Л.Г. Лимонов





Автоматизированный электропривод промышленных механизмов

Л.Г. ЛИМОНОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФОРТ»
2009

УДК 62-83
ББК 31.291
Л-58

Рецензенты:

Акимов Леонид Владимирович, доктор технических наук, профессор, НТУ «Харьковский Политехнический институт»

Кузнецов Борис Иванович, зав. отделом Научно-технического центра Магнетизма технических объектов НАН Украины, Лауреат Государственной премии Украины, доктор технических наук, профессор,

Л-58 Лимонов Л.Г.

Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Х.: – Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.

ISBN 978-966-8599-56-9

В книге изложен опыт, полученный автором в результате многолетних научных исследований, разработок, проектирования и внедрения в производство автоматизированных электроприводов промышленных механизмов различного назначения. Рассмотренные электроприводы отличаются тем, что приводимые ими механизмы предъявляют специфические требования, выходящие за рамки обычных требований регулирования скорости или вращающего момента электродвигателя.

К таким электроприводам относятся регулируемые однодвигательные и многодвигательные электроприводы механизмов агрегатов непрерывной обработки полосового материала в цехах холодной и горячей прокатки листа, которым посвящена глава 1. В главе 2 рассмотрены особенности электроприводов механизмов станов холодной прокатки. Глава 3 посвящена вопросам разработки электроприводов повышенной надежности и экономичности. В главе 4 рассмотрены электроприводы механизмов подъемных кранов различного назначения.

Основное внимание в книге уделено принципам и алгоритмам управления вышеупомянутыми промышленными электроприводами, реализация которых может быть осуществлена с использованием современных технических средств.

Большое внимание в книге отведено вопросам применения регулируемых электроприводов по системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель.

В приложениях приведены технические характеристики и рекомендации по применению преобразователей частоты фирм SIEMENS и ABB.

УДК 62-83
ББК 31.291

© Лимонов Л.Г., 2009
© Издательство «Форт», оригинал-макет, 2009

ISBN 978-966-8599-56-9

ВВЕДЕНИЕ

В книге отражен опыт исследования, разработки и внедрения автоматизированных регулируемых электроприводов промышленных механизмов различного назначения, общими для которых являются специфические требования, выходящие за рамки обычных требований регулирования скорости или вращающего момента электродвигателя. Этот опыт получен автором и коллективом его ближайших сотрудников в Украинском проектном и проектно-конструкторском институте «Тяжпромэлектропроект» и других организациях за более чем 50 лет работы по научному и практическому исследованию, проектированию, наладке и вводу в действие автоматизированных электроприводов механизмов металлургического и общепромышленного назначения.

Общеизвестно, что за этот период времени технические средства автоматизированного электропривода и систем управления неоднократно претерпевали существенные изменения – от генераторов постоянного тока, электромашинных преобразователей частоты и ртутных выпрямителей до тиристорных преобразователей постоянного тока и преобразователей частоты на IGBT-транзисторах, от простейших релейно-контакторных схем и систем аналогового управления с применением электромашинных и магнитных усилителей до быстродействующих цифровых программируемых микропроцессорных систем. Поэтому в книге основное внимание уделено принципам и алгоритмам управления вышеупомянутыми промышленными электроприводами, реализация которых может быть осуществлена с использованием современных технических средств.

Основные вопросы, изложенные в книге, связаны с системами управления электроприводов многодвигательных агрегатов непрерывной обработки полосы, станов холодной прокатки различных типов, системами управления электроприводов повышенной надежности, электроприводами механизмов подъемных кранов, системами управления электромеханическими системами испытательных стендов двигателей внутреннего сгорания. Кроме того, освещены результаты некоторых исследований, относящихся к общим вопросам расчета, разработки и проектирования электроприводов промышленных механизмов.

По мнению автора, книга может быть полезной инженерам-электромеханикам, которые занимаются исследованием, разработкой, проектированием, наладкой и эксплуатацией автоматизированных электромеханических систем производственных механизмов, а также студентам старших курсов, обучающимся по специальностям, связанным с электрификацией промышленных предприятий и установок.

В оформлении графической части книги большую помощь автору оказали инженеры Бондаренко С.Н. и Дубенецкий А.С.

Особую благодарность автор выражает доктору технических наук, профессору Акимову Л.В. и доктору технических наук, профессору Кузнецову Б.И., взявшим на себя труд рецензирования книги.

Глава 1

МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АГРЕГАТОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛОСЫ

1.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

Высокопроизводительные металлургические агрегаты современных цехов горячей и холодной прокатки листовой продукции представляют собой сложные электромеханические комплексы, оснащенные большим количеством электрических, электрогидравлических и электропневматических приводов, совместное функционирование которых обеспечивает качественное ведение технологического процесса для получения продукции с заданными параметрами.

Агрегаты непрерывной обработки полосы предназначены для термической, химической и механической обработки холоднокатаной и горячекатаной стальной полосы. К таким агрегатам относятся: непрерывно-травильные и непрерывные закалочно-травильные, непрерывного отжига и электролитической очистки, осмотра и перемотки полосы, продольной и поперечной резки, непрерывного цинкования или алюминирования и непрерывного электролитического лужения и другие. Они устанавливаются, как правило, в составе высокопроизводительных цехов холодной или горячей прокатки листа [1].

Упрощенная кинематическая схема одного из таких агрегатов – непрерывно-травильного приведена на рис. 1.1.

На рис. 1.1 обозначено: Р1, Р2 – разматыватели полосы; ПМ – правильная машина; ССМ – стыкосварочная машина; Т1, Т2, Т3 – S-образные тянущие станции; ПН1, ПН2 – петлевые накопители полосы; ИРУ – изгибо-растяжное устройство; УТП – участок травления и промывки; ДН – дисковые ножницы обрезки кромок; $М_1$, $М_2$ – моталки.

Основное оборудование этих агрегатов включает в себя различные по назначению механизмы, связанные между собой единым технологическим процессом, и оснащенные индивидуальным электрическим, гидравлическим и другим оборудованием, датчиками технологических параметров, средствами управления и регулирования.

независимо от величины нагрузки – нулевую ошибку при отработке возмущений со стороны нагрузки. Но реализация такого решения в ряде случаев затруднена из-за определенных сложностей, связанных либо с отсутствием соответствующих технических средств – датчиков скорости электродвигателя или качественных средств управления, либо с трудностями наладки при вводе электропривода в действие и др. В таких случаях следует отдавать предпочтение применению систем регулирования скорости не с пропорциональным (П), а с пропорционально-интегрально-пропорциональным (ПИП) регулятором скорости, с которым система приобретает лучшие динамические и статические показатели, чем с П-регулятором [2], [3].

Особенность применения такого типа регулятора заключается в том, что при передаточной функции

$$W_{пип}(p) = \frac{K_1(1+T_1 p)}{(1+T_2 p)} \qquad (1.1)$$

он обеспечивает логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) разомкнутого контура регулирования частоты вращения вида 1–2–1–2, рис. 1.2.

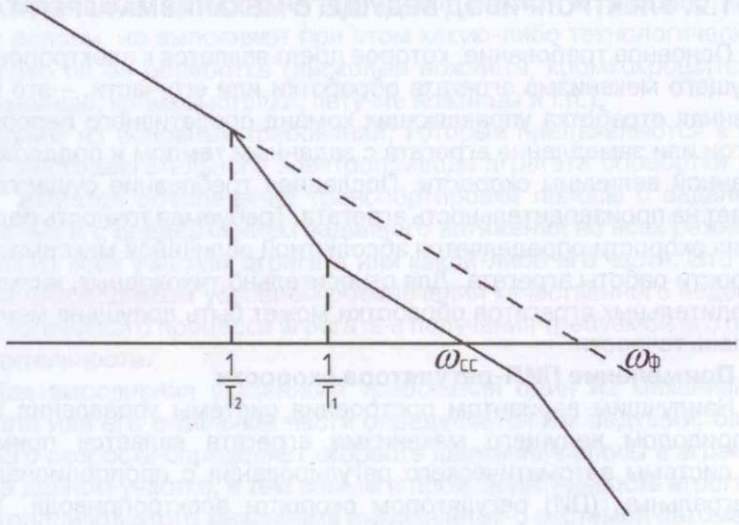


Рис. 1.2. Вид ЛАЧХ разомкнутого контура регулирования скорости с ПИП-регулятором

На рис. 1.2 обозначено: ω_{cc} – частота среза разомкнутого контура регулирования скорости, ω_{ϕ} – фиктивная частота среза.

Такая ЛАЧХ обеспечивает повышение жесткости механической характеристики электропривода, так как абсолютная величина «просадки» скорости электродвигателя при номинальном токе нагрузки электродвигателя уменьшается по сравнению с применением П-регулятора в $\alpha = \frac{\omega_{\phi}}{\omega_{cc}}$ раз.

При этом требуемая величина ω_{ϕ} может быть получена путем соответствующей настройки параметров регулятора, независимо от величины ω_{cc}.

При использовании аналоговых технических средств ПИП-регулятор реализуется путем шунтирования резистором цепи $R–C$ или только емкости в обратной связи операционного усилителя ПИ-регулятора. Несколько сложнее обстоит дело, если система регулирования реализована на базе микропроцессорной программируемой техники. В этих системах для регулирования скорости электродвигателя предлагается программируемый ПИ-регулятор скорости, который при параметрировании электропривода может быть просто перестроен только в П-регулятор.

Анализ и последующая стендовая проверка показали, что стандартный ПИ-регулятор все же может быть перепрограммирован для приобретения свойств ПИП-регулятора. Для этого может быть предложено несколько способов. Это определяется возможностями, заложенными в системе программного управления соответствующего комплектного электропривода. Так, например, в системе программного управления тиристорного преобразователя серии SIMOREG 6RA70 DC Master фирмы SIEMENS, которая имеет большое количество свободных функциональных модулей, перестройка ПИ-регулятора скорости может быть произведена путем охвата этого регулятора жесткой обратной связью. Ее введение преобразует передаточную функцию этого регулятора вида

$$W_{ПИ}(p) = \frac{K(1+pT)}{pT} \qquad (1.2)$$

в передаточную функцию

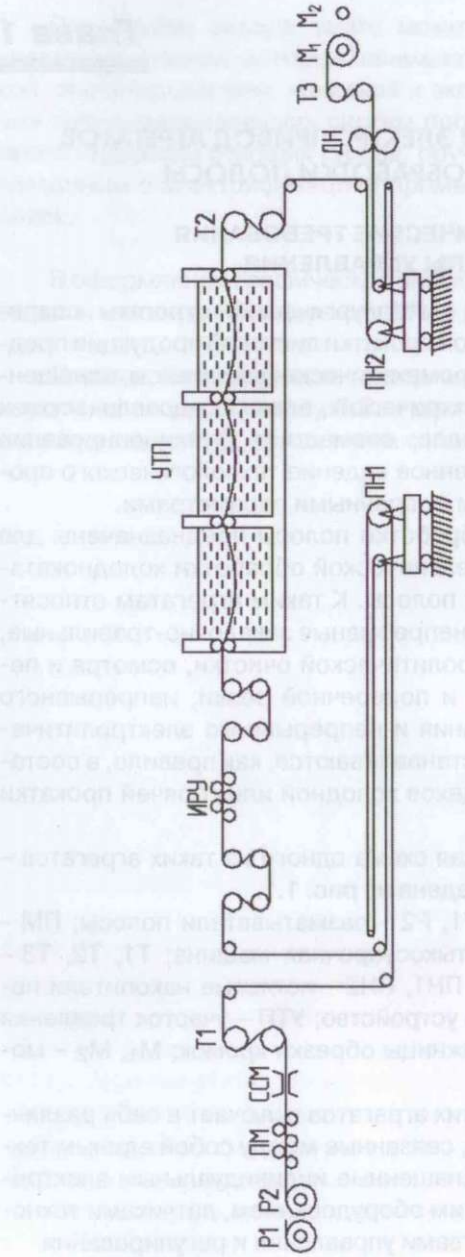


Рис. 1.1. Упрощенная кинематическая схема непрерывно-травильного агрегата.

Кроме основного оборудования в комплекс механизмов агрегата, как правило, входит оборудование вспомогательных и обслуживающих систем, таких как разнообразные насосные станции систем технологической смазки и смазки механического оборудования, насосные станции гидравлических систем и систем охлаждения, системы вентиляции и др. Если в составе электроприводов механизмов основного оборудования преобладают регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока, то механизмы вспомогательных и обслуживающих систем в большинстве оснащены нерегулируемыми электроприводами переменного тока, электрогидравлическими и электропневматическими приводами.

Общим для всех перечисленных агрегатов непрерывной обработки полосы является длительный непрерывный процесс в основной технологической части. Исключение составляют работающие в режиме порулонной обработки агрегаты осмотра и перемотки и агрегаты продольной и поперечной резки полосы, у которых время непрерывной работы технологической части ограничено длиной полосы, находящейся в рулоне. Принцип непрерывной работы технологической части используется в процессе прокатки на современных непрерывных станах «бесконечной» холодной прокатки, где применяются аналогичные принципы управления электроприводами механизмов головной и входной частей стана.

Для обеспечения непрерывности процесса обработки полосы в технологической части агрегат непрерывной обработки разделяется на несколько, чаще всего на три основных части: головную или входную, среднюю или технологическую и хвостовую или выходную. В головной части происходит подготовка поступившего рулона к обработке и соединение переднего конца намотанной в нем полосы с задним концом полосы предыдущего обрабатываемого рулона, а затем транспортировка полосы к средней части. В хвостовой части происходит разделение полос – прошедшей обработку и смотанной в рулон и находящейся еще в процессе обработки в агрегате. В средней части, как уже упоминалось, выполняется основная технологическая операция обработки полосы: отжиг, очистка, покрытие. Для обеспечения непрерывной работы технологической части агрегата при остановках и снижениях скорости головной и хвостовой частей между ними и средней частью устанавливаются аккумуляторы полосы – петлевые накопители горизонтального или вертикального типа.

На агрегатах обработки полосы, работающих с порулонной обработкой, разделение на части не производится, и аккумуляторы полосы не устанавливаются.

Механизмы, установленные в составе агрегата непрерывной обработки полосы или его частей и участвующие в технологическом процессе обработки, оснащены регулируемыми электроприводами. Качество их функционирования определяет основные показатели работы агрегата – производительность и качество технологической обработки. На эти показатели влияют как показатели качества регулирования отдельных координат электроприводов этих механизмов, так и работа общей системы автоматизированного управления взаимосвязанным многодвигательным электроприводом части или всего агрегата обработки. Механизмы агрегатов непрерывной обработки полосы можно условно разделить на три группы:

– механизмы, которые выполняют транспортировку полосы и одновременно какую-либо технологическую операцию по ее обработке (многороликовые правильные машины, изгибо-растяжные устройства и т.п.);

– механизмы, основная функция которых – транспортировка полосы (различного вида тянущие ролики);

– механизмы, которые не принимают участия в транспортировании полосы, но выполняют при этом какую-либо технологическую операцию по ее обработке (дисковые ножницы, кромкокрошительные ножницы, кромкомоталки, летучие ножницы и т.п.).

Одним из основных требований, которые предъявляются к системе многодвигательного электропривода агрегата обработки полосы, является обеспечение транспортировки полосы с заданной скоростью и с поддержанием заданного натяжения во всех режимах работы на всех участках агрегата или какой-либо его части. Это является необходимым условием обеспечения качественного ведения технологического процесса агрегата и получения требуемой его производительности.

Для выполнения указанного требования один из механизмов агрегата или его отдельной части определяется как ведущий, базовый. Его скорость определяет скорость движения полосы в агрегате или на данном участке, а тем самым и производительность агрегата. Электропривод этого механизма выполняется с системой автоматического регулирования скорости электродвигателя. Остальные механизмы, соответственно, становятся ведомыми, тянущими, опреде-

ляющими величину натяжения полосы на соответствующих участках агрегата. Электроприводы этих механизмов выполняются с системами автоматического регулирования натяжения, как правило, косвенного действия. При этом электроприводы тянущих механизмов, расположенных по ходу движения полосы после ведущего, создают натяжение в полосе, работая в двигательном режиме, а электроприводы механизмов, расположенных по ходу движения полосы перед ведущим – в генераторном режиме.

Далее будут рассмотрены особенности электроприводов отдельных механизмов агрегатов обработки, а также принципы построения общей системы управления агрегатом или отдельной его части.

В заключение следует отметить, что методы анализа и результаты исследований, приведенные в этой главе, могут быть использованы при анализе электроприводов аналогичных агрегатов обработки, работающих в составе цехов по производству гнутых профилей, а также, с некоторыми допущениями, для анализа электроприводов механизмов одноклетевых и двухклетевых дрессировочных станов, работающих со столь малым обжатием полосы, что его влиянием на динамику электроприводов можно пренебречь.

1.2. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕДУЩЕГО МЕХАНИЗМА АГРЕГАТА

Основное требование, которое предъявляется к электроприводу ведущего механизма агрегата обработки или его части, – это качественная отработка управляющих команд оперативного персонала: разгон или замедление агрегата с заданным темпом и поддержание заданной величины скорости. Последнее требование существенно влияет на производительность агрегата. Требуемая точность поддержания скорости определяется абсолютной величиной максимальной скорости работы агрегата. Для относительно тихоходных, низкопроизводительных агрегатов обработки может быть допущена меньшая степень точности.

Применение ПИП-регулятора скорости

Наилучшим вариантом построения системы управления электроприводом ведущего механизма агрегата является применение системы автоматического регулирования с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором скорости электропривода. Такая система может обеспечить требуемую высокую статическую точность стабилизации скорости агрегата во всех режимах его работы,

$$W_{ПИП}(p) = \frac{(1+pT_{01})}{K_0(1+pT_{02})}, \qquad (1.3)$$

где K_0 – коэффициент жесткой обратной связи, а постоянная времени

$$T_{02} = T_{01} + \frac{T_{01}}{K_0 K}, \qquad (1.4)$$

что при условии $K_0 < 1$ описывает ПИП-регулятор.

Программно охват ПИ-регулятора скорости жесткой обратной связью в системе управления указанного тиристорного преобразователя может быть реализован двумя способами: использованием одного из ПИ-регуляторов из состава свободных модулей с перепараметрированием его в режим П-регулятора либо включением в цепь обратной связи множителя из состава свободных модулей с подключением на второй вход умножения постоянной величины, путем параметрирования, как показано на рис. 1.3 а,1.3 б.

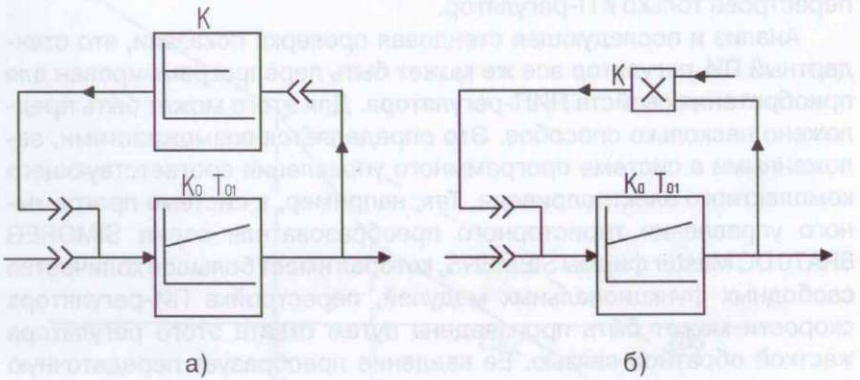


Рис. 1.3. Структурные схемы программных составных ПИП-регуляторов скорости

Для определения параметров настройки составляющих такого ПИП-регулятора нужно задаться желаемым коэффициентом α сниже-

ния просадки скорости. Тогда требуемые параметры ПИП-регулятора с передаточной функцией (1.1) определяются зависимостями

$$K_1 = \frac{\alpha\omega_{CC} J K_T}{K_C c\Phi}; \qquad T_1 = \frac{1}{0,5\omega_{CC}}; \qquad T_2 = \alpha T_1, \tag{1.5}$$

где обозначено: c, Φ – электромашинная постоянная и поток возбуждения электродвигателя, J – момент инерции электропривода, K_T, K_C – коэффициенты обратных связей, соответственно, по току и скорости соответствующих контуров.

Для получения аналогичной настройки составной ПИП-регулятор должен иметь следующие параметры:

$$K_0 = \frac{1}{K_1}; \qquad T_{01} = T_1; \qquad K = \frac{K_1}{\alpha - 1}. \tag{1.6}$$

В тех случаях, когда программное обеспечение применяемого комплектного электропривода имеет ограниченные возможности, и оно не обладает необходимыми свободными программными модулями, жесткая обратная связь для охвата ПИ-регулятора скорости может быть осуществлена путем использования внешних программных технических средств, не входящих в состав комплектного электропривода, например, программируемого контроллера внешнего управления.

1.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЯНУЩЕГО МЕХАНИЗМА АГРЕГАТА

Основным требованием, которое предъявляется к электроприводу тянущего механизма агрегата обработки полосы, является обеспечение транспортировки полосы на соответствующем участке обработки с поддержанием постоянной величины заданного натяжения во всех режимах работы. Системами автоматического регулирования натяжения оснащены электроприводы разматывателей, моталок, тянущих роликов и натяжных устройств различного типа. Эти системы автоматического регулирования натяжения полосы строятся по косвенному принципу, без непосредственного измерения величины натяжения с помощью соответствующих датчиков. Все сводится к автоматическому регулированию мощности электропривода с компенсацией динамической составляющей момента в режимах изменения скорости полосы. В режиме работы с постоянной скоростью поддер-

жание требуемого натяжения полосы сводится к автоматическому регулированию якорного тока электродвигателя постоянного тока или активной составляющей статорного тока асинхронного электродвигателя.

Для анализа динамики электропривода тянущего механизма рассмотрим динамические свойства полосы.

Упругонапряженная полоса как объект регулирования натяжения на агрегате обработки полосы

Наличие упругой связи механизмов через полосу, как одного из факторов, оказывающих влияние на динамические характеристики электропривода, требуется учитывать при разработке систем управления рассматриваемых электроприводов тянущих механизмов. Это особенно актуально в связи с повышением скоростей агрегатов непрерывной обработки и повышением требований к качеству обрабатываемой полосы. Поэтому при расчетах параметров или анализе динамики методами математического моделирования учет связи электроприводов через полосу обязателен. Математическое описание упругой полосы при обработке ее на станах холодной прокатки выполнено в [4], а в [5] получено выражение передаточной функции полосы для режима регулирования натяжения на агрегатах обработки полосы, учитывающее то, что в полосе отсутствует обжатие, а существует только упругое удлинение в пределах закона Гука.

При получении этого выражения в качестве исходного принято уравнение натяжения полосы, обоснованное независимо Ю.М. Файнбергом и Д.П. Морозовым [6], [7], для участка натяжения, схема которого представлена на рис. 1.4, где l – длина, а T – натяжение полосы. Это выражение имеет вид:

$$T = \frac{QE}{l}\int_0^t (V_2 - V_1^*)dt + T_0 , \qquad (1.7)$$

где Q – поперечное сечение полосы на участке натяжения; E –модуль упругости материала полосы; T, T_0 – текущее и начальное значения натяжения на участке; V_2 – скорость тянущего механизма. Скорость выхода полосы из ведущего механизма V_1^* связана с величиной скорости этого механизма V_1 зависимостью

$$V_1^* = V_1(1+\varepsilon) , \qquad (1.8)$$

в которой ε – относительное упругое удлинение полосы на участке обработки, определяемое законом Гука.

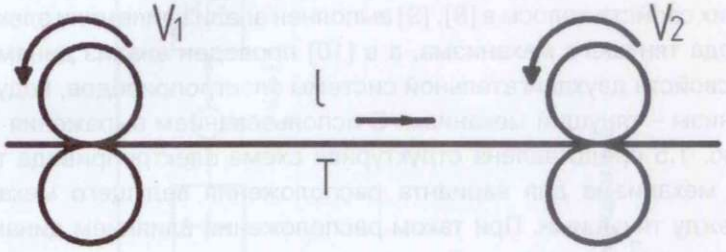


Рис. 1.4. Схема участка натяжения

С помощью метода приращений получены выражения передаточных функций полосы, как объекта регулирования натяжения. Для режима работы, когда скорость полосы отлична от нуля, передаточная функция представляет собой апериодическое звено первого порядка с переменными параметрами:

$$W_n(p) = \frac{\Delta T}{\Delta V} = \frac{K_П}{1 + T_П p} . \qquad (1.9)$$

Для режима стоянки электропривода с натяжением полосы на участке передаточная функция представляется в виде интегрирующего звена

$$W_n(p)_0 = \frac{1}{T_П^* p} . \qquad (1.10)$$

В (1.9) и (1.10) коэффициенты усиления и постоянные времени звеньев равны:

$$K_П = \frac{QE}{V_2} , \; T_П = \frac{l}{V_2} , \; T_П^* = \frac{i}{QE} . \qquad (1.11)$$

Найденные выражения могут быть использованы для составления структурных схем электроприводов тянущих механизмов при их расчете или моделировании.

Динамика электропривода тянущего механизма с учетом влияния полосы.

Так, с использованием полученных выражений для учета влияния упругих свойств полосы в [8], [9] выполнен анализ динамики электропривода тянущего механизма, а в [10] проведен анализ динамических свойств двухдвигательной системы электроприводов, ведущий механизм – тянущий механизм. С использованием выражения (1.9) на рис. 1.5 представлена структурная схема электропривода тянущего механизма для варианта расположения ведущего механизма между тянущими. При таком расположении влиянием динамики электроприводов тянущих механизмов на динамику ведущего можно пренебречь, считая скорость ведущего механизма независимой переменной.

