде предприятий машиностроения.

По материалам диссертационной работы сделаны доклады:

на республиканском семинаре "Использование элементов радиоэлектроники и слаботочной техники при автоматизации технологических процессов" в ИНТИП при Госплане БССР, Минск, 1966;

на XVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института, Минск, 1970.

Основное содержание диссертации опубликовано автором в следующих работах:

1. Выбор источников питания для цепей управления проводной связи. "Станки и инструмент", 1962, № 5 (соавторы Ивенский Ю.Н. и Туллер А.Г.).

2. Схемы защиты цепей управления и источников питания. "Станки и инструмент", 1962, № 7 (соавторы Ивенский Ю.Н. и Туллер А.Г.).

3. Источники питания цепей управления и схемы защиты. ПНТ и ПО № 17-66-1534/95 ГОСИНТИ.М., 1966 (соавтор Ивенский Ю.Н.).

4. Особенности выбора источников питания и схем защиты цепей управления 24в. "Промышленность Белоруссии", 1967, № 3.

5. Защитные и предохранительные устройства в автоматических линиях. "Механизация и автоматизация производства", 1970, № 3 (соавтор Коних А.И.).

6. Секционирование цепей защиты и схем управления автоматичес-

ких линий. "Механизация и автоматизация производства", 1970, № 3 (соавтор Ивевский Д.Н.).

7. Защита силовых цепей асинхронных электроприводов автоматическими выключателями. В сб.: "Опыт повышения надежности и защита электропривода", № 4/25-70. ГОСНИТИ. М., 1970 (соавтор Ивевский Д.Н.).