На рис. 1.5 введены следующие обозначения: $T_Э$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи; T_μ – некомпенсируемая постоянная времени тиристорного преобразователя ТП; $T_{РТ}$ – постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока РТ для настройки контура регулирования на модульный оптимум; $K_{ТП}$, K_T – коэффициенты усиления тиристорного преобразователя и обратной связи по току; $R_Э$ – сопротивление якорной цепи; c, Φ – электромашинная постоянная и поток возбуждения электродвигателя; J – момент инерции электропривода; r, i – радиус тянущего ролика и передаточное число редуктора тянущего механизма.

Как видно из рис. 1.5, структурная схема электропривода тянущего механизма состоит из двух замкнутых контуров, связанных между собой внутренней обратной связью по противоЭДС электродвигателя. Используя метод структурных преобразований [11], можно представить структурную схему таким образом, чтобы исключить пересечение контуров.

Преобразованная структурная схема приведена на рис. 1.6.

Как видно из рис. 1.6, схема преобразуется в два замкнутых контура, включенных последовательно, причем один из них – оптимизированный по модульному оптимуму контур регулирования якорного тока, а второй – объект регулирования, с обратной связью по статическому моменту (натяжению полосы).

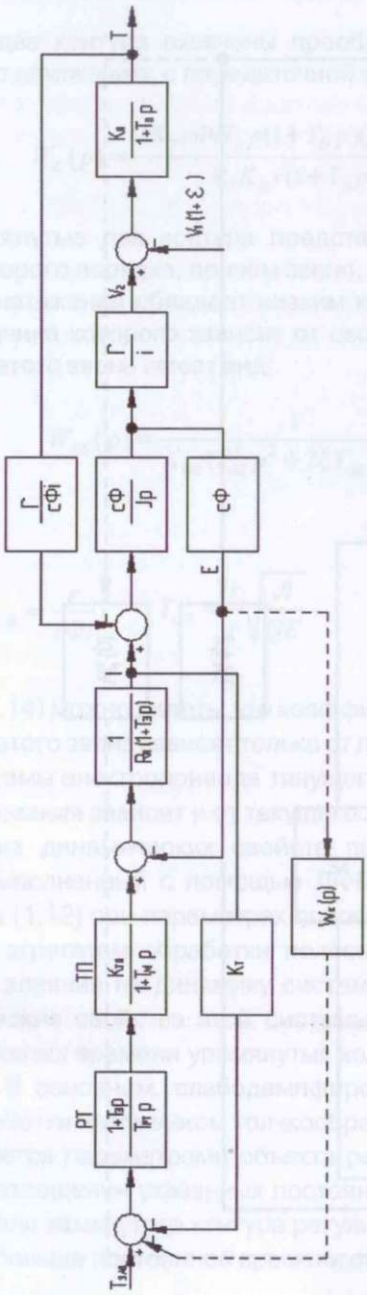


Рис. 1.5. Структурная схема электропривода тянущего механизма с регулятором натяжения косвенного действия

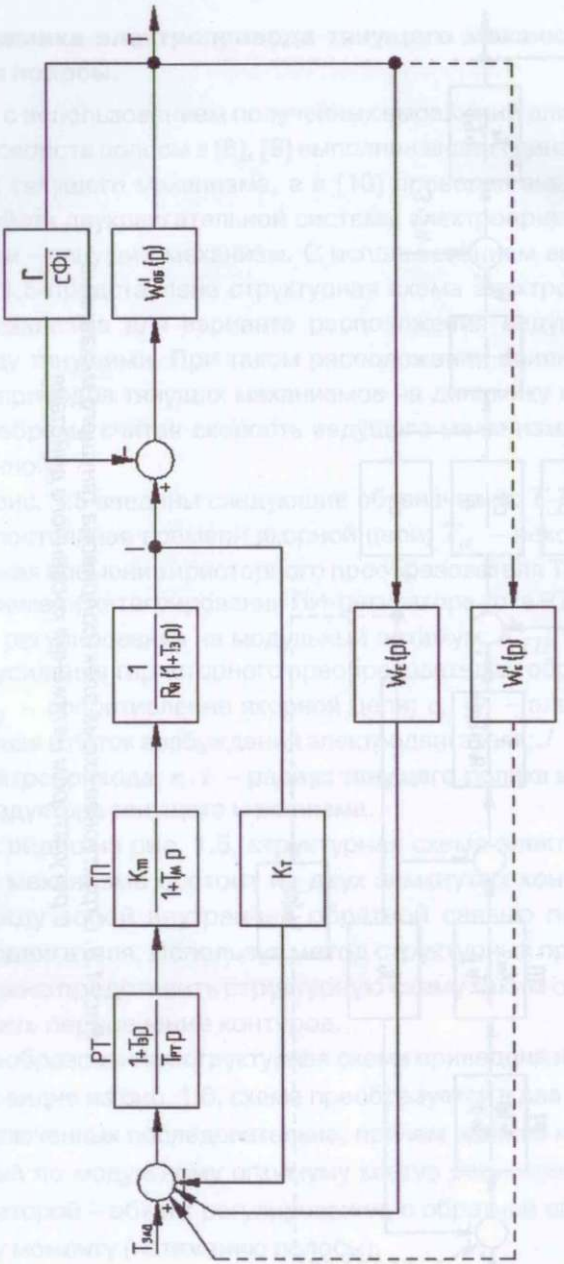


Рис. 1.6. Преобразованная структурная схема электропривода тянущего механизма

Эти два контура охвачены преобразованной общей обратной связью по натяжению, с передаточной функцией

$$W_E(p) = \frac{2K_T c\Phi i T_\mu p(1+T_\Pi p)(1+T_\mu p)}{R_\Э K_\Pi r(1+T_\Э p)}. \qquad (1.12)$$

Упомянутые два контура представляют собой колебательные звенья второго порядка, причем звено, описывающее объект регулирования натяжения обладает низким коэффициентом демпфирования, величина которого зависит от скорости полосы. Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W_{ОБ}(p) = \frac{1}{K_{ОБ}(T_{ОБ}^2 p^2 + 2\xi T_{ОБ} p + 1)}, \qquad (1.13)$$

где:

$$K_{ОБ} = \frac{r}{c\Phi i}, \qquad T_{ОБ} = \frac{i}{r}\sqrt{\frac{Jl}{QE}}, \qquad \xi = \frac{\omega}{2}\sqrt{\frac{J}{QEl}}. \qquad (1.14)$$

Из (1.14) можно видеть, что коэффициент усиления и постоянная времени этого звена зависят только от параметров электромеханической системы электропривода тянущего механизма, а коэффициент демпфирования зависит и от текущего значения скорости агрегата.

Анализ динамических свойств преобразованной структурной схемы, выполненный с помощью ЛАЧХ, показал, что звено обратной связи (1.12) при параметрах полосы и электропривода, которые присущи агрегатам обработки полосы, практически не оказывает никакого влияния на динамику системы регулирования натяжения. Динамические свойства этой системы определяются соотношением постоянных времени упомянутых колебательных звеньев второго порядка. В основном, слабодемпфированный колебательный процесс отработки натяжением толчкообразного управляющего сигнала определяется параметрами объекта регулирования. При благоприятном соотношении указанных постоянных времени, когда постоянная времени замкнутого контура регулирования тока не менее чем в два раза больше постоянной времени объекта регулирования, контур

регулирования тока демпфирует колебательность объекта. Следовательно, улучшение качества регулирования натяжения при неблагоприятном соотношении величин постоянных времени может быть достигнуто двумя способами, которые зависят от параметров структурной схемы. При первом способе следует снизить в допустимых пределах быстродействие контура регулирования тока, в результате чего этот контур снижает влияние колебательности объекта, но этот способ может иметь ограниченное применение из-за снижения точности регулирования натяжения. Другим способом представляется введение в состав структурной схемы цепи параллельной коррекции по противоЭДС электродвигателя на базе звена пропорционально-дифференциального действия, выход которого включается на вход регулятора якорного тока, как показано пунктиром на структурной схеме рис. 1.5. Передаточная функция этого звена

$$W_K(p) = \frac{T_{1K} p}{1 + T_{2K} p}. \qquad (1.15)$$

После преобразования структурной схемы рис. 1.5 в преобразованной структурной схеме появляется звено, показанное пунктиром, с передаточной функцией

$$W'_K(p) = \frac{T'_K(p)(1 + Tp)}{1 + T_{2K} p}. \qquad (1.16)$$

В этой передаточной функции постоянная времени

$$T'_K = \frac{T_{1K}}{K_T K_П}. \qquad (1.17)$$

Параметры звена коррекции (1.15) определяются следующими соотношениями [8]:

$$T_{2K} = (4-6) T_{ОБ\ MAX}; \qquad (1.18)$$

$$\frac{T_{2K}}{T_{1K}} = M_{РН} R_Я \frac{T_{ОБ\ MAX}}{T_M K_T}, \qquad (1.19)$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени электропривода, а коэффициент M_{PH} определяется величиной желаемого перерегулирования переходного процесса отработки толчкообразного возмущения. Так, для получения вида переходного процесса с перерегулированием 15–20% коэффициент M_{PH} следует принимать равным 1,1.

Двухдвигательный взаимосвязанный электропривод

Рассмотрим вариант расположения механизмов, когда ведущий механизм является первым или последним в технологической линии, что, например, имеет место, когда участок или агрегат обработки состоит всего из двух механизмов. В этом случае анализ динамики или моделирование должны проводиться для взаимосвязанной системы двухдвигательного электропривода [10]. Структурная схема такого взаимосвязанного электропривода приведена на рис. 1.7.

При этом обозначения с индексом B относятся к параметрам системы регулирования электропривода ведущего механизма участка натяжения, а без индекса – к электроприводу тянущего механизма.

Эта схема позволяет независимо выполнить анализ динамики как электропривода тянущего механизма, так и электропривода ведущего механизма, учитывая их взаимное влияние через полосу.

Как видно из приведенной на рис. 1.7 структурной схемы, при анализе динамики системы регулирования натяжения тянущего механизма следует учитывать, что параллельно звену, описывающему передаточную функцию полосы, подключена отрицательная обратная связь, которую образует структурная схема электропривода ведущего механизма. В то же время при анализе динамических свойств системы регулирования скорости ведущего механизма следует, соответственно, учитывать, что параллельно звеньям, описывающим механическую часть этого электропривода, также включена отрицательная обратная связь, которую образует структурная схема электропривода тянущего механизма. Как и ранее, представляем, что электроприводы рассматриваемых механизмов выполнены по системе ТП-Д, а их аналоговые системы регулирования построены в соответствии с принципами подчиненного регулирования.

Для анализа динамики системы автоматического регулирования тянущего механизма структурная схема рис. 1.7 преобразуется к виду, показанному на рис. 1.8.

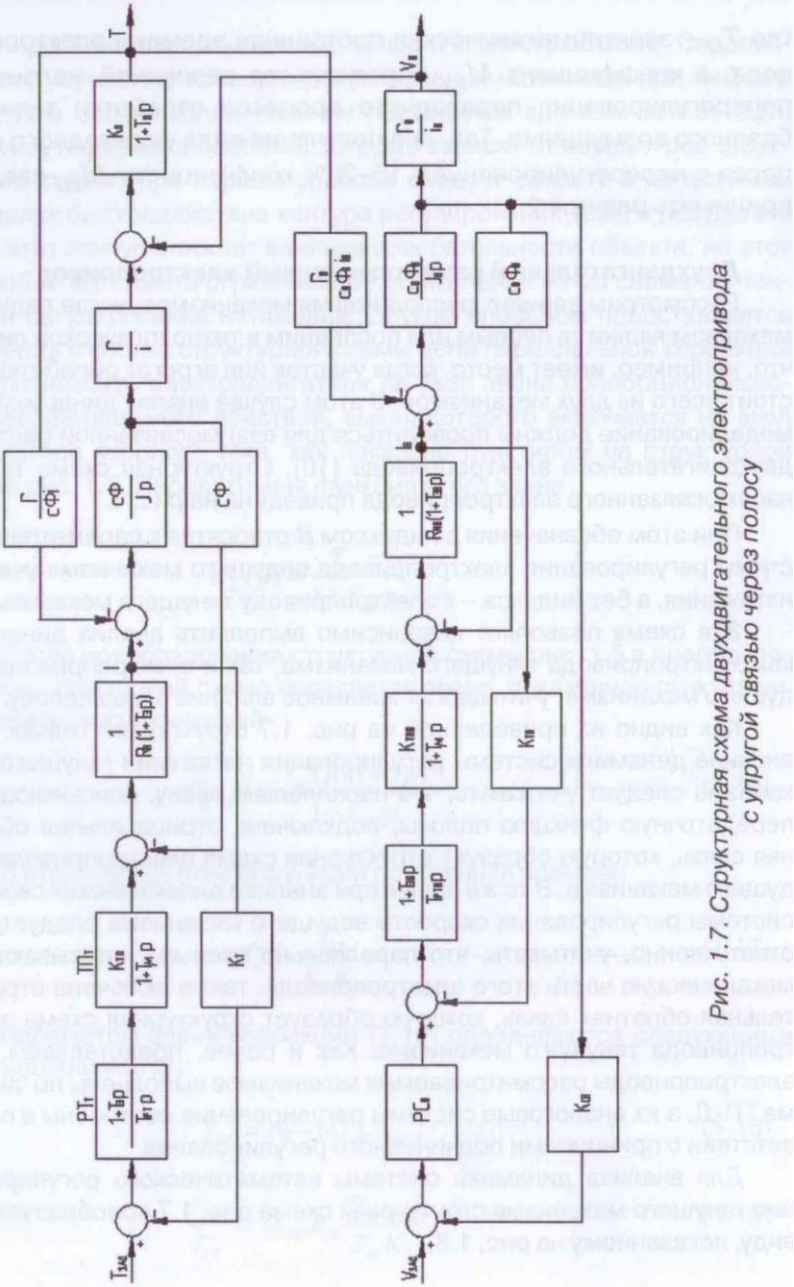


Рис. 1.7. Структурная схема двухдвигательного электропривода с упругой связью через полосу

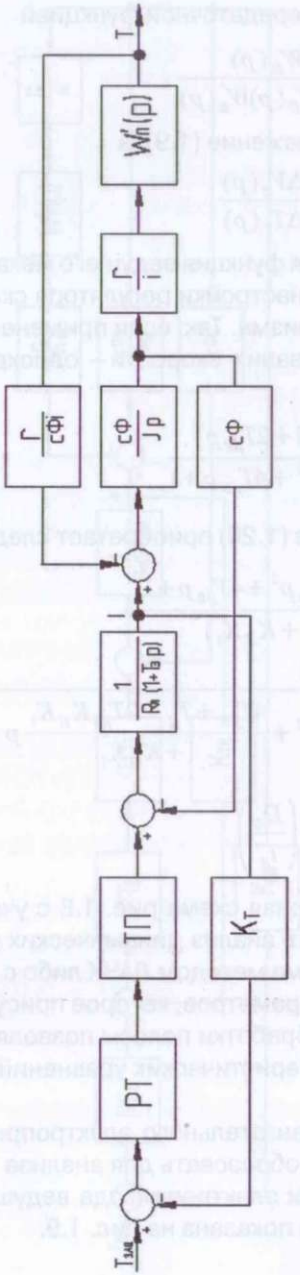


Рис. 1.8. Преобразованная структурная схема электропривода тянущего механизма

В схеме введено звено с передаточной функцией

$$W_{П}^{'}(p)=\frac{W_{П}(p)}{1+W_{П}(p)W_{В}^{'}(p)}, \qquad (1.20)$$

где $W_{П}(p)$ – известное выражение (1.9), а

$$W_{В}^{'}(p)=\frac{\Delta V_{В}(p)}{\Delta T_{Т}(p)} \qquad (1.21)$$

приведенная передаточная функция ведущего механизма по возмущению, которая зависит от настройки регулятора скорости системы регулирования этого механизма. Так, если применен П-регулятор скорости и система регулирования скорости – однократноинтегрирующая, то

$$W_{В}^{'}(p)=\frac{K_{1}(1+2T_{\mu В}p)}{8T_{\mu В}^{2}p^{2}+4T_{\mu В}p+1}. \qquad (1.22)$$

С учетом (1.22) выражение (1.20) приобретает следующий вид:

$$W_{П}^{'}(p)=\frac{K_{П}(8T_{\mu В}^{2}p^{2}+4T_{\mu В}p+1)}{(1+K_{П}K_{1})}\cdot$$

$$\cdot\frac{1}{\left(\frac{8T_{\mu В}^{2}T_{П}}{1+K_{П}K_{1}}p^{3}+\frac{4T_{\mu В}T_{П}+8T_{\mu В}^{2}}{1+K_{П}K_{1}}p^{2}+\frac{4T_{\mu В}+T_{П}+2T_{\mu В}K_{П}K_{1}}{1+K_{П}K_{1}}p+1\right)}, \qquad (1.23)$$

в котором

$$K_{1}=\frac{T_{\mu В}}{J}\cdot\left(\frac{D_{В}}{i_{В}}\right)^{2}. \qquad (1.24)$$

Преобразованная структурная схема рис. 1.8 с учетом выражения (1.23) позволяет выполнить анализ динамических свойств электропривода тянущего механизма методом ЛАЧХ либо с помощью моделирования. Соотношение параметров, которое присуще реальным электроприводам агрегатов обработки полосы позволяет применить для нахождения корней характеристических уравнений высокой степени метод Лина [12].

Структурную схему двухдвигательного электропривода, приведенную на рис. 1.6, можно преобразовать для анализа динамики системы регулирования скорости электропривода ведущего механизма. После преобразования она показана на рис. 1.9.

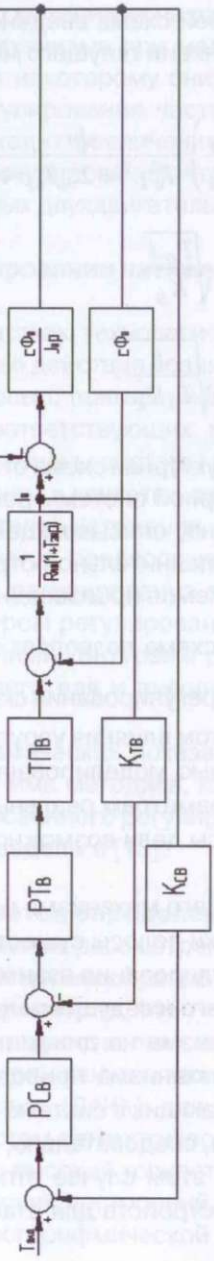


Рис. 1.9. Преобразованная структурная схема электропривода ведущего механизма

В приведенной структурной схеме введено обозначение преобразованной передаточной функции тянущего механизма по возмущению:

$$W_T'(p) = \frac{\Delta T_T(p)}{\Delta V_B(p)} = \left(\frac{i_B}{r_B}\right) \cdot \frac{Jp}{T_0^2 p^2 + 2\xi_0 T_0 p + 1}, \qquad (1.25)$$

в котором

$$T_0 = \frac{i_B}{r_B}\sqrt{\frac{T_П J}{K_П}}, \qquad (1.26)$$

$$\xi_0 = \frac{i_B}{2r_B}\sqrt{\frac{J}{T_П K_П}}. \qquad (1.27)$$

Как видно из рис. 1.9, структурная схема отличается от известной структурной схемы двухконтурной системы регулирования скорости тем, что интегрирующее звено, описывающее механическую часть электропривода, охвачено дополнительной отрицательной обратной связью через звено, определяемое произведением выражения (1.25) на коэффициент $\frac{r_B^2}{i_B^2 c\Phi_B}$. Эта схема позволяет выполнить анализ динамических свойств системы регулирования скорости электропривода ведущего механизма с учетом влияния упругой связи через полосу методом ЛАЧХ либо с помощью моделирования. Результаты такого анализа применительно к параметрам реальных механизмов одного из агрегатов обработки полосы дали возможность получить следующие основные выводы [10].

При расположении ведущего механизма на входе или на выходе участка или агрегата обработки полосы существует сильное влияние систем автоматического регулирования взаимосвязанных через полосу электроприводов тянущего и ведущего механизмов.

Влияние ведущего механизма на динамику системы регулирования натяжения тянущего механизма приводит к демпфированию колебаний натяжения, возникающих в системе упругая полоса – двигатель тянущего механизма, и, следовательно, к улучшению качества регулирования натяжения. В этом случае отпадает необходимость в применении специальных устройств для стабилизации натяжения полосы.

Влияние тянущего механизма на работу системы регулирования скорости ведущего механизма при малой длине полосы на участке натяжения приводит к некоторому снижению достижимого быстродействия контура регулирования частоты вращения. При большей длине полосы происходит увеличение быстродействия контура и ухудшение качества регулирования, что следует учитывать при расчете и наладке подобных двухдвигательных систем.

О прямом регулировании натяжения на агрегатах обработки полосы

На отдельных участках технологической обработки полосы на агрегатах непрерывного действия возникает необходимость поддержания натяжения полосы с повышенной точностью. Для управления электроприводами соответствующих тянущих механизмов в этом случае могут быть применены системы прямого регулирования натяжения, с использованием в качестве датчиков обратной связи непосредственных измерителей натяжения.

Такие системы могут реализовываться как двухконтурные, с внутренним контуром регулирования якорного тока электродвигателя и внешним контуром регулирования натяжения либо как трехконтурные, с внутренними контурами регулирования якорного тока и скорости электродвигателя и внешним контуром регулирования натяжения.

Для анализа динамических показателей таких систем прямого регулирования применима методика, которая использовалась выше при анализе систем косвенного регулирования натяжения. Результаты такого анализа приведены в [13].

Аналитический метод определения параметров ЛАЧХ

При анализе динамики рассмотренных выше систем регулирования с помощью ЛАЧХ целесообразно использовать аналитический метод определения параметров (14).

Предлагаемый метод позволяет определить все необходимые параметры аппроксимированных логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) для определения динамических свойств замкнутых систем автоматического регулирования электроприводов с достаточно высокой точностью. Метод не требует применения точных графических построений, специальной бумаги с миллиметровой или полулогарифмической сеткой и каких-либо приспо-

соблений. Для успешного использования предлагаемого метода необходимо только знание основных правил построения ЛАЧХ типовых звеньев систем автоматического регулирования и их комбинаций.

Исходным при выполнении расчета является знание передаточной функции разомкнутой системы регулирования, либо ее структурная схема с параметрами отдельных звеньев (коэффициенты усиления и постоянные времени).

Для выполнения расчета по известной передаточной функции разомкнутого контура или по структурной схеме системы автоматического регулирования с учетом соотношения основных параметров звеньев, рисуется подобие ЛАЧХ – ломаная линия, имеющая такую же конфигурацию (число и направление изломов), что и точная ЛАЧХ этого контура. Построение производится без соблюдения масштабов и без привязки к обеим осям координат, ось абсцисс – $log\ \omega$ вообще не проводится. После этого расчетным путем сначала определяется участок ЛАЧХ, на котором происходит пересечение с осью абсцисс, а затем величина частоты среза и запас устойчивости. По ним определяются основные параметры переходного процесса отработки толчка задания.

В основу расчета параметров ЛАЧХ положена связь между величинами коэффициента усиления и соответствующей частоты для любой точки аппроксимированной ЛАЧХ, которая может быть выражена математически для участка с любым наклоном относительно оси частот. Так как величина наклона любого участка ЛАЧХ равна $20n$ дб/дек, для участка ЛАЧХ с постоянным наклоном можно записать [15], [16]:

$$K_A(\omega_B)^n = K_B(\omega_A)^n, \qquad (1.28)$$

где обозначено: n – любое целое число, положительное при росте величины коэффициента усиления с ростом частоты и отрицательное – при его спадании; K_A, K_B – соответственно, коэффициенты усиления в точках ЛАЧХ при частотах ω_A и ω_B.

Так, например, для нарастающего участка ЛАЧХ с наклоном +20 дб/дек ($n = +1$) связь между координатами точек ЛАЧХ будет иметь вид:

$$\frac{K_A}{\omega_A} = \frac{K_B}{\omega_B}, \qquad (1.29)$$

а для спадающего участка с наклоном –20 дб/дек ($n = -1$):

$$K_A\omega_A = K_B\omega_B . \qquad (1.30)$$

Степень изменения коэффициента усиления ЛАЧХ при изменении частоты определяется выражением:

$$\frac{K_B}{K_A} = \left(\frac{\omega_B}{\omega_A}\right)^n . \qquad (1.31)$$

Посредством применения выражений (1.28) или (1.31) представляется возможным произвести последовательный расчет ортогональных координат точек перелома аппроксимированной ЛАЧХ исследуемого контура, найти величину частоты среза контура и параметры динамики переходного процесса. Однако, для сокращения затрат времени целесообразно использовать еще некоторые зависимости, полученные на основании (1.28).

Так, для ЛАЧХ любого вида коэффициент усиления K_X на произвольной частоте ω_X, расположенной на m-ом участке с наклоном $20n_m$ дб/дек, определяется таким выражением:

$$K_X = \frac{K_1\omega_X^{n_m}}{\omega_1^{n_1}\omega_2^{n_2-n_1}.....\omega_m^{n_m-n_{m-1}}}, \qquad (1.32)$$

где K_1 – коэффициент усиления на частоте ω_1, а ω_2..... ω_m – частоты изломов ЛАЧХ.

После определения частоты среза ЛАЧХ ω_c, по известным соотношениям [79] можно найти фазовое смещение на частоте среза и запас по фазе $\Delta\varphi$. После этого по приближенным формулам [17] определяются основные параметры переходного процесса системы автоматического регулирования:

– максимальное перерегулирование $\sigma = 1 - \sin\Delta\varphi$;

– время достижения первого максимума $t_m \approx \frac{\pi}{\omega_c}$;

– время достижения первого согласования $t_c \approx \frac{1{,}5 \div 2}{\omega_c}$.

1.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД МНОГОРОЛИКОВЫХ НАТЯЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Многороликовые натяжные механизмы широко применяются в составе агрегатов непрерывной обработки полосы, выполняя функции ведущих или тянущих механизмов [18], [19]. Чаще всего применяются двухроликовые S-образные натяжные станции, реже встречаются трехроликовые V-образные. Применяются также и четырехроликовые и пятироликовые W-образные натяжные механизмы. Все эти натяжные механизмы имеют индивидуальный электропривод роликов, и могут выполнять на участке обработки роль ведущих или тянущих механизмов. Системы управления электроприводами многороликовых механизмов должны разрабатываться с учетом специфических особенностей, присущих таким механизмам.

Если многороликовый натяжной механизм используется в качестве тянущего, то, как правило, в рабочем режиме он находится под действием разности натяжений в полосе на входе $T_{ВХ}$, в набегающей ветви, и на выходе $T_{ВЫХ}$, в сбегающей ветви полосы. При этом обеспечивается либо набор $(T_{ВХ} \langle T_{ВЫХ})$ либо сброс $(T_{ВХ} \rangle T_{ВЫХ})$ натяжения на участке обработки полосы. Натяжной механизм постоянно работает в одном режиме – двигательном или генераторном.

Рассмотрим особенности работы тянущего многороликового механизма на примере трехроликовой тянущей станции, рис. 1.10.

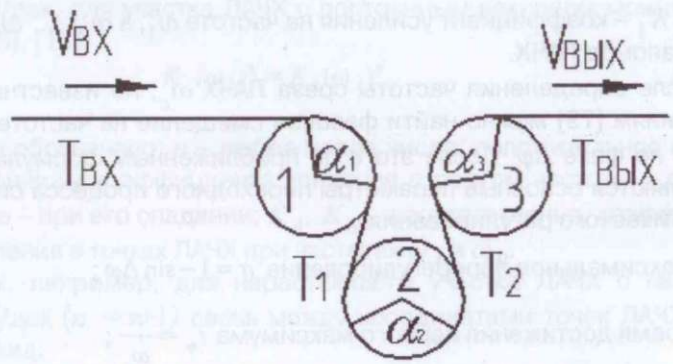


Рис. 1.10. Кинематическая схема трехроликового натяжного механизма

Примем, что механизм работает в режиме набора натяжения, то есть входное натяжение меньше выходного и приводные электродвигатели работают в генераторном режиме. Для исключения проскальзывания полосы по поверхности ролика («буксование») при обработке должны выдерживаться следующие известные соотношения между величинами натяжений в полосе:

$$T_{1\max} \le T_{BX\max} e^{\mu_1 \alpha_1}, \quad (1.33)$$

$$T_{2\max} \le T_1 e^{\mu_2 \alpha_2}, \quad (1.34)$$

$$T_{ВЫХ\max} \le T_2 e^{\mu_3 \alpha_3}. \quad (1.35)$$

Здесь μ_1, μ_2, μ_3 – коэффициенты трения полосы о поверхность роликов; α_1, α_2, α_3 – углы охвата роликов полосой; T_1, T_2 – натяжения между роликами. Если пренебречь малыми составляющими нагрузки приводных электродвигателей роликов (потери мощности на изгиб тонкой полосы, потери на трение в подшипниках и т.п.), по сравнению с мощностью, расходуемой на создание натяжения, то нагрузка каждого приводного электродвигателя ролика при постоянной скорости полосы V будет прямо пропорциональна разности натяжений на входе и выходе ролика. Если принять, для простоты, что приводные электродвигатели одинаковы, ролики имеют одинаковый диаметр и одинаковое передаточное число редуктора, то можно записать следующие выражения для якорных токов приводных электродвигателей постоянного тока или для активных составляющих токов статора в случае применения асинхронных приводных электродвигателей:

$$I_{1\max} = k(T_{BX} - T_{1\max}) = kT_{BX}(1 - e^{\mu_1 \alpha_1}), \quad (1.36)$$

$$I_{2\max} = k(T_{1\max} - T_{2\max}) = kT_{BX} e^{\mu_1 \alpha_1}(1 - e^{\mu_2 \alpha_2}), \quad (1.37)$$

$$I_{3\max} = k(T_{2\max} - T_{ВЫХ\max}) = kT_{BX} e^{(\mu_1 \alpha_1 + \mu_2 \alpha_2)}(1 - e^{\mu_3 \alpha_3}), \quad (1.38)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от диаметра ролика, передаточного числа редуктора и конструктивных параметров приводного электродвигателя.

Зависимость величины $e^{\mu\alpha}$ от параметров ролика показана на рис. 1.11.

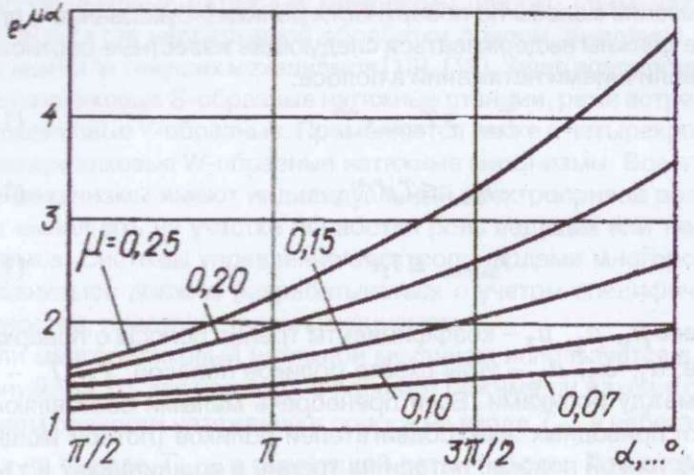


Рис. 1.11. Зависимость коэффициента $e^{\mu\alpha}$ от угла охвата и коэффициента трения

Если принять, для упрощения, величины коэффициентов трения полосы о ролики равными для всех трех роликов $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$, то соотношения, определяющие требуемое распределение загрузки между приводными электродвигателями роликов для набора максимального натяжения без «буксования», будут иметь вид:

$$\frac{I_{1\max}}{I_{2\max}} = \frac{1-e^{\mu\alpha_1}}{e^{\mu\alpha_1}(1-e^{\mu\alpha_2})} \approx \frac{1}{e^{\mu\alpha_1}}, \qquad (1.39)$$

$$\frac{I_{2\max}}{I_{3\max}} = \frac{e^{\mu\alpha_1}(1-e^{\mu\alpha_2})}{e^{\mu(\alpha_1+\alpha_2)}(1-e^{\mu\alpha_3})} \approx \frac{1}{e^{\mu\alpha_2}}. \qquad (1.40)$$

Из приведенных выражений видно, что загрузка электродвигателей роликов неодинакова, она увеличивается в этом случае от входного ролика к выходному.

Аналогичным способом можно получить соотношения, определяющие распределение загрузки между приводными электродвигателями роликов для варианта, когда $T_{ВХ} \rangle T_{ВЫХ}$, то есть, когда на натяжном механизме происходит сброс натяжения и электродвигатели работают в двигательном режиме. Для этого случая справедливы соотношения:

$$\frac{I_{1\max}}{I_{2\max}} \approx e^{\mu\alpha_2}, \qquad (1.41)$$

$$\frac{I_{2\max}}{I_{3\max}} \approx e^{\mu\alpha_3} \qquad (1.42)$$

Приведенные выражения показывают, что в этом варианте загрузка приводных электродвигателей также неодинакова. Она снижается от входного ролика к выходному.

Рассмотренные обстоятельства необходимо учитывать как при выборе приводных электродвигателей для многороликовых механизмов, работающих в качестве тянущих, так и при формировании их загрузки (токов) в рабочем режиме обработки полосы.

В системе автоматизированного управления многодвигательным электроприводом подобного механизма при групповом задании натяжения такой тянущей станции приведенный алгоритм распределения нагрузки между электроприводами должен быть учтен соответствующими корректирующими коэффициентами для каждого электропривода, как в режиме ручного задания натяжения, так и при формировании величины задания от автоматической системы управления верхнего уровня, т.е. системы управления агрегатом.

При разработке системы управления многороликового натяжного механизма, когда он используется в качестве **ведущего,** следует принимать во внимание специфические особенности работы электроприводов в этом режиме. Как уже отмечалось ранее, основная нагрузка электропривода ведущего механизма, если он расположен между двумя или более тянущими механизмами, определяется разностью натяжений в полосе на входе и выходе из этого механизма. В свою очередь, эти натяжения образуются суммой натяжений тянущих механизмов, расположенных, соответственно, до и после ведущего, и являются в общем случае величиной независимой. Из-за этого в рабочем режиме имеется вероятность неконтролируемой

перегрузки электродвигателя ведущего механизма и его источника питания. Эта перегрузка не приведет к немедленному срабатыванию защиты электродвигателя, но создаст аварийный перегрев его обмоток. Кроме этого, работа ведущего механизма может сопровождаться изменением знака приложенной нагрузки (разности натяжений на входе и выходе), что требует во избежание проскальзывания полосы по роликам перераспределения загрузки между приводными электродвигателями тянущих механизмов в соответствии с приведенными выражениями (1.39)–(1.42) . В некоторых случаях в процессе работы существует возможность практически полного исчезновения натяжения с одной стороны ведущего механизма, например, когда перед ним расположены два разматывателя и происходит сварка концов полос после окончания размотки с одного из них. В этом режиме минимальное натяжение в полосе на входе должно быть создано путем использования прижимных роликов первого по ходу движения полосы ролика.

Принимая во внимание указанные особенности работы механизмов агрегата обработки полосы, целесообразно отказаться от построения систем управления электроприводами роликов по автономному принципу. В этом случае на один из роликов возлагаются функции ведущего механизма, а остальные становятся ведомыми, что создает предпосылки вышеописанных аварийных ситуаций. Разработанные и апробированные варианты систем зависимого управления электроприводами многороликового натяжного механизма [20], [21], [22], [23], [24] гарантируют отсутствие перегрузки электропривода одного ведущего ролика, так как ведущим становится весь многодвигательный электропривод многороликового натяжного механизма. Кроме того, сводится к минимуму возможность возникновения проскальзывания полосы по поверхности ролика.

При зависимом управлении один из роликов многороликового механизма становится ведущим, а остальные – тянущими, но режим работы (двигательный или генераторный) и загрузка электродвигателей тянущих роликов определяются режимом работы и величиной загрузки электродвигателя ведущего ролика. Таким образом, электродвигатели всех роликов работают в одинаковом режиме, принимая и распределяя между собой нагрузку от разности натяжений полосы на входе и выходе натяжного механизма в требуемом соотношении.

Функциональная схема одного из вариантов такой системы управления, применительно к трехроликовому натяжному механизму

с электроприводами постоянного тока и аналоговым управлением, представлена на рис. 1.12.

На схеме обозначено: М, ТГ – приводные электродвигатели и тахогенераторы; ТП – тиристорные преобразователи; ДТ – датчики тока; РТ, РС – регуляторы тока и скорости; РО – блоки ограничения сигнала; ЗПУ – знакочувствительные пороговые устройства; ЗС – групповой задатчик скорости; СНЭ – согласующие нелинейные элементы.

Независимо от расположения многороликового механизма в технологической линии агрегата обработки полосы, ведущим принят электропривод второго ролика, а электроприводы первого и третьего являются тянущими, зависимыми. Как видно их схемы, каждый индивидуальный тиристорный электропривод роликов снабжен двухконтурной системой автоматического регулирования скорости. После перевода остальных тянущих механизмов агрегата в режим натяжения и возникновения разности натяжений на входе и выходе рассматриваемого натяжного механизма появляется нагрузка на валу электродвигателя ведущего второго ролика, что влечет за собой появления якорного тока приводного электродвигателя и соответствующего выходного сигнала измерителя тока ДТ.

Выходной сигнал датчика тока ДТ электропривода этого ролика поступает одновременно на входы двух знакочувствительных пороговых устройств ЗПУ. При срабатывании ЗПУ подключают на входы регуляторов скорости электроприводов тянущих роликов 1 и 3 дополнительный сигнал задания, который выводит эти регуляторы на ограничение, определяемое блоками РО. В результате эти два электропривода переходят в режим косвенного регулирования натяжения с поддержанием заданного значения якорного тока – двигательного или генераторного, в зависимости от знака сигнала ДТ электропривода второго ролика. Величина якорного тока электроприводов тянущих механизмов определяется уровнем сигнала ДТ электропривода второго ролика, который одновременно поступает на входы блоков ограничения РО электроприводов тянущих роликов через согласующие нелинейные элементы СНЭ. Коэффициент согласования этих блоков зависит от полярности сигнала ДТ и конструктивных характеристик натяжных механизмов. Это позволяет автоматически обеспечить требуемый закон распределения нагрузки между всеми электродвигателями трехроликового натяжного механизма, в том числе и при изменении режима работы всего натяжного механизма с двигательного на генераторный.

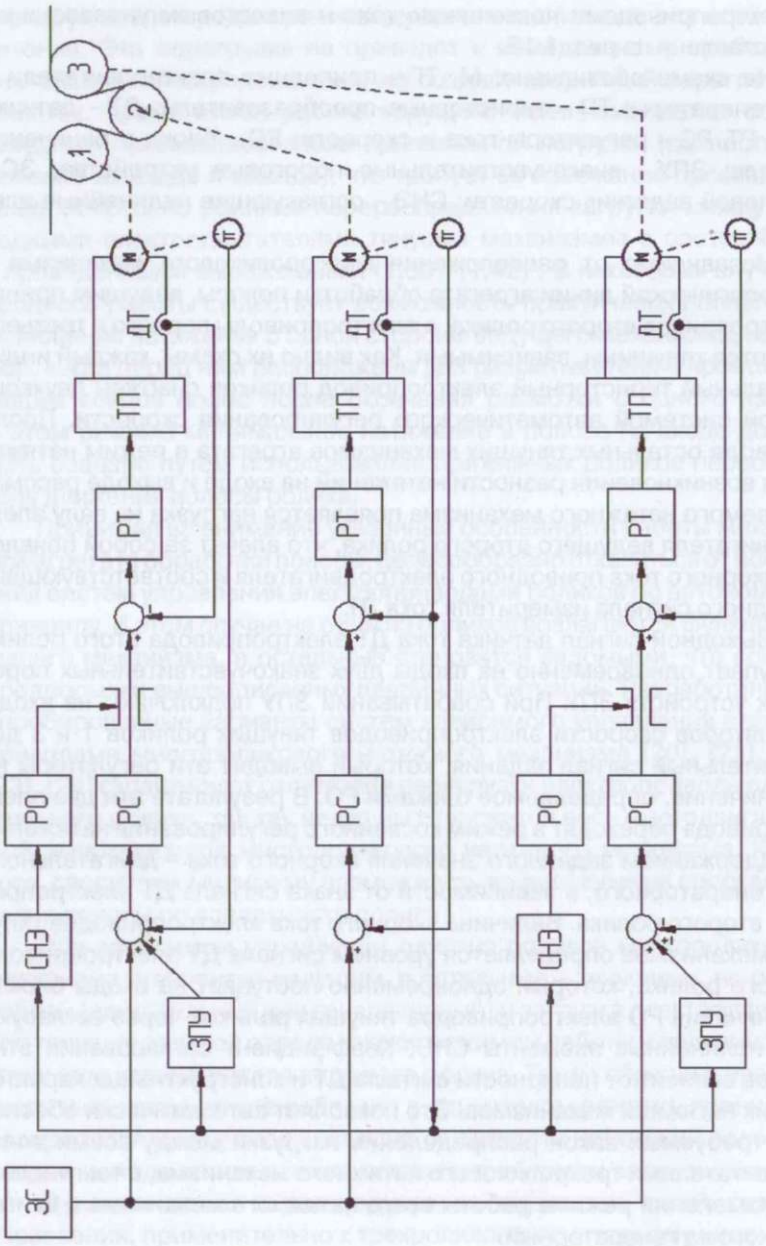


Рис. 1.12. Функциональная схема системы зависимого управления электроприводами трехроликового натяжного механизма

Описанная схема зависимого управления обладает свойствами самонастройки при изменении условий работы и может быть отнесена к классу адаптивных систем управления. Ее быстродействие может быть повышено посредством использования в качестве основного управляющего сигнала – выходного сигнала регулятора скорости электропривода ведущего механизма – ролика 2 [21]. Положительно на работу схемы зависимого управления влияет введение гистерезисных элементов для управления пороговыми устройствами ЗПУ [23]. Это способствует ликвидации отключений пороговых устройств после перераспределения нагрузки электропривода ведущего ролика и, соответственно, уменьшения его якорного тока и сигнала ДТ.

Для зависимого управления электроприводами двухроликового S-образного натяжного механизма может быть применена схема с групповым источником питания электродвигателей и распределением нагрузок между ними посредством воздействия на токи возбуждения в случае применения электродвигателей постоянного тока или на реактивные составляющие тока статора при применении асинхронных приводных электродвигателей [22].

1.5. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕТЛЕВОГО НАКОПИТЕЛЯ ПОЛОСЫ

Петлевой накопитель полосы, входящий в состав основных механизмов агрегатов непрерывной обработки полосы и станов «бесконечной» холодной прокатки хотя и не участвует в процессе технологической обработки полосы, тем не менее представляет собой весьма ответственный механизм в составе агрегатов, от надежной работы которого зависит надежность работы и производительность указанных агрегатов. Применяемые петлевые накопители горизонтального и вертикального типов обеспечивают сохранение в натянутом состоянии необходимого запаса полосы между частями агрегатов. Этот запас используется для обеспечения непрерывности ведения технологического процесса в средней части агрегата обработки полосы при технологических остановках головной или хвостовой частей, или для обеспечения непрерывной прокатки в клетях прокатного стана «бесконечной» холодной прокатки при технологической остановке головной части.

Основой механизма петлевого накопителя горизонтального типа является рельсовая тележка с установленными на ней неприводными

обводящими барабанами (роликами), количество которых определяет количество петель и суммарный запас полосы в накопителе. Роль тележки в накопителе вертикального типа выполняет траверза с установленными на ней роликами аналогичного назначения. Необходимый запас полосы в накопителях горизонтального типа создается за счет увеличения длины пути тележки, а в накопителях вертикального типа – путем увеличения количества обводящих роликов с удлинением траверзы. Для простоты далее будет рассматриваться петлевой накопитель горизонтального типа стана «бесконечной» холодной прокатки, расположенный между головной частью стана и районом непрерывной группы прокатных клетей. Кинематическая схема для этого случая показана на рис. 1.13.

На рис. 1.13 обозначено: Р1, Р2 – разматыватели полосы; ССМ – стыкосварочная машина; ВМ – трехроликовый ведущий механизм головной части; ТМ – трехроликовый тянущий механизм входной части; Т – тележка; Б – канатный барабан; Р – редуктор; М – приводной электродвигатель петлевого накопителя.

Передвижение тележки такого накопителя осуществляется при помощи канатного барабана (лебедки), который приводится во вращение электродвигателем, работающим с системой автоматического регулирования натяжения каната, косвенного действия. На агрегатах обработки относительно толстых полос электропривод тележки – редукторный. На агрегатах, где обрабатывается тонкая полоса, применяется безредукторный электропривод с использованием низкооборотных электродвигателей, как, например, типа МПС 150-50, 150 кВт, 50 об/мин.

Скоростной режим работы электропривода петлевого накопителя – реверсивный. Режим нагрузки – двигательный или генераторный, в зависимости от направления движения тележки. При опорожнении накопителя, во время, когда происходит процесс сварки полос в головной части стана перед накопителем, скорость входа полосы в накопитель практически равна нулю, а стан продолжает вести прокатку на рабочей скорости. Электропривод тележки работает в генераторном режиме при движении тележки в сторону первой клети стана. Линейная скорость движения тележки в этом режиме в m раз меньше скорости первой клети стана, где m – количество петель полосы в накопителе.

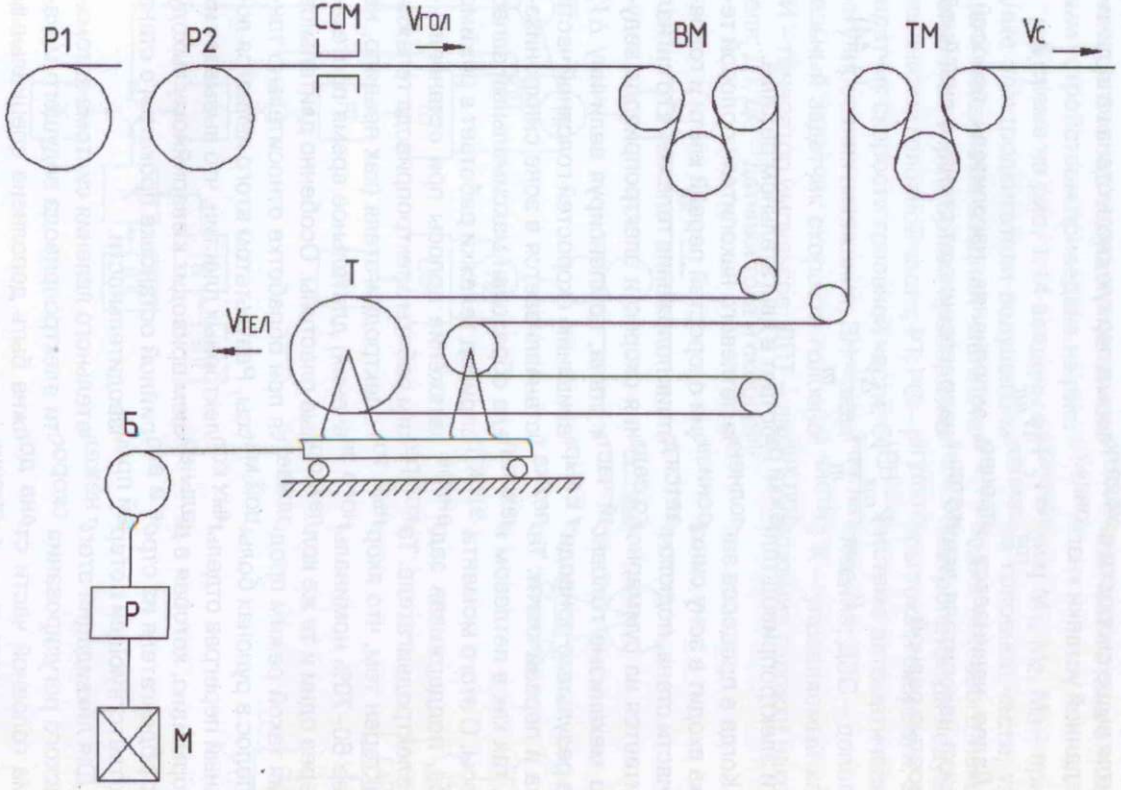


Рис. 1.13. Кинематическая схема головной части стана бесконечной холодной прокатки

После окончания процесса сварки полос двух разматывателей, скорость головной части стана после ее разгона увеличивается и становится выше скорости входа полосы в первую клеть стана на величину заданной уставки «нагона»

$$V_{ГОЛ} = V_C + \Delta V_{НАГ}. \quad (1.43)$$

Далее начинается процесс заполнения накопителя полосой. Тележка накопителя движется в направлении «от стана» с линейной скоростью равной

$$V_{ТЕЛ} = \frac{V_{ГОЛ} - V_C}{m} = \frac{\Delta V}{m}. \quad (1.44)$$

и электропривод тележки работает в двигательном режиме.

Когда в процессе заполнения петлевого накопителя полосой тележка входит в зону синхронизации скоростей первой клети и головной части стана, подключается датчик положения тележки. Его сигнал вычитается из суммарного задания скорости электропривода ведущего механизма головной части стана, компенсируя величину ΔV, что в результате приводит к выравниванию скоростей головной части стана и первой клети. Тележка останавливается в зоне синхронизации, так как в петлевом накопителе образован максимальный запас полосы. С этого момента электропривод тележки работает в режиме упора, поддерживая заданное натяжение полосы при остановленном электродвигателе. Такой режим работы электропривода тележки характерен тем, что якорный ток электродвигателя (как правило, не менее 60–70% номинального значения) длительное время протекает через одни и те же коллекторные пластины. Особенно длительное время такой режим продолжается при обработке относительно тонких полос в рулонах большой массы. Результатом этого является локальный перегрев отдельных коллекторных пластин, что вызывает их деформацию, которая в дальнейшем приводит к аварийному выходу электродвигателя из строя и аварийной остановке прокатного стана с соответствующей потерей производительности.

Для ликвидации этого нежелательного явления система автоматического регулирования скорости электропривода ведущего механизма головной части стана должна быть дополнена специальным устройством [25]. Оно обеспечивает отсутствие аварийного перегрева коллекторных пластин посредством организации периодическо-

го поворачивания якоря приводного электродвигателя. Упрощенная функциональная схема системы регулирования частоты вращения электропривода ведущего механизма головной части стана с указанным устройством приведена на рис. 1.14.

В схеме на рис. 1.14 введены обозначения: M_1, M_2, M_3 – приводные электродвигатели ведущего механизма головной части, тянущего механизма входной части стана и тележки петлевого накопителя; ТП – тиристорный преобразователь электропривода ведущего механизма головной части; РТ, РС – регуляторы тока и скорости; ЗС – задатчик скорости головной части; САРН – система автоматического регулирования натяжения; ЗН – задатчик натяжения; ДЗС – дополнительный задатчик скорости головной части; К – управляемый ключ; ГИ – генератор импульсов; ДПТ – датчик положения тележки накопителя; ДТ, ДС – датчики тока и скорости.

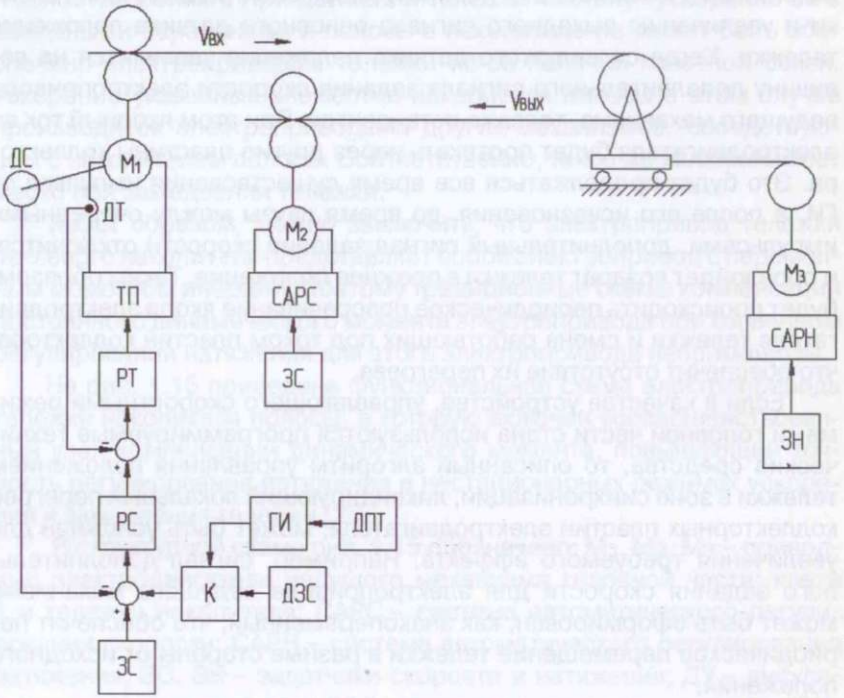


Рис. 1.14. Функциональная схема системы регулирования скорости ведущего механизма головной части стана

Работа дополнительного устройства происходит следующим образом. При входе тележки в процессе набора полосы в накопитель в зону синхронизации происходит срабатывание дискретного датчика положения тележки ДПТ. Он запускает генератор импульсов ГИ, на выходе которого появится последовательность прямоугольных импульсов требуемой длительности и скважности. Поступление импульсов от генератора ГИ на управляющий вход ключа К приводит к срабатыванию последнего и подаче на соответствующий вход задатчика интенсивности системы регулирования скорости электропривода ведущего механизма дополнительного сигнала (величиной 5–10% от уровня задания максимальной скорости головной части). Линейная скорость головной части увеличивается и становится несколько больше скорости первой клети стана. Тележка накопителя начинает движение в сторону от стана на увеличение запаса полосы в накопителе, что приводит к повороту якоря электродвигателя тележки и увеличению выходного сигнала основного датчика положения тележки. Когда сигнал этого датчика положения увеличится на величину дополнительного сигнала задания скорости электропривода ведущего механизма, тележка остановится. При этом якорный ток ее электродвигателя будет протекать через другие пластины коллектора. Это будет продолжаться все время существования импульса от ГИ, а после его исчезновения, во время паузы между очередными импульсами, дополнительный сигнал задания скорости отключится, и произойдет возврат тележки в прежнее положение. Таким образом, будет происходить периодическое поворачивание якоря электродвигателя тележки и смена работающих под током пластин коллектора, что обеспечит отсутствие их перегрева.

Если в качестве устройства, управляющего скоростными режимами головной части стана используются программируемые технические средства, то описанный алгоритм управления положением тележки в зоне синхронизации, ликвидирующий локальный перегрев коллекторных пластин электродвигателя, может быть усложнен для увеличения требуемого эффекта. Например, сигнал дополнительного задания скорости для электропривода ведущего механизма может быть сформирован, как знакопеременный, что обеспечит периодическое перемещение тележки в разные стороны от исходного положения.

Практика эксплуатации и анализ показали, что электропривод тележки петлевого накопителя имеет еще одну специфическую особенность, которую следует учитывать при проектировании его си-

стемы автоматизированного управления. Эта особенность связана с наличием канатной связи между приводным барабаном и тележкой. Как известно, для повышения точности поддержания натяжения в переходных режимах изменения линейной скорости тележки (разгон – торможение головной части или стана) необходимо производить компенсацию динамического момента электропривода тележки, который определяется величиной ускорения электропривода и его суммарного приведенного момента инерции. Наличие связи через канат существенно влияет на характер протекания переходных процессов в электроприводе тележки. Так, при разгоне тележки в направлении «от стана» электропривод обеспечивает ускорение всех его элементов (электродвигатель, редуктор, канатный барабан, передаточные звенья), а также ускорение тележки с обводными барабанами и полосы в накопителе, включая ролики поддерживающих полосу устройств и холостые ролики. При движении тележки «к стану» ускорение ее с обводными барабанами и полосы в накопителе не может быть обеспечено электроприводом тележки из-за наличия канатной связи. Ускорение указанных элементов накопителя полосы в этом случае производится электроприводами других механизмов, соседствующих с накопителем полосы. Соответственно, такое же явление имеет место при замедлении тележки.

Таким образом, можно заключить, что электропривод тележки петлевого накопителя представляет собой электропривод с переменным моментом инерции. Поэтому традиционные схемы компенсации постоянного динамического момента электропривода при косвенном регулировании натяжения для этого электропривода неприменимы.

На рис. 1.15 приведена функциональная схема электропривода тележки накопителя полосы, в которую включен усовершенствованный узел компенсации динамического момента, повышающий точность регулирования натяжения в нестационарных режимах ускорения и замедления тележки [26].

В структурной схеме рис. 1.15 обозначено: M_1, M_2, M_3 – приводные электродвигатели ведущего механизма головной части; клети 1 и тележки накопителя; САРС – система автоматического регулирования скорости; САРН – система автоматического регулирования натяжения; ЗС, ЗН – задатчики скорости и натяжения; ДУ – дифференцирующее устройство; ДЗС – дискриминатор знака сигнала; БУ1, БУ2, БУ3 – блоки умножения; ДШ, ДТП – датчики ширины и толщины полосы; ДПТ – датчик положения тележки.

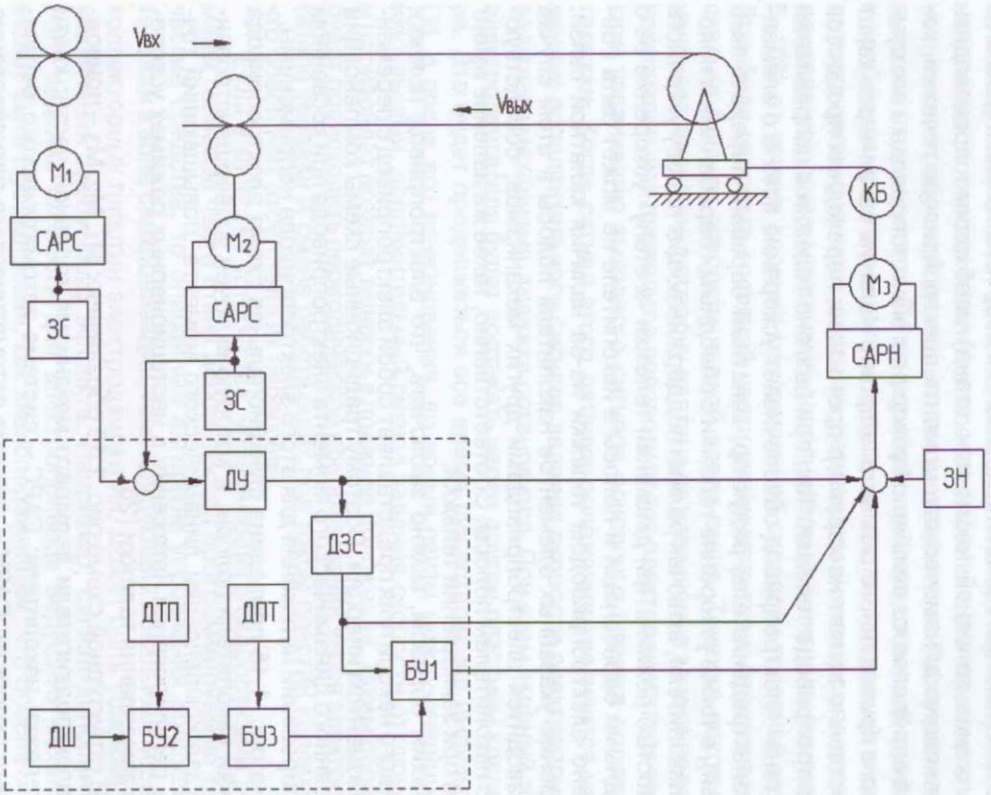


Рис. 1.15. Функциональная схема электропривода тележки накопителя полосы

Этот узел, выделенный пунктиром, обеспечивает определение величины момента инерции для точной компенсации динамического момента электропривода тележки накопителя. Для понимания работы узла рассмотрим, как зависит величина момента инерции электропривода тележки от параметров и режима работы электропривода. Динамический момент, приведенный к валу электродвигателя тележки

$$M_{ДИН} = J\frac{i}{r}\cdot\frac{d(V_{ВХ} - V_{ВЫХ})}{dt}. \qquad (1.45)$$

Здесь обозначено: J – приведенный момент инерции электропривода тележки петлевого накопителя; i, r – передаточное число редуктора и радиус барабана лебедки; $V_{ВХ}$, $V_{ВЫХ}$ – линейные скорости полосы на входе и выходе петлевого накопителя, задаваемые соответствующими электроприводами.

Величина приведенного момента инерции электропривода при движении тележки накопителя в направлении «к стану» определяется выражением

$$J_1 = J_Д + J_Б + J_{РП}, \qquad (1.46)$$

в которое входят момент инерции электродвигателя $J_Д$, момент инерции барабана лебедки $J_Б$ и момент инерции редуктора с элементами передачи $J_{РП}$. При движении тележки накопителя в направлении «от стана» величина момента инерции будет равна

$$J_2 = J_Д + J_Б + J_{РП} + J_{ТЕЛ} + J_{ПОЛ}, \qquad (1.47)$$

где $J_{ТЕЛ}$ – приведенный момент инерции тележки, включая моменты инерции обводных барабанов, поддерживающих и холостых роликов, а $J_{ПОЛ}$ – момент инерции полосы, находящейся в накопителе, который, в свою очередь, определяется объемом этой полосы.

В состав узла компенсации динамического момента входит дифференцирующее устройство ДУ, на вход которого подключена разность сигналов задания скоростей электроприводов на входе и выходе петлевого накопителя, выход подключен к первому входу САРН электропривода тележки и к дискриминатору знака сигнала ДЗС. Дискриминатор знака сигнала ДЗС подключен ко второму входу САРН электропривода тележки и к первому блоку умножения БУ1. Измерители ширины и толщины полосы подключены к двум входам

второго блока умножения БУ2, выход которого и выход датчика положения ДТП тележки в накопителе подключены к входам третьего блока умножения БУ3. Его выход подключен ко второму входу БУ1, выход которого, в свою очередь, подключен к третьему входу САРН электропривода тележки накопителя.

Работа узла компенсации динамического момента происходит следующим образом. В стационарном режиме работы электропривода тележки накопителя при неизменной величине скоростей полосы на входе и выходе, либо их изменении с одинаковой величиной и знаком ускорения или замедления, скорость движения тележки накопителя полосы неизменна или равна нулю. Сигнал на выходе дифференцирующего устройства отсутствует. Если же происходит изменение только одной из скоростей – на входе или на выходе накопителя, либо изменение обеих этих скоростей, но с разными темпами, на выходе дифференцирующего устройства ДУ появляется сигнал, пропорциональный алгебраической разности ускорений полосы на входе и выходе накопителя. Этот сигнал служит основой для формирования сигнала компенсации динамического момента электропривода лебедки, который в этом режиме также изменяет свою линейную скорость, а значит, и запасенную кинетическую энергию.

В режиме, когда происходит ускорение электропривода тележки накопителя в направлении «к стану» или замедление этого электропривода в направлении «от стана», сигнал с выхода дифференцирующего устройства ДУ не проходит через дискриминатор знака сигнала ДЗС, а поступает только на первый вход САРН, образуя, таким образом, задание на динамический момент электропривода, определяемый моментом инерции этого электропривода по выражению (1.46). Если же происходит ускорение или замедление электропривода тележки в противоположных направлениях, то сигнал с выхода дифференцирующего устройства ДУ поступает не только на первый вход САРН, но через дискриминатор знака ДЗС – на второй вход САРН и на вход первого блока умножения БУ1. Сигнал на втором входе САРН образует задание на динамический момент электропривода, который определяется величиной постоянной составляющей момента инерции $J_{ТЕЛ}$ (1.47). Сигнал выхода первого блока умножения БУ1, который пропорционален величине ускорения и массы полосы, находящейся в накопителе и вычисляемой как произведение габаритных размеров полосы, поступает на третий вход САРН и образует задание на динамический момент электропривода, который соответствует

величине переменной составляющей момента инерции $J_{пол}$, зависящей от массы полосы в накопителе.

Компенсация динамического момента электропривода тележки накопителя полосы в соответствии со структурной схемой рис. 1.15 обеспечивает повышенную точность поддержания натяжения в полосе в динамических режимах работы электропривода тележки накопителя. Описанный алгоритм компенсации динамического момента может быть реализован при использовании программируемых технических средств для решения задач общего управления участком обработки полосы.

1.6. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ АГРЕГАТА ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ ПОЛОСЫ

Агрегаты поперечной резки полосы по своей технологической схеме несколько отличаются от типичных агрегатов непрерывной обработки полосы. Основное назначение этих агрегатов – разделение горячекатаной или холоднокатаной полосы в рулонах на отдельные листы требуемого размера, сортировка отрезанных листов и формирование их в пакеты. Поэтому одна часть любого агрегата поперечной резки, до летучих ножниц, работает в режиме непрерывной обработки полосы, а вторая часть – в режиме обработки листов, без связи работающих механизмов через полосу.

Важнейшим технологическим механизмом агрегата поперечной резки являются летучие ножницы, как правило, барабанного типа, и их электропривод, качество работы которого во многом определяет качество готовой продукции агрегата. Основное назначение летучих ножниц – порезка полосы на мерные листы заданной длины, независимо от величины линейной скорости полосы и режима работы агрегата: ускорение, замедление или работа на постоянной скорости [1].

Для обеспечения мерного реза полосы традиционным решением при конструировании барабанных летучих ножниц был групповой электропривод барабанов ножниц и установленной перед ними многороликовой правильной машины с использованием сложного редуктора и коробки передач, которая изменяла передаточное число редуктора при изменении длины отрезаемых листов. Более прогрессивным решением является применение индивидуальных электроприводов правильной машины и барабанов летучих ножниц с оснащением их системой мерного реза полосы на мерные длины.

Эта система предназначена для порезки полосы на листы заданной мерной длины. Это достигается посредством соответствующего регулирования в цикле порезки средней скорости барабанов летучих ножниц и линейной скорости подачи полосы с выравниванием этих скоростей к моменту реза [27]. В промежутках между резами скорость ножниц изменяется по кусочно-параболическому закону, которому соответствует симметричная треугольная диаграмма динамического тока электродвигателя ножниц при их разгоне и торможении. Изменение указанного динамического тока осуществляется по линейному закону, в результате чего исключаются удары в кинематических звеньях механизма ножниц, что способствует уменьшению их износа и увеличению длительности межремонтного срока службы механического оборудования. Ниже описывается устройство управления электроприводом барабанных летучих ножниц, которое формирует оптимальный для данной кусочно-параболической тахограммы сигнал задания скорости электродвигателя ножниц, обеспечивающий минимум тепловых потерь в электроприводе. Эта система также формирует соответствующий требуемой тахограмме сигнал задания динамического тока электродвигателя для повышения быстродействия системы автоматического регулирования. Высокая точность порезки полосы на мерные длины достигается путем устранения ошибки, которую вызывает статизм системы регулирования скорости.

Функциональная схема описываемого устройства приведена на рис. 1.16, а на рис. 1.17 показана тахограмма движения электропривода летучих ножниц и диаграмма тока электродвигателя ножниц.

На рис. 1.16 введены следующие обозначения: Н – барабанные ножницы; М – приводной электродвигатель ножниц; ТП – тиристорный преобразователь; РТ, ДТ – регулятор тока и датчик тока; РС, ДС – регулятор и датчик скорости; ДП – датчик положения ножей; БС – блок суммирования сигналов; БИ1, БИ2, БИ3 – блоки интегрирования; МДУ1–МДУ4 – множительно-делительные устройства; К – ключ; ЗД – задатчик длины отрезаемых листов; БП – блок переключения.

Устройство по функциональной схеме рис. 1.16 работает следующим образом. В исходном состоянии, которое соответствует моменту времени, непосредственно предшествующему очередному резу, на входы блока суммирования сигналов БС и блока интегрирования БИ1 подается сигнал пропорциональный скорости полосы $V_{П}$. На выходе блока суммирования БС сигнал задания регулятору скорости равен $V_{НЗ} = V_{П}$, так как сигнал ΔV на выходе множительно-

делительного блока МДУ3 в этот момент равен нулю. Так как сигнал задания скорости V_{H3} отрабатывается системой автоматического регулирования скорости электропривода с некоторой статической ошибкой регулятора РС, на вход блока интегрирования БИ1 подан сигнал V_H, пропорциональный фактической скорости ножниц, от датчика ДС. В результате на выходе этого блока имеется сигнал

$$\Delta l_{t=0} = \Delta l_C \,, \tag{1.48}$$

который подается на вход РС, компенсируя статическую погрешность, и обеспечивая тем самым синхронизацию скоростей полосы и ножниц, или равенство сигналов $V_П$ и V_H.

Сигнал задания динамического тока электродвигателя $I_Д$ на выходе множительно-делительного устройства МДУ4 в этот момент тоже равен нулю.

Начало цикла порезки определяется сигналом датчика положения ножей ДП в момент окончания предыдущего реза. По этому сигналу, который подается на первый вход блока переключения БП, на втором выходе этого блока формируется сигнал открытия ключа К, через который на вход множительно-делительного устройства МДУ1 подается сигнал $V_П$. На второй вход умножения блока МДУ1 и на входы деления блоков МДУ2, МДУ3 и МДУ4 с выхода задатчика длины ЗД отрезаемой полосы подается величина рассогласования пути

$$\Delta L = L - L_{MIN} \,, \tag{1.49}$$

где L – заданная мерная длина отрезаемой полосы, а L_{MIN} – минимальная длина отрезаемой полосы, равная длине траектории ножей ножниц в цикле порезки.

На вход деления МДУ1 со второго выхода задатчика ЗД подается величина

$$L_1 = L - L_C \,, \tag{1.50}$$

в которой L_1 – величина перемещения полосы, соответствующая части времени цикла порезки $t_П$, в течение которой ножницы отрабатывают заданное рассогласование пути ΔL; L_C – величина перемещения полосы, соответствующая части времени цикла порезки t_C, в течение которой завершается переходный процесс изменения скорости ножниц и происходит их синхронизация со скоростью полосы.

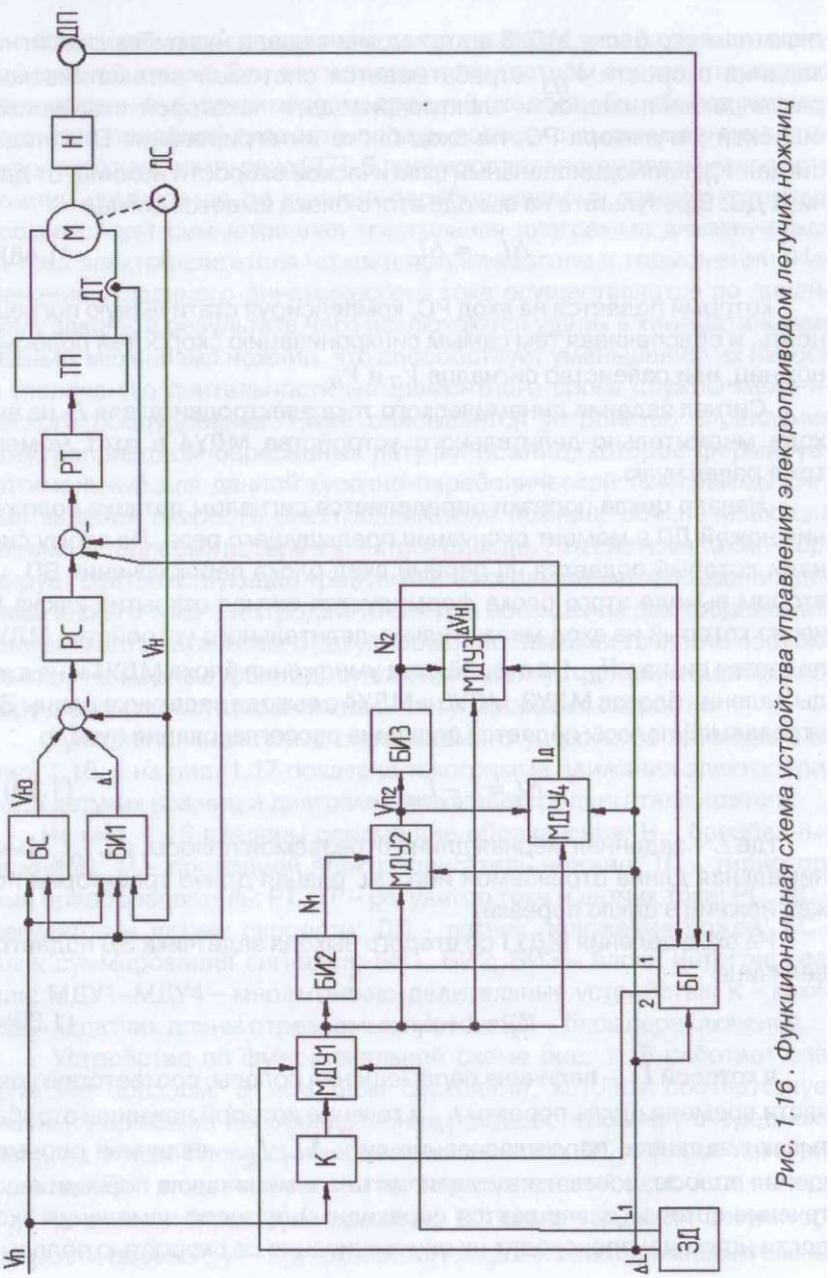


Рис. 1.16. Функциональная схема устройства управления электроприводом летучих ножниц

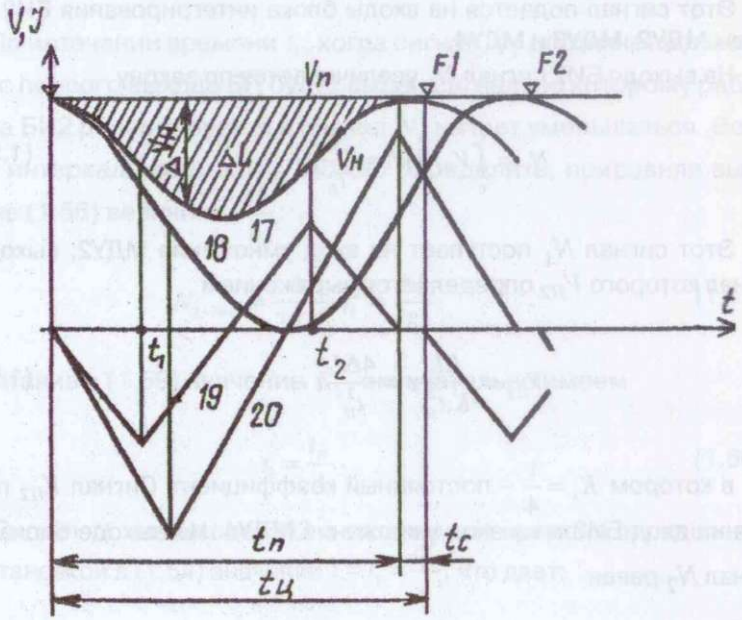


Рис. 1.17. Тахограммы электропривода летучих ножниц и диаграмма тока электродвигателя

При постоянной скорости полосы $V_П$ время отработки заданного рассогласования пути ΔL равно

$$t_П = \frac{L_1}{V_П}. \qquad (1.51)$$

Выходной сигнал МДУ1 определяется выражением

$$V_{П1} = V_П \frac{\Delta L}{L_1}, \qquad (1.52)$$

которое с учетом (1.51) имеет вид

$$V_{П1} = \frac{\Delta L}{t_П}. \qquad (1.53)$$

Этот сигнал подается на входы блока интегрирования БИ2 и на входы МДУ2, МДУ3 и МДУ4.

На выходе БИ2 сигнал N_1 увеличивается по закону

$$N_1 = \int_0^t V_{П1}(t)dt = \frac{\Delta L}{t_П}t \cdot \qquad (1.54)$$

Этот сигнал N_1 поступает на вход умножения МДУ2, выходной сигнал которого $V_{П2}$ определяется выражением

$$V_{П2} = \frac{\Delta L}{K_1 t_П^2}t = \frac{4\Delta L}{t_П^2}t, \qquad (1.55)$$

в котором $K_1 = \frac{1}{4}$ – постоянный коэффициент. Сигнал $V_{П2}$ подается на вход БИ3 и на вход умножения МДУ4. На выходе блока БИ3 сигнал N_2 равен

$$N_2 = \int_0^t \frac{4\Delta t}{t_П^2}tdt = \frac{2\Delta L}{t_П^2}t^2 \cdot \qquad (1.56)$$

Этот сигнал в свою очередь поступает на вход блока умножения МДУ3 и на третий вход блока переключения БП. В результате на выходе МДУ3 формируется сигнал ΔV_H:

$$\Delta V_H = \frac{2\Delta L}{K_2 t_П^3}t^2 = \frac{16\Delta L}{t_П^3}t^2, \qquad (1.57)$$

где $K_2 = \frac{1}{8}$ – постоянный коэффициент. На выходе МДУ4 формируется сигнал задания динамического тока электродвигателя $I_Д$, равный:

$$I_Д = \frac{4\Delta L}{K_2 t_П^3}t = \frac{32\Delta L}{t_П^3}t \cdot \qquad (1.58)$$

По истечении времени t_1, когда сигнал N_2 достигнет величины $\frac{\Delta L}{8}$, с первого выхода БП будет выдан сигнал, по которому работа блока БИ2 реверсируется и сигнал N_1 начнет уменьшаться. Величину интервала времени t_1 можно определить, приравняв выражение (1.56) величине $\frac{\Delta L}{8}$:

$$N_{2-t=t_1} = \frac{\Delta L}{2K_1 t_П^2} t_1^2 = \frac{\Delta L}{8} \qquad (1.59)$$

подставив в (1.59) значение K_1, окончательно имеем

$$t_1 = \frac{t_П}{4}. \qquad (1.60)$$

Сигнал N_1 на выходе БИ2 в этот момент времени определяется подстановкой в (1.54) значения $t = t_1 = \frac{t_П}{4}$, что дает:

$$N_{1-t=t_1} = \frac{\Delta L}{4}. \qquad (1.61)$$

С момента времени t_1 изменения сигналов на выходах блоков описываются выражениями:

$$N_{1-t\rangle t_1} = \frac{\Delta L}{2} - \frac{\Delta L}{t_П} t; \qquad (1.62)$$

$$V_{П2-t\rangle t_1} = \frac{2\Delta L}{t_П} - \frac{4\Delta L}{t_П^2} t; \qquad (1.63)$$

$$N_{2-t\rangle t_1} = -\frac{\Delta L}{4} + \frac{2\Delta L}{t_П} t - \frac{2\Delta L}{t_П^3} t^2; \qquad (1.64)$$

$$\Delta V_{t\rangle t_1} = -\frac{2\Delta L}{t_П} + \frac{16\Delta L}{t_П^2} t - \frac{16\Delta L}{t_П^3} t^2; \qquad (1.65)$$

$$I_{Д-t\rangle t_1} = \frac{16\Delta L}{t_П^2} - \frac{32\Delta L}{t_П^3} t. \qquad (1.66)$$

С момента времени, когда величина N_1 изменяет свой знак, сигнал N_2 уменьшается и в момент времени t_2, когда он снова станет равным $\frac{\Delta L}{8}$, на первом выходе блока БП исчезнет сигнал, реверсирующий работу БИ2. Величина интервала времени t_2 определяется приравниванием (1.64) величине $\frac{\Delta L}{8}$:

$$t_2 = \frac{3}{4} t_П . \tag{1.67}$$

В момент времени t_2 сигнал N_1 определяется подстановкой значения t_2 в (1.62):

$$N_{1-t=t_2} = -\frac{\Delta L}{4} . \tag{1.68}$$

Начиная с момента времени t_2, сигналы на выходах блоков описываются выражениями:

$$N_{1-t\rangle t_2} = -\Delta L + \frac{\Delta L}{t_П} t ; \tag{1.69}$$

$$V_{П2-t\rangle t_2} = -\frac{4\Delta L}{t_П} - \frac{4\Delta L}{t_П^2} t ; \tag{1.70}$$

$$N_{2-t\rangle t_2} = 2\Delta L - \frac{4\Delta L}{t_П} t + \frac{2\Delta L}{t_П^3} t^2 ; \tag{1.71}$$

$$\Delta V_{t\rangle t_2} = \frac{16\Delta L}{t_П} - \frac{32\Delta L}{t_П^2} t + \frac{16\Delta L}{t_П^3} t^2 ; \tag{1.72}$$

$$I_{Д-t\rangle t_2} = \frac{32\Delta L}{t_П^2} + \frac{32\Delta L}{t_П^3} t . \tag{1.73}$$

Сигнал ΔV – задание на изменение скорости ножниц, подается на входы блоков БС и БИ1. На выходе БС формируется сигнал задания скорости ножниц V_H в соответствии с выражением

$$V_H = V_П - \Delta V . \qquad (1.74)$$

На выходе БИ1 формируется сигнал рассогласования Δl по зависимости

$$\Delta l = \Delta l_c + \int_0^t V_П(t)dt - \int_0^t V_H(t)dt - \int_o^t \Delta V_H(t)dt . \qquad (1.75)$$

Под воздействием сигнала задания скорости и пути система регулирования скорости электропривода ножниц отрабатывает заданное рассогласование пути ΔL, изменяя скорость ножниц по описанному кусочно-параболическому закону. Для компенсации динамической ошибки системы регулирования на вход регулятора тока подается сигнал $I_Д$ задания динамического тока электродвигателя, который определяется первой производной сигнала ΔV заданного приращения скорости ножниц. Этот сигнал компенсирует статическую ошибку регулятора скорости и динамическую ошибку регулятора тока.

В момент времени $t=t_П$ ключ К закрывается, сигналы ΔV и $I_Д$ становятся равными нулю. Таким образом, после завершения переходного процесса скорость ножниц синхронизируется со скоростью полосы. Величина Δl на выходе БИ1 к моменту времени $t=t_Ц$, который соответствует началу следующего цикла порезки, определяется по выражению (1.75) и равна с учетом (1.48) и (1.49)

$$\Delta l_{t=t_ц} = \Delta L_C + L - L_{MIN} - \Delta L = \Delta L_C = \Delta L_{t=0} . \qquad (1.76)$$

Из (1.76) видно, что в рассматриваемой схеме отработка заданного рассогласования осуществляется без ошибки, обеспечивая требуемую точность порезки полосы на заданные мерные длины.

Благодаря изменению тока электродвигателя по линейному закону при работе исключаются удары в кинематических звеньях механизма. Кроме того, так как в момент синхронизации скоростей

полосы и ножниц производная от скорости ножниц равна нулю, это существенно уменьшает время завершения переходного процесса и увеличивает время работы ножниц на пониженной скорости, что улучшает энергетические показатели установки.

Универсальный способ циклической синхронизации электроприводов двух движущихся объектов

В самом общем виде управление электроприводом летучих ножниц, производящих порезку на мерные длины движущегося проката, представляет собой частный случай задачи циклической синхронизации скоростей двух движущихся объектов – ведущего, скорость которого независима, и ведомого, на скорость которого производится управляющее воздействие. При этом закон изменения скорости управляемого электропривода ведомого объекта в цикле может быть различным.

Универсальный способ управления скоростью электропривода ведомого объекта (например, барабанных летучих ножниц) предложен в [28]. Согласно этому способу, скорость электропривода ведомого объекта (летучих ножниц) по отношению к скорости ведущего (прокат) изменяется на величину, которая вычисляется по формуле:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \cdot \Delta l \cdot F(l_1). \qquad (1.77)$$

В этой формуле V_1, V_2 – скорости движения ведущего и ведомого объектов, Δl – относительное значение заданного рассогласования по пути между объектами, которое равно

$$\Delta l = \frac{L_1 - L_2}{L_1 - L_C}, \qquad (1.78)$$

где L_1, L_2 – заданные значения перемещения объектов в течение цикла; L_C – заданное значение перемещения объектов с синхронной скоростью; l_1 – относительное значение величины текущего перемещения ведущего объекта от начала цикла. Это значение определяется зависимостью

$$l_1 = \frac{\int_0^t V_1(t)dt}{L_1 - L_C}, \qquad (1.79)$$

где t – текущее значение времени от начала цикла, а $F_1(l_1)$ –функция управления, соответствующая выбранному закону изменения скорости ведомого объекта в цикле. Эта функция соответствует условию $F(l_1)=0$ при $l_1=0$ и $l_1=1$, т.е.

$$\int_0^1 F(l_1)dl_1 = 1. \qquad (1.80)$$

Благодаря такому закону управления скоростью электропривода ведомого объекта, обеспечивается получение заданного рассогласования по пути в каждом цикле перемещения объектов при любом изменении скорости ведущего объекта и принятом законе изменения скорости ведомого объекта в течение цикла.

Для примера можно рассмотреть случай управления по рассматриваемому способу, если функция управления $F_1(l_1)$ соответствует условию (1.80) и имеет вид

$$F_1(l_1) = \frac{\pi}{2}\sin(\pi l_1). \qquad (1.81)$$

Рассогласование по пути между объектами для рассматриваемого случая определяется путем интегрирования выражения (1.77), с учетом (1.78), (1.79) и (1.80):

$$V_1(t)\cdot\Delta l\cdot F(l_1)dt =$$

$$= \int_0^{t_П}\Delta V(t)dt = \int_0^{t_П}\frac{L_1-L_2}{L_1-L_C}\cdot\frac{\pi}{2}\int_0^{t_П}V_1(t)\cdot\sin\left(\frac{\pi\int_0^{t_П}V_1(t)dt}{L_1-L_C}\right), \qquad (1.82)$$

где $t_П$ – время синхронного движения объектов. Введем в (1.82) новую переменную

$$L = \int_0^t V_1(t)dt, \qquad (1.83)$$

дифференциал которой равен

$$dL = V_1(t)dt\ . \qquad (1.84)$$

Изменим верхнюю границу интегрирования, которая с учетом (1.83) равна

$$\int_0^t V_1(t)dt = L_1 - L_C\ , \qquad (1.85)$$

получим

$$\int_0^{t_n} \Delta V(t)dt = \frac{L_1 - L_2}{L_1 - l_C} \cdot \frac{\pi}{2} \int_0^{L_1 - L_C} \sin\left(\frac{\pi L}{L_1 - L_C}\right) dL = L_1 - L_C\ . \qquad (1.86)$$

Функциональная схема системы управления электроприводом ведомого механизма, реализующая рассмотренный способ управления, представлена на рис. 1.18.

На схеме рис. 1. 18 обозначено: М – электродвигатель ведомого механизма; САРС – система автоматического регулирования скорости электропривода ведомого механизма; ДС – датчик скорости ведущего механизма; БУ1, БУ2 – блоки умножения; БД1, БД2 – блоки деления; БИ – блок интегрирования; БЗП – блок задания перемещения; ФП – функциональный преобразователь.

Функциональный преобразователь ФП представляет собой элемент, который вычисляет значение принятой функции управления $F(l_1)$ в соответствии с выражениями, приведенными в таблице 1. Блок задания перемещения БЗП в начале каждого цикла формирует заданное значение рассогласования по пути $L_1 - L_2$ и сигнал $L_1 - L_C$ заданного перемещения ведущего механизма при несинхронном движении механизмов.

Как видно из схемы рис. 1.18, структура управляющего устройства не зависит от принятого закона изменения скорости ведущего механизма в цикле.

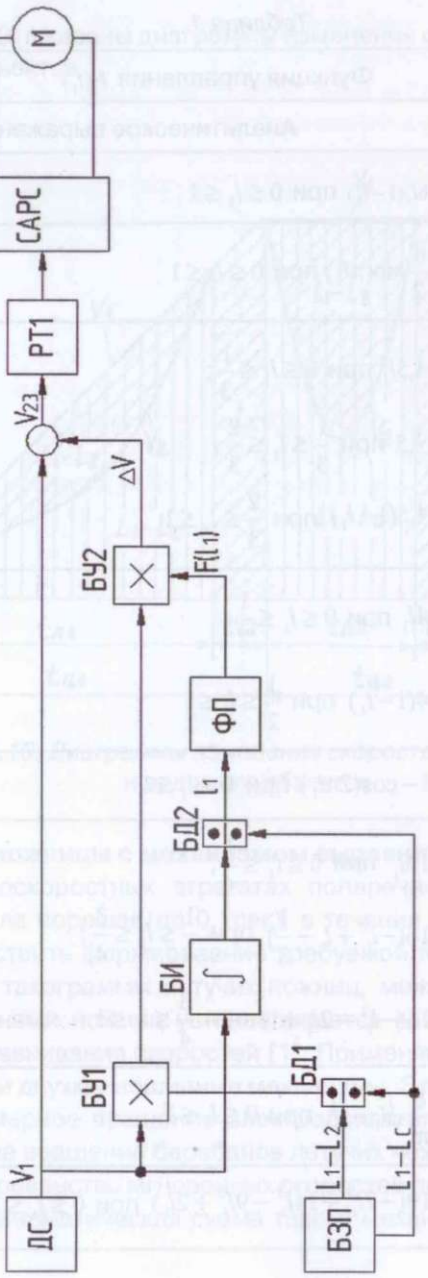


Рис. 1.18. Функциональная схема системы управления электроприводом ведомого механизма

Таблица 1

№ п/п	Функция управления $F(l_1)$	
	Вид	Аналитическое выражение
1	Парабола	$6l_1(1-l_1)$ при $0 \le l_1 \le 1$
2	Синусоида	$\frac{\pi}{2}\sin(\pi l_1)$ при $0 \le l_1 \le 1$
3	Трапеция	$4{,}5l_1$ при $0 \le l_1 \le \frac{1}{3}$; $1{,}5$ при $\frac{1}{3} \le l_1 \le \frac{2}{3}$; $4{,}5(1-l_1)$ при $\frac{2}{3} \le l_1 \le 1$
4	Треугольник	$4l_1$ при $0 \le l_1 \le \frac{1}{2}$; $4(1-l_1)$ при $\frac{1}{2} \le l_1 \le 1$
5	Косинусоида	$1-\cos(2\pi l_1)$ при $0 \le l_1 \le 1$
6	Кусочная парабола	$16l_1^2$ при $0 \le l_1 \le \frac{1}{4}$; $16(-l_1^2+l_1-\frac{1}{8})$ при $\frac{1}{4} \le l_1 \le \frac{3}{4}$; $16(-l_1^2-2l_1+1)$ при $\frac{3}{4} \le l_1 \le 1$
7	Эллипс	$\frac{8}{\pi}\sqrt{l_1-l_1^2}$ при $0 \le l_1 \le 1$
8	Уравнение 4-й степени	$10(-7l_1^4+14l_1^3-9l_1^2+2l_1)$ при $0 \le l_1 \le 1$

На рис 1.19 показаны диаграммы изменения скоростей ведущего и ведомого объектов.

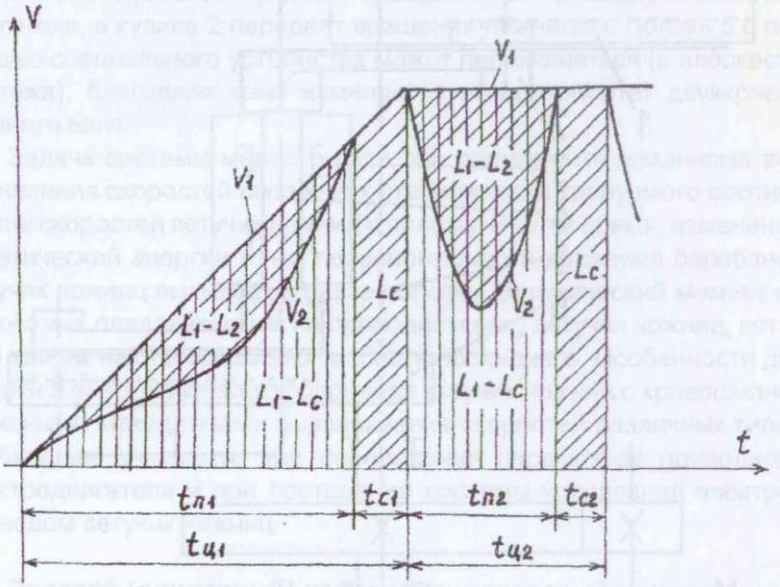


Рис. 1.19. Диаграммы изменения скоростей ведущего и ведомого объектов

Летучие ножницы с механизмом выравнивания скоростей

На высокоскоростных агрегатах поперечной резки с малым временем цикла порезки (до 0,1сек), в течение которого затруднительно осуществить формирование требуемой при заданной малой длине листов тахограммы летучих ножниц, между электродвигателем и барабанами ножниц устанавливается кривошипно-кулисный механизм выравнивания скоростей [1]. Применяются простые однокривошипные и двухкривошипные механизмы. Этот механизм преобразует равномерное вращение электродвигателя в периодическое неравномерное вращение барабанов летучих ножниц, обеспечивая к моменту реза равенство мгновенных скоростей полосы и ножей летучих ножниц. Кинематическая схема такого механизма приведена на рис. 1.20.

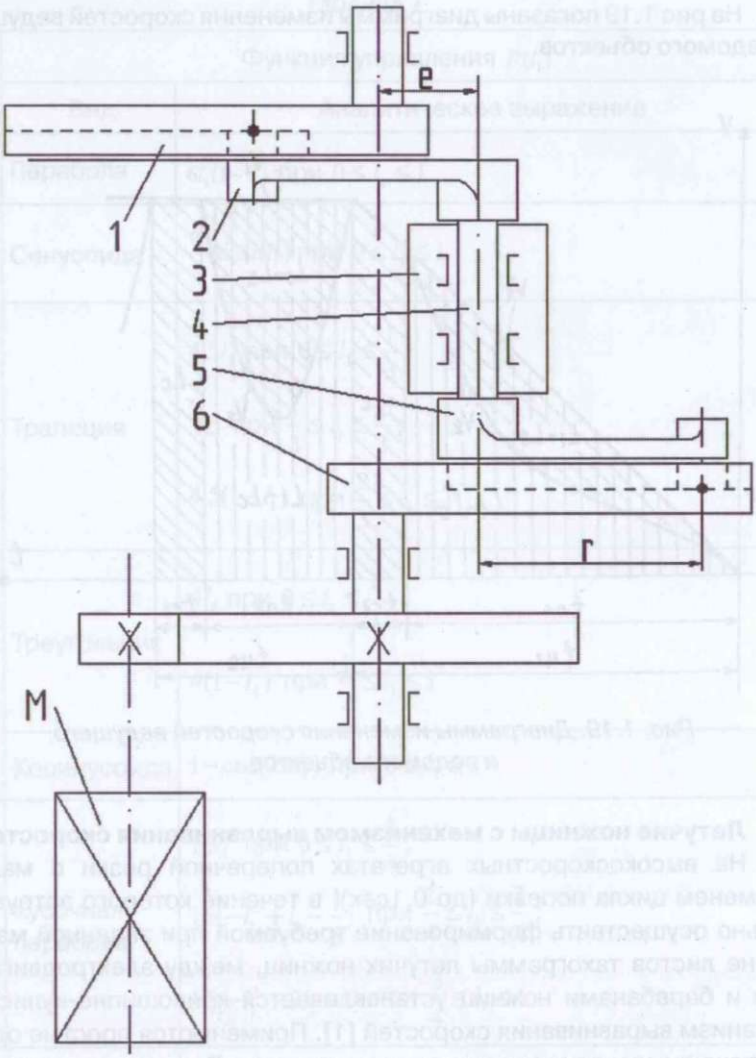


Рис. 1.20. Кинематическая схема двухкривошипного механизма выравнивания скоростей

На схеме рис. 1.20 обозначено: М – приводной электродвигатель; 1, 6 – кулисы; 3 – ползун; 2, 5 – кривошипы; 4 – двухкривошипный вал.

Как видно из рис. 1.20, двухкривошипный вал 4 вращается на закрепленных в ползуне подшипниках. На концы этого вала напрессованы кривошипы 3, пальцы которых скользят в пазах вращающихся кулис 1 и 2. При этом кулиса 1 вращается от приводного электродвигателя, а кулиса 2 передает вращения ножницам. Ползун 5 с помощью специального устройства может перемещаться (в плоскости чертежа), благодаря чему изменяется эксцентриситет двухкривошипного вала.

Задача системы мерного реза при применении механизма выравнивания скоростей сводится к стабилизации требуемого соотношения скоростей летучих ножниц и полосы. В то же время, изменение кинетической энергии из-за неравномерности движения барабанов летучих ножниц вызывает в цикле порезки динамический момент на рабочем и, следовательно, на приводном валу летучих ножниц, который влияет на стабилизацию скорости последнего. Особенности динамики и энергетики электропривода летучих ножниц с кривошипно-кулисными механизмами выравнивания скоростей различных типов необходимо учитывать при определении параметров приводного электродвигателя и при построении системы управления электроприводом летучих ножниц.

Простой (одинарный) кривошипно-кулисный механизм выравнивания скоростей

Для описания движения выходного вала такого механизма при постоянной скорости входного вала справедливы следующие соотношения [29], [30]:

$$\varphi = arctg\left[\frac{\sin\alpha}{(e+\cos\alpha)}\right]; \qquad (1.87)$$

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1+e^2+2e\cos\alpha}{1+\cos\alpha}; \qquad (1.88)$$

$$\xi_2 = \omega_1^2 \frac{e(1-e^2)\sin\alpha}{(1+e^2+2e\cos\alpha)^2}; \qquad (1.89)$$

$$e = \frac{E}{r}. \qquad (1.90)$$

В этих выражениях α, ω_1, φ, ω_2 – углы поворота и скорости, соответственно валов электродвигателя и барабанов ножниц; i – мгновенное значение передаточного числа редуктора, а E, e – абсолютная и относительная величина эксцентриситета кривошипно-кулисного механизма; r – радиус кривошипа; ξ_2 – угловое ускорение вала барабанов.

На рис. 1.21а, сплошными линиями показаны графики зависимостей угла поворота α от угла поворота φ при различных величинах эксцентриситета, рассчитанные по выражению (1.87). На рис. 21б – семейство зависимостей величины, обратной i от угла поворота α при различных величинах эксцентриситета, рассчитанных по выражению (1.88).

При постоянной скорости вала электродвигателя динамический момент, обусловленный неравномерностью частоты вращения вала барабанов летучих ножниц, приведенный к валу электродвигателя равен

$$M_{дин} = \frac{J_2 \xi_2}{i}, \qquad (1.91)$$

где J_2 – момент инерции на валу барабанов.

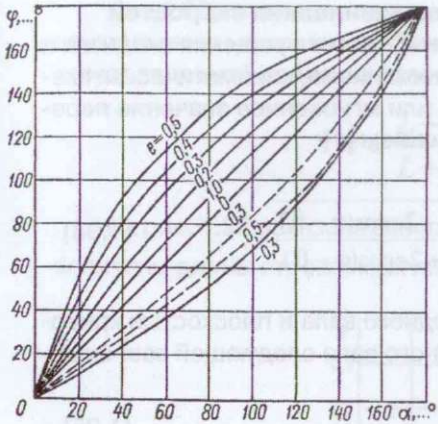
С учетом (1.83) и (1.84) это выражение принимает вид

$$M_{дин} = J_2 \omega_1^2 f(e,\alpha), \qquad (1.92)$$

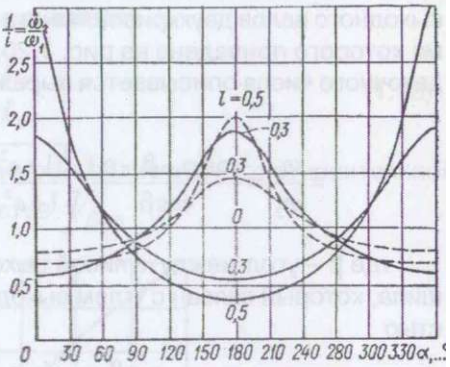
в котором

$$f(e,\alpha) = \frac{e(1-e^2)\sin\alpha(1+e\cos\alpha)}{(1+e^2+2e\cos\alpha)^2}. \qquad (1.93)$$

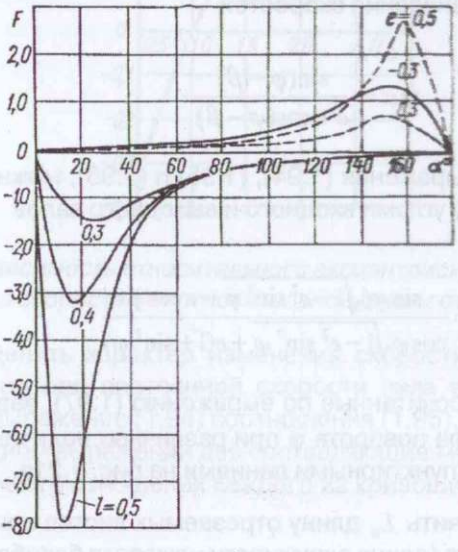
Зависимость относительной величины динамического момента от угла α показана на рис. 1.2в.



а)



б)



в)

Рис. 1.21 а, б, в. Графики зависимостей угла φ, обратной величины передаточного числа редуктора механизма выравнивания скоростей и относительного динамического момента от угла поворота вала электродвигателя

Двухкривошипный механизм выравнивания скоростей

Соотношение мгновенных значений частот вращения входного и выходного валов двухкривошипного механизма, кинематическая схема которого приведена на рис. 1.20, или мгновенное значение передаточного числа описывается выражением [1]:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\cos(\varphi - \beta - \alpha)}{\cos\beta}\sqrt{\frac{(1+e^2-2e\cos(\varphi-\beta)}{1+e^2+2e\cos(\varphi-\beta)}}, \qquad (1.94)$$

где β – угол между кулисой выходного вала и плоскостью кривошипа, который связан с углом выходного вала следующей зависимостью

$$\sin\beta = e\sin\varphi. \qquad (1.95)$$

Справедливо соотношение, связывающее все упомянутые углы механизма выравнивания скоростей

$$tg\alpha = \frac{\sin(\varphi-\beta)}{e+\cos(\varphi-\beta)}. \qquad (1.96)$$

Используя выражения (1.94), (1.95) и (1.96), можно получить зависимость между углами входного и выходного валов

$$tg\alpha = \frac{\sin\varphi(\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi} - e\cos\varphi}{\cos\varphi\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi} + e(1+\sin^2\varphi)}. \qquad (1.97)$$

Графики, рассчитанные по выражению (1.97), зависимости угла поворота α от угла поворота φ при различных величинах эксцентриситета показаны пунктирными линиями на рис. 1.21а.

Если обозначить L_0 длину отрезаемых листов при эксцентриситете, равном нулю (длина окружности ножевого барабана), то зависимость длины отрезаемых листов от эксцентриситета будет иметь вид

$$L = L_0\frac{1+e}{1-e}. \qquad (1.98)$$

Из (1.98) можно получить выражение для относительного эксцентриситета механизма выравнивания скоростей, который соответствует заданной длине отрезаемых листов

$$e = \frac{L - L_0}{L + L_0}. \qquad (1.99)$$

На рис. 1.22 показана зависимость величины e от относительной величины длины отрезаемых листов L/L_0.

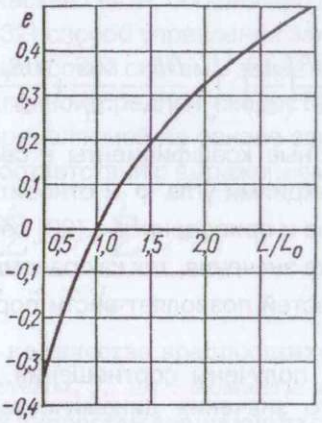


Рис. 1.22. Зависимость относительного эксцентриситета e механизма выравнивания скоростей от относительной длины отрезаемых листов

Чтобы оценить характер изменения скорости вала барабанов летучих ножниц при постоянной скорости вала электродвигателя, подставим в выражение (1.94) соотношения (1.95), (1.96), (1.97), выделив в исходном выражении две составляющие мгновенного значения передаточного отношения каждого из кривошипов. В результате получим

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\sqrt{1 + e^2 + 2\cos(\varphi - \beta)}}{\cos(\varphi - \beta - \alpha)} \cdot \frac{\cos\beta}{\sqrt{1 + e^2 + 2e\cos(\varphi - \beta)}}. \qquad (1.95)$$

Используя выражение (1.86), можно найти величину динамического момента для рассматриваемого случая:

$$M_{дин} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \cdot \frac{1}{i} = \frac{J_2 \omega_1}{i} \cdot \frac{d\left(\frac{1}{i}\right)}{dt}. \qquad (1.101)$$

После преобразований выражение для динамического момента приводится к виду (1.92), в котором вспомогательная функция в общем виде буде описана выражением

$$f_1(e,\varphi) = \frac{A^2}{B^2}\left(\frac{A_1}{C}\right)^{1,5}\left(-\frac{DB_1}{C} - \frac{AG}{A_1} + \frac{HB_1}{B}\right), \qquad (1.102)$$

где использованные коэффициенты в свою очередь являются аналитическими функциями угла φ и относительного эксцентриситета e. Рассчитанное и приведенное в [29] семейство кривых включает и отрицательные значения, так как рассматриваемый механизм выравнивания скоростей позволяет вести порезку листов длиной и менее L_0.

Там же, в [29], получены соотношения для максимального и среднеквадратичного значения динамического момента электропривода с двухкривошипным механизмом выравнивания скоростей. Это позволяет достаточно точно определить нагрузочные диаграммы электропривода и произвести обоснованный выбор мощности приводного электродвигателя.

Проведенный анализ позволил учесть особенности динамических свойств рассматриваемого электропривода при разработке системы управления порезкой листов [31], внедрение которой показало возможности использования подобного электропривода. В частности, эксплуатация такого электропривода летучих ножниц с кривошипно-кулисным механизмом выравнивания скоростей показала, что тяжелый динамический режим работы этого электропривода требует применения специального приводного электродвигателя с повышенной механической устойчивостью к частым динамическим перегрузкам. Так, например, серийный электродвигатель постоянного тока серии 4П такие перегрузки не выдерживает по механической прочности (крепление главных полюсов и т.п.).

О способе управления скоростью электропривода двухмассовой системы

Электропривод барабанных летучих ножниц с механизмом выравнивания скоростей представляет собой частный случай электропривода двухмассовой электромеханической системы циклического действия, в которой скорость движения входящих в нее масс периодически, в течение цикла порезки, существенно отличаются друг от друга. Решение задачи управления подобным электроприводом многомассовой электромеханической системы, содержащей упругие и нелинейные кинематические связи, обосновано в [32].

Предложенный в [32] способ управления заключается в том, что электроприводу многомассовой системы задается скорость, которая сравнивается с вычисленной средней скоростью движения многомассовой системы, определяемой на основе закона сохранения количества движения в соответствии с выражением

$$\omega_C = \frac{\sum_1^n J_i\omega_i + \sum_1^k m_K V_K r_K}{J_{ПР}}. \qquad (1.103)$$

В (1.98) n, k – количество вращающихся и поступательно движущихся масс системы, J_i, ω_i – моменты инерции и мгновенные значения угловых скоростей вращающихся масс, m_K, V_K, r_K – массы, мгновенные значения линейных скоростей и радиусы приведения поступательно движущихся масс, а $J_{ПР}$ – приведенный к валу электродвигателя момент инерции системы, определяемый выражением

$$J_{ПР} = \frac{\sum_1^n J_i\omega_{ci}^2 + \sum_1^i m_K V_{CK}^2}{\omega_{СД}^2}, \qquad (1.104)$$

где ω_{ci} – среднее за цикл значение угловой скорости вращения вращающихся масс;

V_{CK} – среднее за цикл значение линейных скоростей поступательно движущихся масс;

$\omega_{СД}$ – среднее за цикл значение скорости вращения электродвигателя.

При таком способе регулирования скорости приводного электродвигателя изменение скоростей отдельных масс системы и скорости электродвигателя сопровождается обменом энергии между этими массами без потребления или отдачи энергии в сеть. Из сети потребляется лишь энергия, необходимая для создания запаса кинетической энергии системы при разгоне электропривода, а также энергия, необходимая для преодоления момента сопротивления, создаваемого силами трения и рабочим органом. После окончания разгона системы из сети потребляется только энергия для преодоления момента сопротивления.

В качестве примера использования описанного способа на рис. 1.23 показана функциональная схема системы управления электроприводом переменного тока по системе ПЧ-АД с векторным управлением кривошипно-шатунного механизма поршневого компрессора.

На схеме рис. 1.23 обозначено: К – кривошипно-шатунный механизм компрессора; М – асинхронный электродвигатель; ПЧ – преобразователь частоты; СУ – система управления преобразователя частоты; РТ1 – регулятор активной составляющей I_q тока статора электродвигателя; РС – регулятор скорости; ЗС – задатчик скорости; БВСС – блок вычисления средней скорости системы; ДС, ДСМ, ДПМ – датчики скорости электродвигателя и кривошипа, и датчик положения кривошипа.

Схема на рис. 1.23 представляет собой двухконтурную схему подчиненного регулирования, в которой в качестве сигнала обратной связи по скорости использован выходной сигнал блока БВСС вычисления средней скорости системы. Этот блок представляет арифметическое устройство, с помощью которого производится вычисление средней скорости системы в соответствии с выражением

$$\omega_C = \frac{\omega_Д J_Д + \omega_K J_K + mVr}{J_{ПР}}, \qquad (1.100)$$

в котором $\omega_Д$, ω_K – скорости электродвигателя и кривошипа;

$J_Д$, J_K – моменты инерции электродвигателя и кривошипа;

m, V, r – масса, линейная скорость и радиус приведения поршня. Радиус приведения и линейная скорость поршня вычисляются с использованием сигнала датчика положения ДПМ.

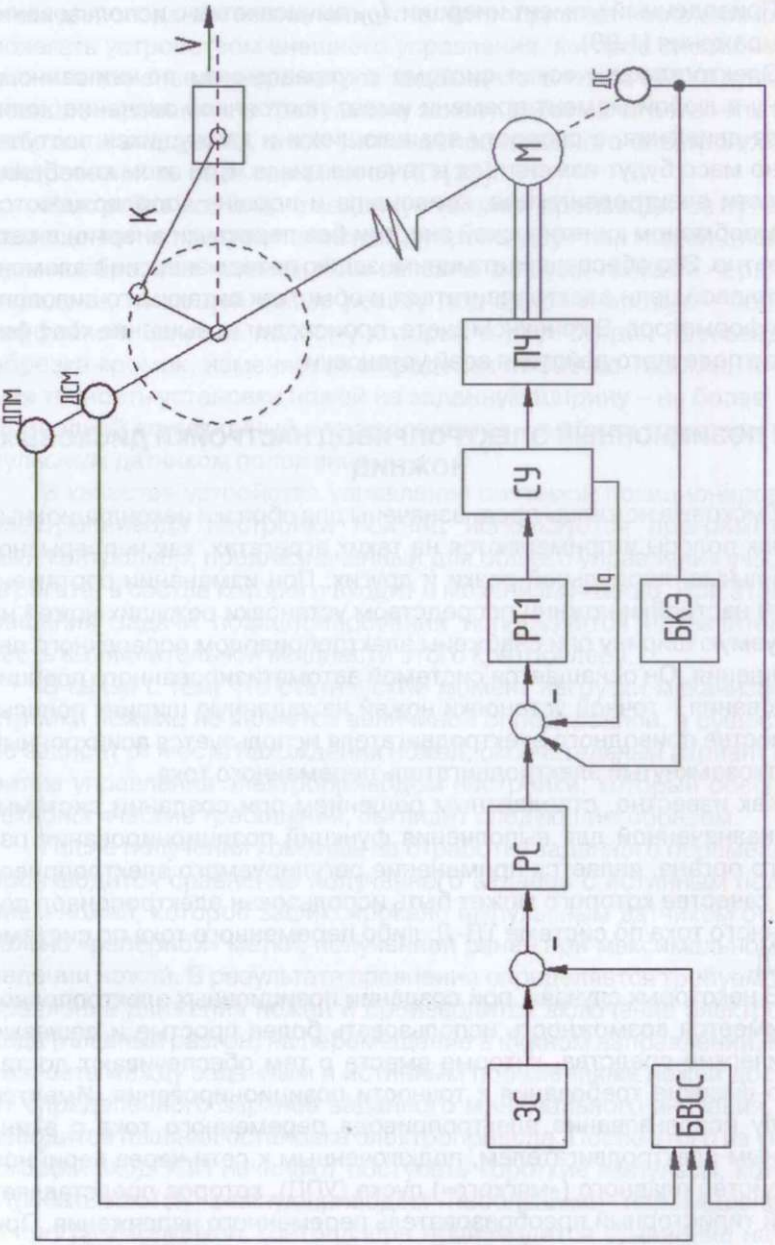


Рис. 1.23. Функциональная схема системы управления электроприводом поршневого компрессора

Приведенный момент инерции $J_{ПР}$ вычисляется с использованием выражения (1.99).

Электромеханическая система с управлением по описанному закону в любой момент времени имеет постоянное значение количества движения, а скорости вращающихся и движущихся поступательно масс будут изменяться в течение цикла. При этом колебания скорости электродвигателя, кривошипа и поршня сопровождаются взаимообменом кинетической энергии без перекачки энергии в сеть и обратно. Это обеспечивает минимизацию потерь энергии в элементах силовой цепи электродвигателя и обмотках питающего силового трансформатора. В конечном счете, происходит повышение коэффициента полезного действия всей установки.

1.7. ПОЗИЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСТРОЙКИ ДИСКОВЫХ НОЖНИЦ

Дисковые ножницы предназначены для обрезки некондиционных кромок полосы и применяются на таких агрегатах, как непрерывно-травильные, продольной резки и других. При изменении сортамента для настройки ножниц посредством установки режущих ножей на требуемую ширину они снабжены электроприводом поперечного перемещения. Он оснащается системой автоматизированного позиционирования – точной установки ножей на заданную ширину полосы. В качестве приводного электродвигателя используется асинхронный короткозамкнутый электродвигатель переменного тока.

Как известно, стандартным решением при создании системы, предназначенной для выполнения функций позиционирования рабочего органа, является применение регулируемого электропривода, в качестве которого может быть использован электропривод постоянного тока по системе ТП-Д, либо переменного тока по системе ПЧ-АД.

В некоторых случаях, при создании позиционных электроприводов имеется возможность использовать более простые и дешевые технические средства, которые вместе с тем обеспечивают достаточно высокие требования к точности позиционирования. Имеется в виду использование электропривода переменного тока с асинхронным электродвигателем, подключенным к сети через серийное устройство плавного («мягкого») пуска (УПП), которое представляет собой тиристорный преобразователь переменного напряжения. При

этом для создания позиционного электропривода необходимо располагать устройством внешнего управления, которое способно обеспечить изменение параметров задающего сигнала УПП в процессе позиционирования по требуемому закону. Ниже излагается опыт разработки и внедрения такой системы позиционного электропривода, построенной на базе серийного УПП [33].

Настройка ножниц на заданную ширину производится путем перемещения в противоположные стороны двух пар ножей дисковых кромкообрезных ножниц. Они связаны с двумя гайками червячной передачи, имеющей левую резьбу под одной и правую – под другой гайкой. Ширина полос, у которых с двух сторон производится обрезка кромок, изменяется в пределах от 900 до 1550мм. Требуемая точность установки ножей на заданную ширину – не более 1 мм. Приводной асинхронный электродвигатель снабжен тормозом и импульсным датчиком положения.

В качестве устройства управления системой позиционирования электропривода настройки ножниц используется программируемый контроллер, предназначенный для общего управления участком агрегата, в состав которого входит и механизм ножниц. При этом для решения задачи позиционирования используется незначительная часть вычислительной мощности этого контроллера.

В связи с тем, что статический момент нагрузки механизма настройки ножниц не является величиной определенной, а существенно зависит от места нахождения ножей, окончательный вариант алгоритма управления электроприводом настройки, который обеспечил технологические требования, выглядит следующим образом.

После получения команды на отработку заданного перемещения производится сравнение полученного задания с истинным положением ножей, которое зафиксировано импульсным датчиком относительно «реперной» метки, полученной ранее при максимальном разведении ножей. В результате сравнения определяется требуемое направление движения ножей и производится включение электропривода (плавный разгон) на перемещение в нужном направлении. Когда разность между заданным и истинным положениями ножей достигает определенного заранее заданного минимального значения, производится плавная остановка электропривода. После этого на управляющий вход УПП начинают поступать короткие импульсы, которые отрабатываются электроприводом небольшими перемещениями. В программируемом контроллере производится сравнение началь-

ного положения ножей и положения к концу отработки очередного импульса. Если за время импульса положение ножей не изменилось, производится увеличение длительности импульса для преодоления увеличившегося статического момента. Этот процесс адаптивного управления продолжается до тех пор, пока ножи не займут заданное положение. Описанная система позиционирования апробирована при вводе в действие дисковых ножниц двух непрерывно-травильных агрегатов в цехе холодной прокатки металлургического комбината. Система может быть рекомендована для использования в аналогичных случаях.

1.8. УПРАВЛЕНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АГРЕГАТА ОБРАБОТКИ ПОЛОСЫ

Опыт проектирования, наладки и эксплуатации многодвигательных электроприводов агрегатов непрерывной обработки полосы различных типов и назначения позволяет сформулировать основные принципы построения общей системы управления подобными комплексами электроприводов. Следует отметить, что эти принципы успешно использованы и при разработке систем верхнего уровня управления одноклетевых и двухклетевых дрессировочных станов, реверсивных и непрерывных станов холодной прокатки, головных частей и районов клетей и моталок станов «бесконечной» холодной прокатки.

Результаты исследования и разработки систем автоматизированного управления электроприводов отдельных типов механизмов, входящих в состав агрегатов обработки полосы, освоение совершенных методов анализа динамических свойств автоматизированных электроприводов, мощные средства математического моделирования, наличие быстродействующих микропроцессорных программируемых средств управления и автоматизации позволяет и требует при исследовании и разработке системы управления агрегатом непрерывной обработки полосы рассматривать такой агрегат при его автоматизации как единую систему многодвигательного взаимосвязанного электропривода. В это понятие включается не только управление координатами отдельных регулируемых электроприводов, но и разработка системы верхнего уровня управления электроприводами всех механизмов агрегата, включая электроприводы вспомогательных и обслуживающих механизмов.

Вышесказанное можно проиллюстрировать примером разработки системы управления электроприводами механизмов непрерывно-травильного агрегата (НТА), который предназначен для выполнения технологического процесса травления горячекатаной стальной полосы в растворе соляной кислоты, с последующей промывкой и сушкой [34]. Для обеспечения непрерывности технологического процесса при порулонной работе НТА имеет три основные части – головную, среднюю и хвостовую, связанные между собой двумя горизонтальными петлевыми накопительными устройствами. Транспортировку полосы в НТА осуществляют механизмы, оснащенные тиристорными электроприводами постоянного тока, общее количество их составляет 25. Для привода вспомогательных механизмов и механизмов обслуживающих систем используются более 50 асинхронных электродвигателей и около 150 электромагнитов гидро- и пневмоприводов.

Система управления НТА построена, как двухуровневая, в которой первый уровень представляют собой системы автоматизированного управления электроприводами отдельных механизмов, а второй уровень составляет общая система управления всеми тремя частями агрегата с визуализацией управления.

Первый уровень решает следующие основные задачи:

– управление электроприводами регулируемых транспортных механизмов, включая управление электроприводами петлевых накопителей;

– управление электроприводами вспомогательных механизмов, управление электроприводами обслуживающих систем, управление электроприводами стыкосварочной машины, управление механизмами средней технологической части.

Второй уровень общей системы управления производит сбор информации от электроприводов и датчиков, установленных на агрегате, принимает команды операторов агрегата и на основании этого выполняет следующие основные функции:

– формирование и выдачу задания на отработку основных регулируемых координат (скорость, момент) всем регулируемым электроприводам по командам операторов и автоматически в функции запаса полосы в петлевых накопителях;

– управление всеми скоростными режимами агрегата и переходами из одного режима в другой с сохранением требуемого натяжения полосы на всех участках натяжения;

– подготовка электроприводов к работе, ввод их в работу и перевод агрегата в рабочее состояние с плавным нарастанием натяжения на участках;

– контроль состояния обслуживающих систем в рабочем режиме агрегата;

– выполнение вычислительных операций для определения запасов полосы в петлевых накопителях, радиуса рулона на барабанах разматывателя и моталки;

– определение момента начала снижения скорости головной части при смотке рулона с разматывателя;

– снижение величины натяжения (якорного тока) и снижение тока возбуждения электродвигателей при остановках агрегата или какой-либо из его частей;

– диагностика состояния силовой коммутирующей аппаратуры, визуализация процесса управления агрегатом на операторских панелях постов управления и в электромашинном помещении агрегата для дежурного электротехнического персонала.

Каждая часть агрегата может нормально функционировать только, если все ее электроприводы одновременно находятся в рабочем состоянии. Поэтому приведение электроприводов в рабочее состояние (включение линейных контакторов, перевод источников питания электродвигателей в состояние рабочей готовности и т.п.) производится одновременно, одной командой управления (кнопка управления «Сборка схемы»). Общий сигнал готовности к работе формируется только при наличии готовности всех электроприводов той или иной части НТА. При этом петлевые накопители и их электроприводы рассматриваются как механизмы, входящие одновременно в обе части агрегата обработки, между которыми они расположены. Схема управления электроприводом петлевого накопителя приводится в рабочее состояние при подготовке к работе электроприводов любой из соседних частей агрегата, а аварийное отключение электропривода петлевого накопителя приводит к остановке обоих соседних с ним частей агрегата.

Также одновременно одной командой производится перевод всех тянущих механизмов в режим работы с натяжением полосы, после того, как закончена заправка полосы на всех участках. После этого данная часть агрегата переходит в режим стоянки с натяжением, которая предшествует началу процесса обработки движущейся полосы.

Составной частью общей системы управления являются подсистемы управления скоростными режимами. Эти подсистемы обеспечивают следующие основные скоростные режимы работы каждой части агрегата, которые определяются соответствующими командами аппаратов управления (кнопки):

– скорость рабочая (СР);
– скорость заправочная (СЗ);
– так держать (ТД);
– нормальная остановка (НО);
– форсированная остановка (ФО);
– аварийная остановка (АО).

По команде СР производится разгон с постоянным ускорением ведущего механизма части, а с ним и всех механизмов этой части агрегата, до заранее выбранной рабочей скорости. Команда ТД позволяет прекратить режим разгона электропривода ведущего механизма на любой достигнутой промежуточной скорости, меньшей выбранной.

По команде СЗ электропривод ведущего механизма переходит на заправочную скорость либо с постоянным ускорением, если скорость до этого была меньше заправочной скорости, либо с постоянным замедлением, если до этого эта часть агрегата работала на скорости большей заправочной. Величина заправочной скорости неизменна, и выбирается при наладке электропривода ведущего механизма.

Команда НО переводит ведущий механизм в режим снижения скорости с постоянным ускорением, которое определяется требуемым временем остановки с максимальной рабочей скорости. В этом режиме команда ТД позволяет прекратить режим снижения скорости электропривода ведущего механизма на любой достигнутой промежуточной скорости.

Команда ФО переводит ведущий механизм агрегата в режим снижения скорости с постоянным ускорением, большим по величине, чем при выполнении режима НО. В этом режиме так же, как и в режиме НО, регуляторы натяжения тянущих механизмов не отключаются, скорость снижается с поддержанием натяжения на всех участках.

Подача команды АО является следствием аварийной ситуации. По этой команде производится аварийное отключение всех электроприводов аварийной части агрегата, которые при этом переходят в режим автономного торможения. Аварийная часть агрегата останавливается без поддержания натяжения полосы.

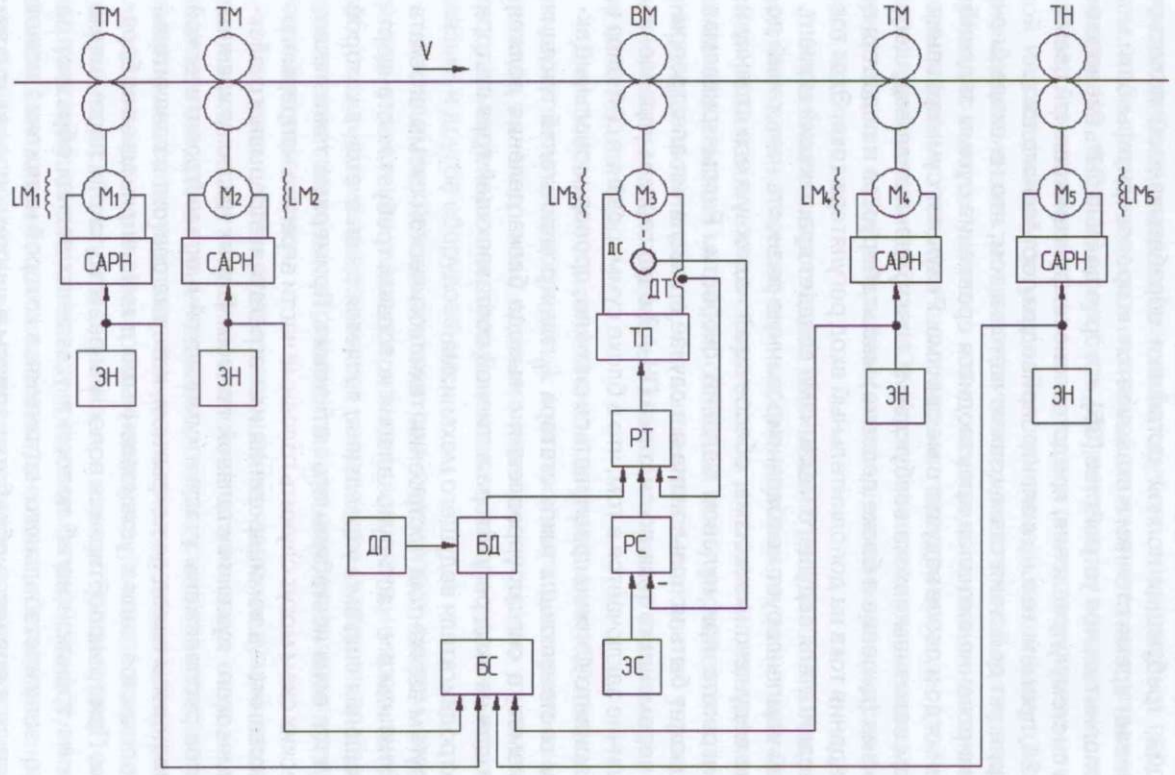


Рис. 1.24. Функциональная схема устройства управления многодвигательным электроприводом агрегата обработки полосы

На рис. 1.24 введены обозначения: ТМ – тянущий механизм; ВМ – ведущий механизм; M_1–M_5 – приводные электродвигатели; LM_1–LM_5 – обмотки возбуждения электродвигателей; САРН – система автоматического регулирования натяжения тянущего механизма; ЗН – задатчик натяжения тянущего механизма; ДТ, ДС – датчики тока и скорости ведущего механизма; ТП – тиристорный преобразователь; РТ, РС – регуляторы тока и скорости ведущего механизма; ЗС – задатчик скорости; БС – блок суммирования сигналов; БД – блок деления; ДП – датчик потока возбуждения электродвигателя ведущего механизма.

Дополнительное устройство [36], которое в этом случае должно быть введено в систему верхнего уровня управления участком, представлено на функциональной схеме рис. 1.25, применительно к электроприводам постоянного тока.

При заданном направлении движения полосы в агрегате зона нестабильного натяжения образуется перед ведущим механизмом. Для стабилизации натяжения на этом участке агрегата обработки в масштабирующем усилителе МУ рассматриваемого устройства производится непрерывная коррекция величины задания натяжения электропривода тянущего механизма, который расположен перед ведущим и перед участком, создающим зону нестабильного натяжения. Для этого на вход МУ поданы сигналы задания натяжения всех тянущих механизмов и сигнал величины загрузки (статического тока) электродвигателя ведущего механизма, который вычисляется по сигналам тока и скорости этого электродвигателя. Непрерывная коррекция величины натяжения электропривода выбранного тянущего механизма обеспечивает регулирование загрузки электродвигателя ведущего механизма путем воздействия на величину натяжения в нестабильной зоне. Это повышает надежность работы всего агрегата. Как и в предыдущем случае, предложенное устройство представляет собой разработанный алгоритм управления, который может быть использован и в случае применения электроприводов механизмов агрегата с асинхронными электродвигателями по системе ПЧ-АД.

При определении механизма, электропривод которого будет выполнять функции ведущего, желательно, чтобы кинематическая схема этого механизма обеспечивала надежное сцепление с полосой, без проскальзывания. В противном случае будет иметь место расхождение между линейной скоростью полосы и скоростью ведущего механизма, что приведет к сбоям в работе натяжных механизмов и агрегата в целом.

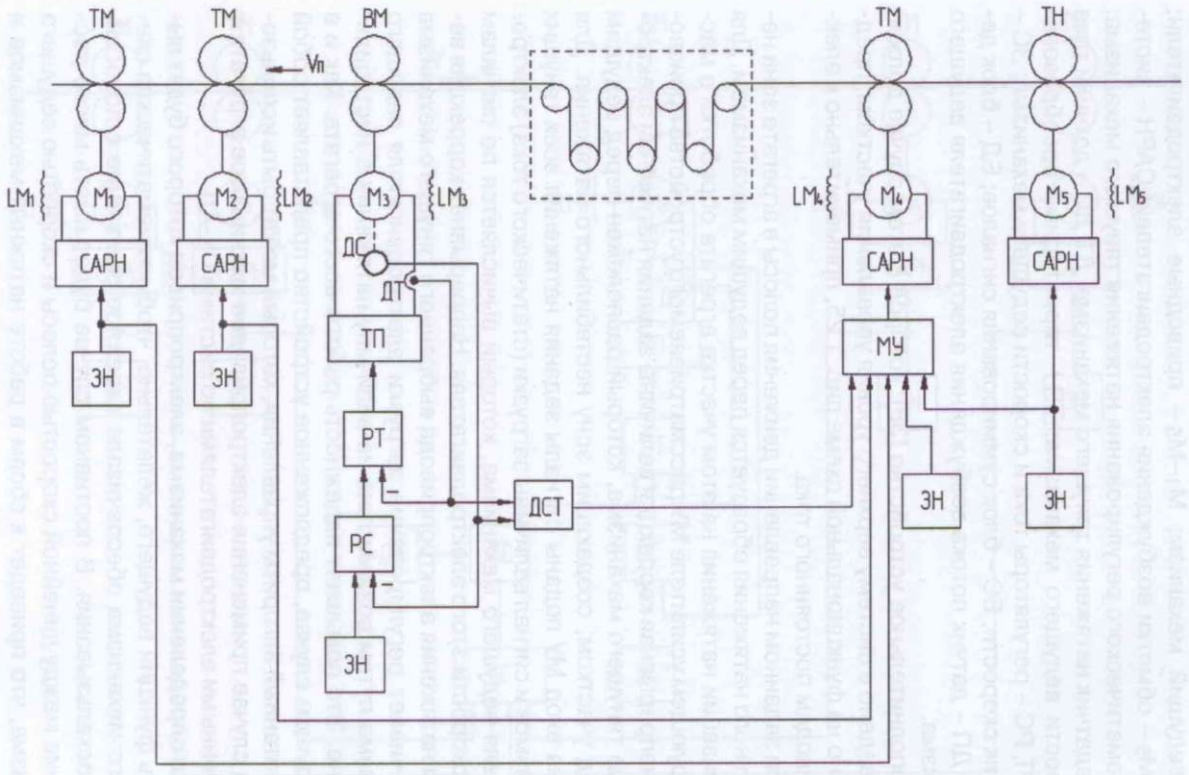


Рис. 1.25. Функциональная схема устройства управления взаимосвязанным электроприводом агрегата обработки полосы

На рис. 1.25 помимо указанных ранее обозначений введены: ДСТ – блок вычисления статического тока; МУ – масштабирующий усилитель.

На некоторых агрегатах непрерывной обработки полосы механизм, скорость электропривода которого жестко связана с линейной скоростью полосы, вообще отсутствует в технологической схеме. К таким агрегатам относятся агрегаты подготовки полосы, агрегаты перемотки полосы, некоторые агрегаты продольной резки. Особенностью перечисленных агрегатов является то, что только два механизма этих агрегатов имеют жесткую связь с обрабатываемой полосой – моталка и разматыватель. Но эти механизмы при неизменной скорости полосы в агрегате изменяют скорость вращения приводного электродвигателя с изменением радиуса рулона.

Традиционным решением при построении системы управления многодвигательным электроприводом таких агрегатов было такое: электропривод одного из указанных механизмов выполнялся тянущим, с системой регулирования натяжения косвенного действия, по мощности электропривода, а второй электропривод становился ведущим. Его система регулирования выполнялась с регулятором линейной скорости полосы. При этом в качестве датчика линейной скорости использовался измеритель скорости, установленный на валу специального холостого ролика, который приводился во вращение обрабатываемой полосой. Практика эксплуатации таких систем управления показала их невысокую надежность, которая связана с наличием возникающей в процессе обработки полосы потерей сцепления ее с измерительным роликом, как в статических, так и, особенно часто, в динамических режимах работы агрегата. Определенные трудности вызывала организация режима стоянки агрегата с натяжением, из-за того, что система управления ведущего механизма не могла обеспечить достаточный статический момент при стоянке, что приводило в режиме стоянки с натяжением полосы к «ползучке» – медленному движению полосы в агрегате в направлении тянущего механизма – разматывателю.

Функциональная схема системы управления агрегатом подобного типа, которая предназначена для повышения надежности работы и одновременно для ликвидации описанного выше явления «ползучки» [37], [38], представлена на рис. 1.26.

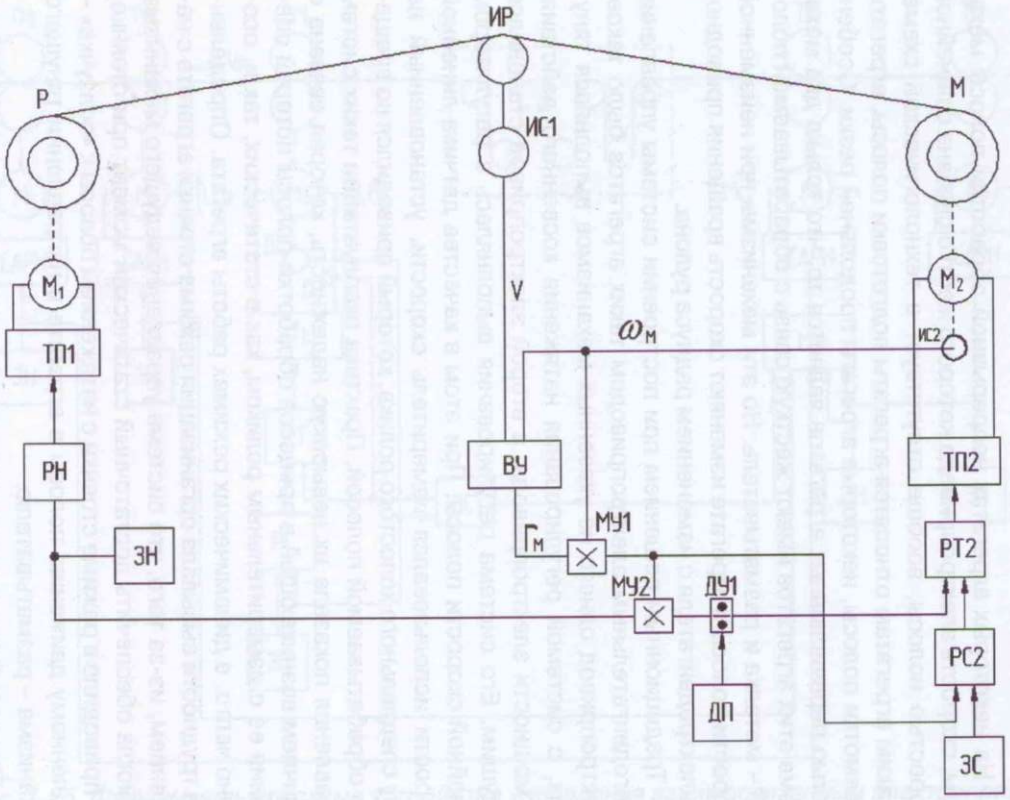


Рис. 1.26. Функциональная схема системы управления агрегатом подготовки полосы

Как видно из рис. 1.26, электродвигатели разматывателя $М_1$ и моталки $М_2$ подключены к индивидуальным тиристорным преобразователям ТП1 и ТП2. Электроприводом разматывателя управляет регулятор натяжения РН косвенного действия, который получает задание натяжения полосы на разматывателе от задатчика натяжения ЗН.

Система автоматического регулирования электропривода моталки – двухконтурная система регулирования скорости электродвигателя с регулятором РС, который получает задание от задатчика скорости ЗС, а в качестве сигнала обратной связи используется выходной сигнал множительного устройства МУ1. В этом множительном устройстве производится перемножение выходного сигнала вычислительного устройства ВУ на угловую скорость электродвигателя моталки. В вычислительном устройстве ВУ производится деление величины линейной скорости полосы от датчика ИС2 на величину угловой скорости электродвигателя моталки, что образует сигнал, пропорциональный величине радиуса рулона на барабане моталки. Произведение этого сигнала на величину угловой скорости электродвигателя моталки дает на выходе МУ1 величину, пропорциональную линейной скорости полосы на барабане моталки, которую и поддерживает регулятор РС.

Тем самым обеспечивается существенное понижение чувствительности системы регулирования скорости электропривода моталки к потере сцепления – проскальзывания измерительного ролика ИР относительно полосы.

Для обеспечения надежной стоянки агрегата с натянутой полосой выходной сигнал задатчика натяжения электропривода разматывателя подается на вход второго множителя МУ2, где перемножается на величину радиуса рулона на барабане моталки. Таким образом, на выходе множителя МУ2 образуется сигнал, пропорциональный величине момента, приложенного через полосу к электроприводу моталки. Эта величина поступает на вход делительного устройства ДУ1, где после деления на величину потока возбуждения электродвигателя $М_2$ моталки, на выходе блока деления формируется дополнительный сигнал задания тока регулятору тока электродвигателя моталки. Этот сигнал формирует момент электродвигателя моталки, который уравновесит момент, создаваемый натяжением полосы от электропривода разматывателя, что и обеспечит, в конечном счете, надежную стоянку агрегата с натянутой полосой.

Глава 2

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МЕХАНИЗМОВ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Станы холодной прокатки предназначены для получения холоднокатаного листа с заданными геометрическими параметрами. В высокопроизводительных цехах по производству холоднокатаного стального листа устанавливаются станы холодной прокатки таких типов:

– одноклетевые реверсивные станы;
– многоклетевые непрерывные станы;
– многоклетевые непрерывные станы «бесконечной» прокатки;
– одноклетевые и двухклетевые дрессировочные станы.

В данной главе представлены результаты исследований и разработки электроприводов станов холодной прокатки, которые до настоящего времени не нашли широкого освещения в литературе.

2.1. ДВУХМАССОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ВАЛКОВ

В работах [39] и [40] с помощью цифрового моделирования выполнен анализ динамических режимов системы автоматического регулирования скорости электропривода валков клети стана холодной прокатки. Рассмотрен индивидуальный электропривод постоянного тока по системе Г-Д с тиристорным возбуждением, с двухзонным регулированием скорости в предположении, что электромеханическая система является одномассовой, т.е. имеется абсолютно жесткая кинематическая связь электродвигателя и валка. Такое допущение правомерно не всегда. Опыт показал, что в ряде случаев анализ динамики электропривода валков прокатного стана, в том числе и стана холодной прокатки, должен проводиться с учетом конечной жесткости механической передачи, иначе полученные результаты не будут обладать требуемой точностью [41].

Показательным опытом, в этом смысле, явились проектирование, наладка и ввод в действие главных приводов клетей высокоскоростного двухклетевого дрессировочного стана холодной прокатки 1400. Традиционная двухзонная система автоматического регулирования скорости, параметры которой были определены без учета упругости

передачи, в данном случае оказалась полностью неработоспособной. Это не позволило ввести электроприводы клетей в нормальную эксплуатацию. Для поиска схемных решений, которые позволили ввести электроприводы клетей и стан в работу, потребовалось выполнить неординарное исследование динамических режимов этих электроприводов с учетом упругости, методика и результаты которого излагаются ниже.

Особенностью рассматриваемых электроприводов клетей двухклетевого дрессировочного стана 1400 является то, что в качестве приводных валков использованы не рабочие, а опорные валки клетей. Электропривод валков – индивидуальный от электродвигателей постоянного тока с питанием по системе ТП-Д.

Основные параметры стана:

– диаметр рабочих валков первой клети – 400 мм;
второй клети – 600 мм;
– диаметр опорных валков – 1400 мм;
– длина бочки валка – 1400 мм;
– скорость дрессировки – до 40 м/с;
– привод опорных валков – безредукторный;
– приводной электродвигатель каждого опорного валка обоих клетей – МП1000-315, 1200 кВт, 600 В, 450/800 об/мин, момент инерции 575 кгм^2.

Кинематическая схема электропривода клети приведена на рис. 2.1.

Как видно из кинематической схемы, электроприводы верхнего и нижнего валков отличаются только длиной валопровода, а параметры первой и второй клетей имеют различные диаметры рабочих валков.

В рабочем режиме дрессировки полосы электроприводы клетей, натяжных устройств перед и за клетями, разматывателя и моталки полосы связаны между собой механически упругонапряженной полосой и представляют единую взаимосвязанную электромеханическую систему. Одновременно имеется электрическая связь между электроприводами верхнего и нижнего валков через систему выравнивания токов нагрузки. При выполнении вспомогательных операций по заправке и извлечении полосы из стана электроприводы механизмов стана работают, как индивидуальные, без связи между собой.

С использованием рекомендаций [41] можно представить структурную схему одного электропривода опорного валка, с учетом конечной жесткости соединения электродвигателя и валка, как двухмассовую электромеханическую систему, как показано на рис. 2.2.

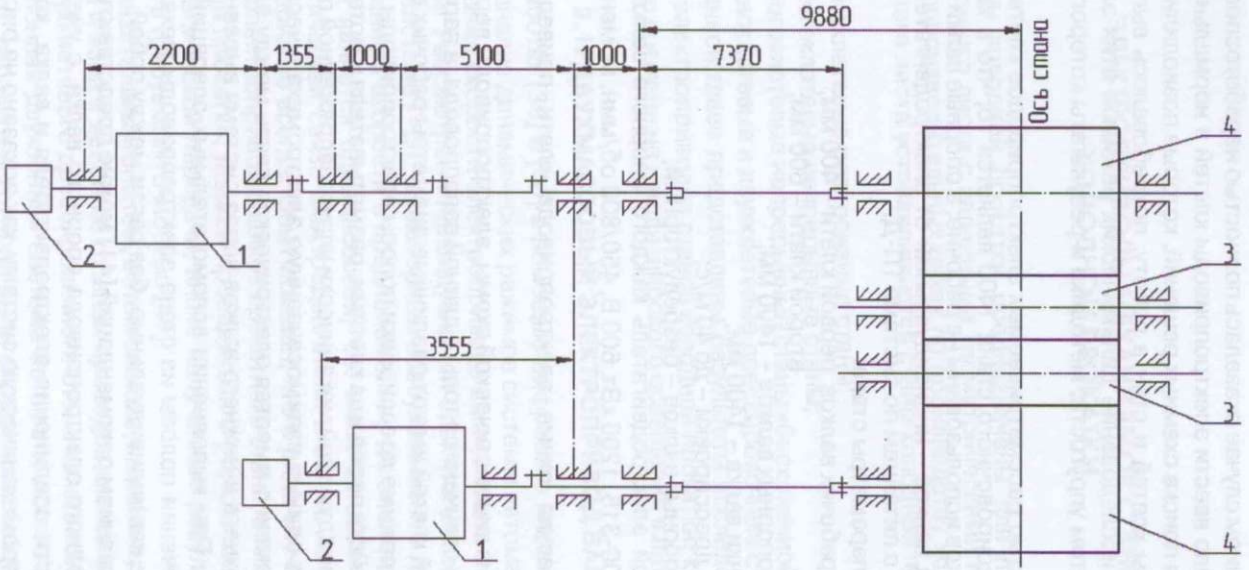


Рис. 2.1. Кинематическая схема электропривода клети двухклетевого дрессировочного стана 1400
1 – приводные электродвигатели; 2 – тахогенераторы; 3, 4 – рабочие и опорные валки клети

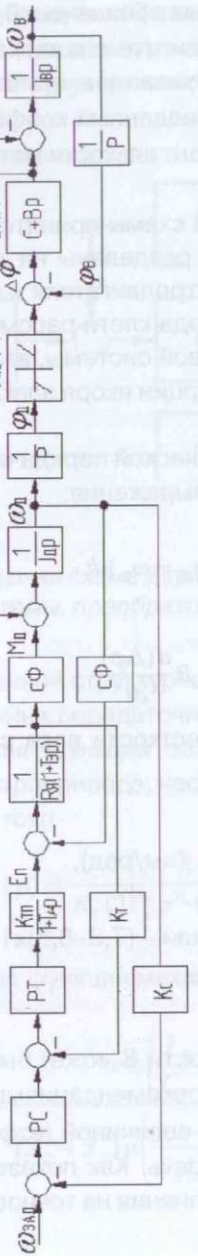


Рис. 2.2. Структурная схема двухмассового электропривода опорного валка

На схеме, кроме традиционных обозначений, использовано: $\varphi_Д$, φ_B – углы поворота вала электродвигателя и валка; $M_У$, M_B – момент упругих сил; обусловленных скручиванием приводного вала, и момент сил вязкого трения; C – приведенный коэффициент жесткости вала; B – приведенный коэффициент вязкости материала валопровода; J_B – момент инерции валка.

При составлении структурной схемы принято, что маховые массы элементов передачи привода разделены на две части, которые отнесены к маховым массам электродвигателя и валковой системы. В реальной системе электропривода клети рассматриваемого стана величина момента инерции валковой системы, второй массы, оказалась в 15 раз больше момента инерции якоря электродвигателя, первой массы.

Для описания свойств механической передачи двухмассовой системы использованы следующие выражения:

$$\Delta\varphi = \varphi_Д - \varphi_B = \int (\omega_Д - \omega_B)dt\,, \tag{2.1}$$

$$M_У + M_B = C_B\Delta\varphi + B\frac{d(\Delta\varphi)}{dt}. \tag{2.2}$$

Для оценки коэффициента жесткости вала сплошного сечения использована формула [42], [43]:

$$C_B = \frac{GJ_p}{l} \approx 8\cdot 10^4 \frac{d^4}{l}\ \text{(нм/рад)}, \tag{2.3}$$

где G – модуль сдвига, для стали – (7,8–8,5)х10^5 кг/см^2;

J_p – полярный момент инерции;

d, l – диаметр и длина вала.

Величина коэффициента вязкости B может быть определена для прокатного вала в соответствии с рекомендациями, приведенными в [41], как $(2–12)\cdot 10^{-4} C_B$. Реальной величиной люфта в передаче при анализе динамики можно пренебречь. Как показали исследования, это не оказывает существенного влияния на точность полученных результатов.

Для анализа динамических свойств двухмассовой системы относительно выходной координаты – скорости первой массы (электродвигателя) исходная структурная схема преобразуется к виду, показанному на рис. 2.3.

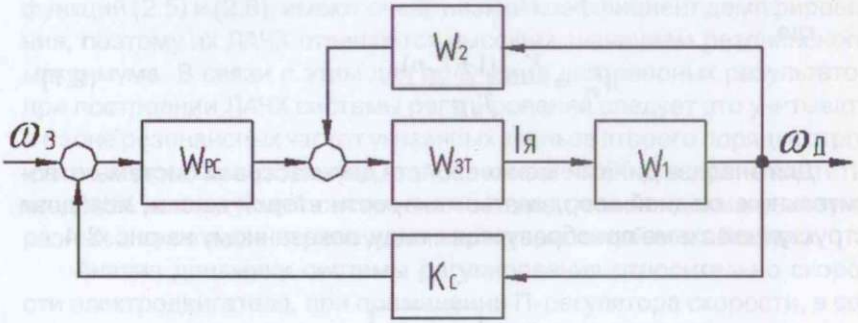


Рис. 2.3. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы, преобразованная для анализа

В преобразованной структурной схеме введены следующие обозначения приведенных передаточных функций:

– Передаточная функция замкнутого контура регулирования якорного тока электропривода, настроенного на модульный оптимум, с ПИ-регулятором тока

$$W_{ЗКТ}(p)=\frac{1}{K_T(2T_\mu^2 p^2+2T_\mu p+1)}. \qquad (2.4)$$

– Передаточная функция механической части электропривода

$$W_1(p)=\frac{\omega_Д(p)}{I(p)}=\frac{c\Phi\left(\frac{J_B}{C_B}p^2+\frac{B}{C_B}p+1\right)}{(J_Д+J_B)p\left(\frac{J_Д J_B}{C_B(J_Д+J_B)}p^2+\frac{B}{C_B}p+1\right)}. \qquad (2.5)$$

– Передаточная функция звена, описывающего действие внутренней обратной связи по ЭДС электродвигателя

$$W_2(p) = \frac{c\Phi(1+T_\mu p)}{K_{TП} W_{PT}}, \qquad (2.6)$$

где

$$W_{PT} = \frac{K_{PT}(1+T_Э p)}{T_Э p}. \qquad (2.7)$$

Для анализа динамических свойств двухмассовой системы относительно выходной координаты – скорости второй массы, исходная структурная схема преобразуется к виду, показанному на рис. 2.4.

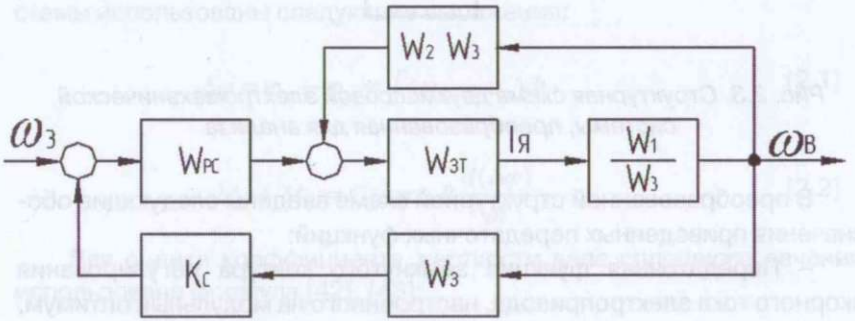


Рис. 2.4. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы, преобразованная для анализа

В структурной схеме рис. 2.4, кроме ранее введенных обозначений добавлено обозначение вспомогательной передаточной функции

$$W_3(p) = \frac{\frac{J_B}{C_B} p^2 + \frac{B}{C_B} p + 1}{1 + \frac{B}{C_B} p}. \qquad (2.8)$$

Приведенные на рис. 2.3 и рис. 2.4 структурные схемы позволяют выполнить анализ динамических свойств системы управления двухмассового электропривода клети. Однако, при использовании для анализа метода аппроксимированных ЛАЧХ следует иметь в виду, что звенья второго порядка, входящие в состав выражений передаточных функций (2.5) и (2.8), имеют очень низкий коэффициент демпфирования, поэтому их ЛАЧХ отличаются высоким значением резонансного максимума. В связи с этим для получения достоверных результатов при построении ЛАЧХ системы регулирования следует это учитывать и в зоне резонансных частот указанных звеньев второго порядка строить не аппроксимированные, а уточненные ЛАЧХ. Следует отметить, что ЛАЧХ исследуемой системы имеет два резонансных максимума разных знаков и два пересечения характеристикой оси абсцисс.

Анализ динамики системы регулирования относительно скорости электродвигателя, при применении П-регулятора скорости, в соответствии со структурной схемой рис. 2.3 подтвердил результаты, полученные при наладке электропривода. Система регулирования ведет себя устойчиво только при невысоких значениях коэффициента усиления регулятора, при которых электропривод валков клети не обеспечивает требуемой статической точности поддержания скорости валков, необходимой для нормальной работы дрессировочного стана. Попытки увеличить коэффициент усиления П-регулятора скорости приводят к существенному ухудшению качества регулирования скорости вращения электродвигателя, вплоть до появления устойчивых автоколебаний, которые сопровождаются соответствующими автоколебаниями якорного тока. Эти колебания вызваны влиянием недостаточной жесткости валопровода электродвигатель – валок, которое приводит к появлению указанных упругих колебаний электродвигателя относительно валка.

Качество регулирования контура скорости показано на осциллограмме рис. 2.5.

Исследования, проведенные методом ЛАЧХ и подтвержденные путем использования цифрового моделирования, для электропривода клети двухклетевого дрессировочного стана позволили найти нестандартное решение, которое обеспечило демпфирование упругих колебаний и устойчивую работу электроприводов клетей. Это обеспечило ввод стана в работу с проектными параметрами, в 1981 году. В кратчайший срок скорость стана была доведена до 36 м/сек.

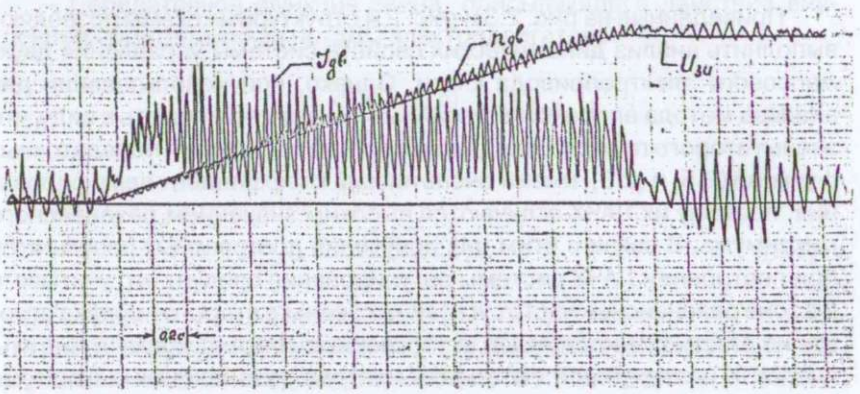


Рис. 2.5. Переходный процесс разгона электродвигателя клети

Упомянутое решение заключалось в том, что в систему регулирования была введена корректирующая гибкая обратная связь в виде пропорционально-дифференциального звена, которая подключалась входом к скорости электродвигателя, а выход звена был подключен к входу регулятора якорного тока электродвигателя.

Примененный вариант схемы подключения входного и выходного сигналов корректирующего звена системы автоматического регулирования скорости оказался отличным от всех вариантов параллельной коррекции двухмассовых систем, предлагаемых в [44]. Одновременно с введением корректирующего устройства на выходе регулятора скорости был включен апериодический фильтр первого порядка [45].

ЛАЧХ контура скорости и корректирующих звеньев показаны на рис. 2.6, а на рис. 2.7 приведена осциллограмма переходного процесса в контуре скорости при введении коррекции и фильтра на выходе РС.

Дальнейшие исследования динамических режимов рассматриваемой двухмассовой электромеханической системы электропривода клети, которые проводились после ввода двухклетевого дрессировочного стана в эксплуатацию, показали, что полученные ранее показатели качества регулирования скорости электродвигателя могут быть достигнуты другим способом, без применения дополнительных корректирующих цепей.

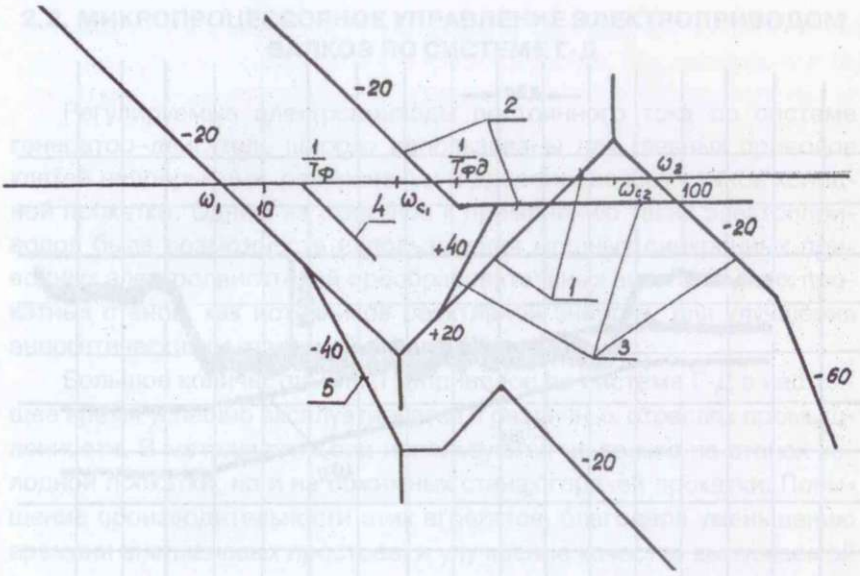


Рис. 2.6. Аппроксимированные ЛАЧХ контура скорости и корректирующих звеньев

1 – ЛАЧХ разомкнутого контура скорости без коррекции;
2 – обратная ЛАЧХ корректирующего звена гибкой обратной связи по скорости;
3 – ЛАЧХ разомкнутого контура скорости с учетом коррекции;
4 – ЛАЧХ апериодического фильтра в канале регулирования скорости;
5 – ЛАЧХ разомкнутого контура скорости с учетом коррекции и фильтра

Расчеты показали, что достаточно, без изменения структурной схемы двухконтурной системы, существенно повысить быстродействие контура регулирования якорного тока электродвигателя. Это оказалось достижимым на технических средствах реальных электроприводов клетей. После перестройки контуров регулирования якорного тока до быстродействия, которое характеризовалось частотой среза ЛАЧХ этого контура величиной до 200–250 $с^{-1}$, была обеспечена работоспособность дрессировочного стана.

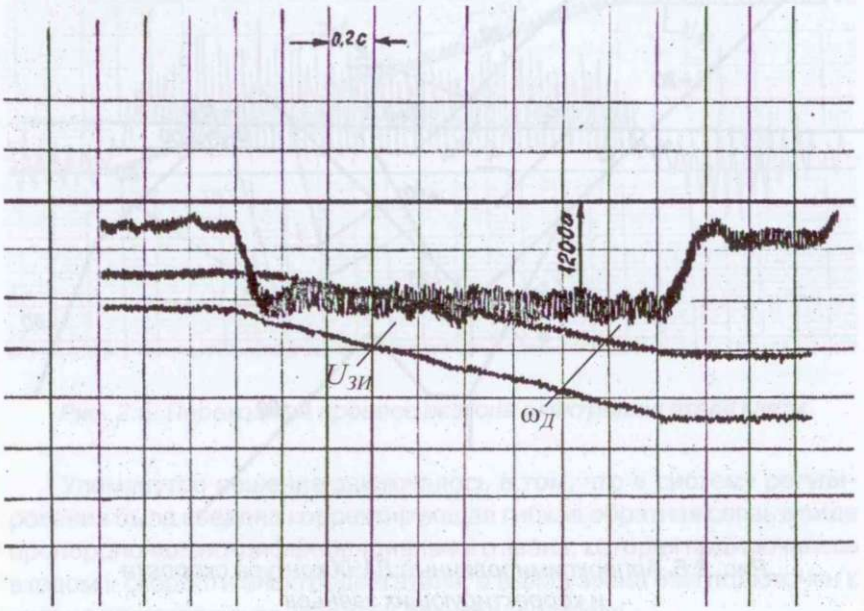


Рис. 2.7. Переходный процесс скорректированного контура скорости

Таким образом, в данном конкретном случае двухмассовой электромеханической системы средствами автоматизированного электропривода удалось демпфировать упругие колебания системы электродвигатель – прокатный валок. Из проведенной работы и полученного опыта следует, что расчеты динамики подобных сложных электромеханических систем должны проводиться на стадии начального конструирования и проектирования оборудования.

2.2. МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАЛКОВ ПО СИСТЕМЕ Г-Д

Регулируемые электроприводы постоянного тока по системе генератор–двигатель широко использованы для главных приводов клетей непрерывных, реверсивных и дрессировочных станов холодной прокатки. Одним из стимулов к применению таких электроприводов была возможность использования мощных синхронных приводных электродвигателей преобразовательных агрегатов этих прокатных станов, как источников реактивной энергии, для улучшения энергетических показателей питающей сети.

Большое количество электроприводов по системе Г-Д в настоящее время успешно эксплуатируется в различных отраслях промышленности. В металлургии они используются не только на станах холодной прокатки, но и на обжимных станах горячей прокатки. Повышение производительности этих агрегатов, благодаря уменьшению времени внеплановых простоев, и улучшение качества выпускаемой продукции за счет улучшения процесса регулирования координат электропривода, непосредственно связаны с необходимостью коренной модернизации рассматриваемых электроприводов. Она может быть выполнена без существенных капитальных затрат и поэтому предпочтительна.

При модернизации электроприводов прокатных станов, выполненных по системе Г-Д, в качестве альтернативы чаще всего рассматриваются различные варианты модернизации. Например, полная замена электроприводов постоянного тока на регулируемые электроприводы переменного тока с асинхронными или синхронными приводными электродвигателями и преобразователями частоты. Замена электропривода по схеме Г-Д на электропривод по схеме ТП-Д с сохранением существующих приводных электродвигателей постоянного тока, демонтажем генераторов и установкой тиристорных преобразователей постоянного тока.

Оба эти варианта существенно повышают эксплуатационную надежность электропривода, качество регулирования его координат и, в конечном счете, улучшают технологические показатели реконструируемых прокатных станов. Вместе с тем, данная модернизация требует значительных материальных и финансовых затрат на свою

реализацию, особенно при значительной установленной мощности электроприводов.

Третьим возможным вариантом реконструкции электропривода по схеме Г-Д является модернизация систем возбуждения генератора и двигателя с заменой существующих возбудителей современными тиристорными преобразователями с микропроцессорным программируемым управлением. Это позволяет при минимальных затратах существенно улучшить статическую и динамическую точность и быстродействие системы регулирования электропривода.

Опыт модернизации электроприводов большой мощности по схеме Г-Д клетей непрерывного стана холодной прокатки подтвердил экономическую и техническую целесообразность проведения такой работы, но вместе с тем выявил целый ряд особенностей, которые следует учитывать при выполнении подобной модернизации [46]. Эти особенности обусловлены тем, что в номенклатуре комплектных тиристорных преобразователей таких фирм, как, например, SIEMENS, ABB, SCHNEIDER ELECTRIC, специализированные тиристорные преобразователи для питания обмоток возбуждения генераторов постоянного тока отсутствуют. Серийные тиристорные преобразователи этих фирм предназначены для питания и управления электродвигателями постоянного тока, т.е. для реализации электропривода по системе ТП-Д. Они не являются тиристорными возбудителями по своему назначению, структуре силовой части и конфигурации программируемой микропроцессорной системы управления, что требует при их использовании для модернизации существующих систем Г-Д и принятии необходимых проектных решений.

Защита обмоток возбуждения от перенапряжения

В силовой части серийного тиристорного преобразователя, предназначенного для питания якорной цепи электродвигателя постоянного тока, отсутствуют средства, необходимые для защиты цепи нагрузки – обмотки возбуждения от перенапряжения, которое может возникнуть, например, при аварийном отключении питания тиристорного преобразователя.

При использовании нереверсивного тиристорного преобразователя для питания обмотки возбуждения электродвигателя, без изменения направления протекания тока в этой обмотке, вопрос защиты

обмотки от перенапряжения решается достаточно просто. Параллельно обмотке возбуждения электродвигателя включается простейшая гасящая цепь из диод-резистора, либо – варистора. Отметим, что последнее решение существенно дороже и не всегда оправдано.

При питании обмотки возбуждения генератора реверсивного электропривода от реверсивного (четырехквадрантного) тиристорного преобразователя для защиты обмотки от перенапряжения может быть использован либо параллельно включенный резистор, кратность омического сопротивления которого по отношению к сопротивлению обмотки определяет величину максимального перенапряжения на обмотке в аварийных режимах, либо, как и в предыдущем случае, использовать варистор.

Как показал анализ, принятое схемное решение по защите обмотки возбуждения генератора от перенапряжения влияет на структуру системы автоматического регулирования скорости вращения электродвигателя, а также на определение передаточных функций и настройку параметров контурных регуляторов.

Структура системы автоматического регулирования (САР)

Традиционно САР скорости вращения электропривода по схеме Г-Д строится в соответствии с принципами подчиненного регулирования как трёхконтурная, с контурами регулирования и, соответственно, регуляторами напряжения генератора, тока якоря электродвигателя и скорости электродвигателя. Возможен двухконтурный вариант построения такой системы, без контура регулирования и регулятора напряжения генератора, но с ПИД-регулятором якорного тока электродвигателя, при помощи которого производится компенсация двух «больших» постоянных времени в одном контуре регулирования – T_B и $T_Э$.

Программируемая структура системы регулирования серийного комплектного тиристорного электропривода с микропроцессорным управлением не позволяет построить САР частоты вращения системы Г-Д в точном соответствии с одним из вышеописанных способов. В этой системе в качестве первого внутреннего контура регулирования содержится контур регулирования тока нагрузки тиристорного преобразователя с адаптивным регулятором тока и обратной связью по полному току в питающей сети выпрямительного моста преобра-

зователя. Поэтому первым контуром регулирования при микропроцессорном управлении электроприводом по схеме Г-Д становится не контур регулирования напряжения генератора, а контур регулирования его тока возбуждения. Вторым контуром САР будет контур регулирования якорного тока электродвигателя, при реализации которого необходимо обеспечить преобразование выходного сигнала измерительного шунта в якорной цепи электродвигателя в стандартный входной сигнал микропроцессорной системы управления. Третьим контуром, как и в обычной схеме регулирования, является контур регулирования скорости электродвигателя, который может использовать в качестве сигнала обратной связи сигнал аналогового тахогенератора или импульсного датчика.

Структурная схема САР скорости электропривода по системе Г-Д приведена на рис. 2.8 (управление напряжением генератора). В схеме не учтені влияние вихревых токов и нелинейность характеристики намагничивания генератора.

На рис. 2.8 введены обозначения: ЗИ – задатчик интенсивности; ФП1 – функциональный преобразователь; МІ – множитель; БО – блок ограничения; РС, РТЯ, РТВГ – контурные регуляторы скорости, тока в якорной цепи и тока возбуждения генератора; ТВГ – тиристорныи возбудитель генератора; К – коммутатор сигнала управления переключателем гашения поля генератора П.

Для надежного гашения остаточного потока возбуждения генератора и предотвращения эффекта «ползучей» скорости электродвигателя при его остановке, в САР вводится дополнительная обратная связь по напряжению генератора. Она подключается коммутатором на вход либо регулятора тока возбуждения, либо регулятора скорости при выполнении одного из двух условий – нулевой сигнал задания скорости на входе регулятора скорости или размыкание силовой цепи системы Г-Д.

Параметры цепи обратной связи по напряжению генератора выбираются таким образом, чтобы обеспечить надежное гашение остаточного потока возбуждения генератора и одновременно – устойчивость при введении в режиме гашения поля замкнутого контура регулирования напряжения генератора.

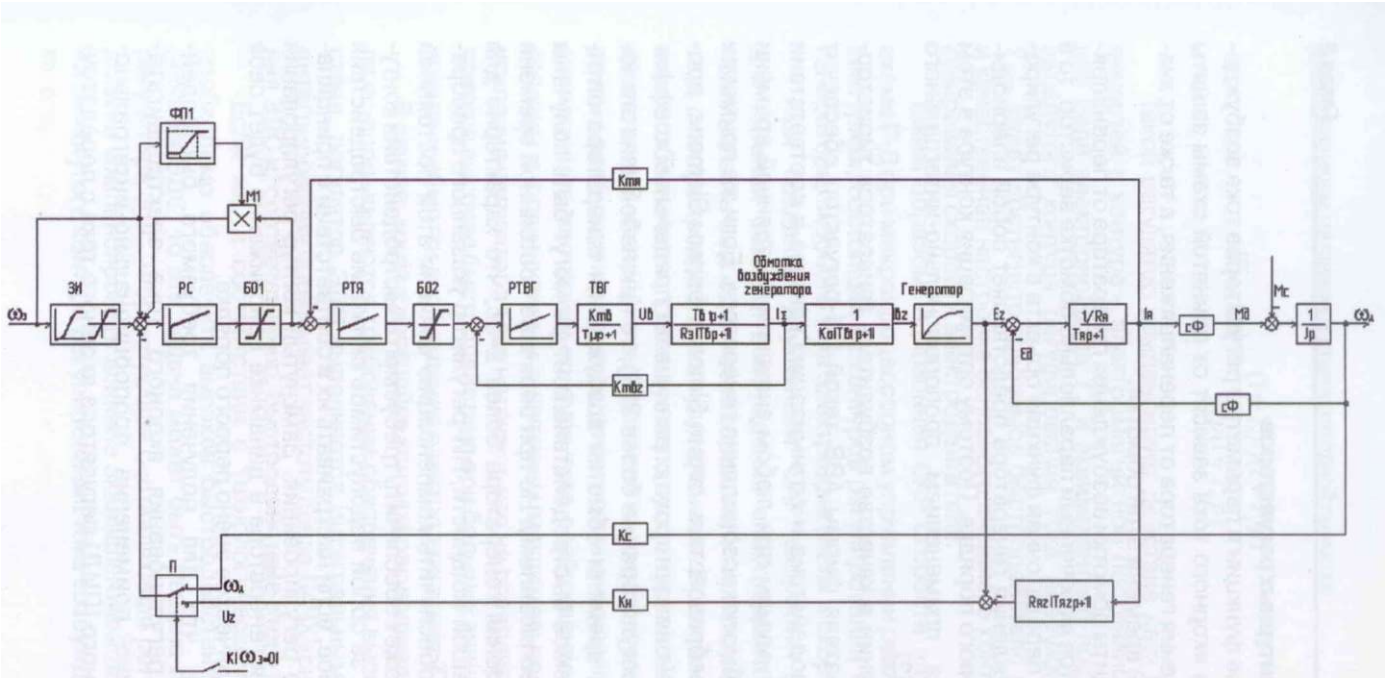


Рис. 2.8. Структурная схема САР скорости электропривода по системе Г-Д

Настройка контурных регуляторов

Передаточные функции и параметры регуляторов тока возбуждения генератора и якорного тока зависят от принятой схемы защиты обмотки возбуждения генератора от перенапряжения, а также от значения постоянной времени этой обмотки.

Если для защиты обмотки возбуждения генератора от перенапряжения используется включенный параллельно обмотке варистор, то в рабочем режиме передаточная функция объекта в контуре регулирования тока возбуждения генератора представляет собой апериодическое звено первого порядка. Поэтому оптимизация контура в этом случае решается применением пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора [2].

При применении в качестве возбудителя генератора тиристорного преобразователя фирмы ABB такой ПИ-регулятор обеспечит требуемое быстродействие и оптимизацию контура в соответствии с модульным оптимумом при любом значении постоянной времени объекта – цепи обмотки возбуждения генератора. Если же применен тиристорный преобразователь серии Simoreg фирмы Siemens, программное обеспечение которого ограничивает предельный коэффициент усиления регулятора (не более 200), то при небольших значениях постоянной времени обмотки возбуждения генератора оптимизация и требуемое быстродействие контура могут быть получены аналогично вышеописанному. Но при величине постоянной времени обмотки возбуждения генератора более 2–3с, что характерно для генераторов большой мощности, ПИ-регулятор указанного преобразователя может обеспечить компенсацию влияния этой постоянной времени, но не может обеспечить требуемого быстродействия контура. Это повлечёт за собой недопустимое снижение быстродействия остальных контуров, если настраивать их в соответствии с принципами подчинённого регулирования. Замкнутый контур регулирования тока возбуждения генератора в динамике приближенно будет себя вести как апериодическое звено первого порядка.

Установлено, что для получения требуемого быстродействия контура регулирования якорного тока электродвигателя целесообразно применение пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора якорного тока с передаточной функцией:

$$W_{РТЯ}(p) = \frac{(1+T_1 p)(1+T_2 p)}{T_3 p(1+T_4 p)}. \quad (2.9)$$

Такой регулятор компенсирует действие двух больших инерционностей в контуре – электромагнитной постоянной времени якорной цепи электропривода $T_Я$ и эквивалентной постоянной времени замкнутого контура регулирования тока возбуждения генератора $T_{ВЭ}$. Будет достигнуто требуемое быстродействие в данном контуре и качественная настройка основного внешнего контура – контура регулирования скорости электродвигателя.

Таким образом, однозонная САР скорости электродвигателя в схеме Г-Д при микропроцессорном управлении реализуется как трёхконтурная, состоящая из контуров регулирования тока возбуждения генератора, якорного тока электродвигателя и скорости последнего.

При создании двухзонной САР скорости электродвигателя для питания обмотки возбуждения электродвигателя необходимо использовать еще один, нереверсивный тиристорный преобразователь с микропроцессорным управлением. При помощи его программного обеспечения реализуется двухконтурная САР ЭДС электродвигателя. В настройке внутреннего контура регулирования – контура тока возбуждения электродвигателя также существуют проблемы, аналогичные настройке контура тока возбуждения генератора. Они связаны с ограниченным значением максимального коэффициента усиления регулятора тока нагрузки, что не позволяет получить в этом контуре высокое быстродействие при больших значениях постоянной времени обмотки возбуждения электродвигателя $T_{ВД}$.

В случае, когда к настройке контура регулирования ЭДС двигателя не предъявляются требования обеспечения высокого быстродействия, регулятор ЭДС выполняется интегральным. Его постоянная интегрирования определяет частоту среза ЛАЧХ контура регулирования ЭДС и, соответственно, быстродействие этого контура.

Если же, в соответствии с технологическими требованиями, необходимо обеспечить высокое быстродействие контура регулирования ЭДС, то эта задача может быть решена применением ПИ-регулятора ЭДС. Форсирующая составляющая регулятора при этом должна компенсировать влияние эквивалентной постоянной времени замкнутого контура регулирования тока возбуждения электродвигателя.

В том случае, когда защита обмотки возбуждения генератора от перенапряжения выполнена при помощи шунтирующего резистора, настройка регуляторов контуров САР электропривода по схеме Г-Д отличается от рассмотренного варианта.

При такой схеме включения обмотки возбуждения, поскольку первый внутренний контур САР замкнут по полному току нагрузки тиристорного преобразователя, питающего обмотку возбуждения генератора, объект регулирования контура – цепь обмотки возбуждения генератора описывается следующими передаточными функциями:

$$W_1(p)=\frac{I_0(p)}{U_B(p)}=\frac{(1+T_{B1}p)}{R_Э(1+T_Bp)}, \qquad (2.10)$$

$$W_2(p)=\frac{I_B(p)}{I_0(p)}=\frac{1}{K_0(1+T_{B1}p)}. \qquad (2.11)$$

В выражениях (2.10) и (2.11): T_B – постоянная времени обмотки возбуждения генератора; I_0 – суммарный ток нагрузки тиристорного преобразователя; I_B – ток в обмотке возбуждения генератора; U_B – напряжение тиристорного преобразователя; T_B – постоянная времени обмотки возбуждения. При этом эквивалентное сопротивление нагрузки тиристорного преобразователя определяется как

$$R_э=\frac{R_BR_Г}{R_B+R_Г}, \qquad (2.12)$$

$$K_0=\frac{R_B+R_Г}{R_Г}. \qquad (2.13)$$

R_B –сопротивление обмотки возбуждения генератора; $R_Г$ –сопротивление защитного гасящего резистора; K_0 – коэффициент соотношения сопротивлений резисторов. Эквивалентная постоянная времени цепи возбуждения,

$$T_{B1} = \frac{L_B}{R_B + R_\Gamma}, \qquad (2.14)$$

где L_B – индуктивность обмотки возбуждения генератора.

Очевидно, что звено с передаточной функцией $W_2(p)$ находится вне контура регулирования тока нагрузки тиристорного преобразователя и входит в состав объекта регулирования второго контура регулирования – контура якорного тока электродвигателя.

Постоянная времени T_{B1} с учётом того, что сопротивление гасящего резистора обычно принимается равным 5–8 сопротивлениям обмотки возбуждения, будет в несколько раз меньше постоянной времени обмотки возбуждения генератора, что для машин большой мощности составит несколько десятых долей секунды.

Принимая во внимание, что передаточная функция объекта регулирования контура тока возбуждения описывается выражением (2.10), при настройке этого контура регулирования высокое быстродействие в нем может быть достигнуто с использованием ПИ-регулятора. Его параметры должны выбираться не в соответствии с известными соотношениями, полученными для условий, когда в контуре имеется только одна «большая» постоянная времени. Наличие в составе передаточной функции объекта регулирования (2.10) форсирующего звена позволяет, не производя полной компенсации постоянной времени обмотки возбуждения T_B, получить достаточно высокую частоту среза ЛАЧХ контура тока нагрузки при хорошем качестве переходных процессов, используя действие в контуре двух форсирующих звеньев – ПИ-регулятора и объекта. С учетом этого, аппроксимированная ЛАЧХ контура регулирования будет иметь вид 1–2–1–0–1.

При определенном соотношении параметров динамических звеньев контура применение ПИ-регулятора с указанной настройкой приведет к слишком высокому быстродействию, снижению помехозащищенности и ухудшению качества регулирования. В этом случае ПИ-регулятор должен быть дополнен апериодическим фильтром первого порядка на выходе.

Требуемое быстродействие в контуре регулирования якорного тока электродвигателя, в состав объекта регулирования которого вошли две «большие» постоянные времени – электромагнитная

постоянная времени $T_Я$ и T_{B1}, может быть получено применением ПИД-регулятора якорного тока, аналогичного ранее рассмотренному (2.9).

Определение параметров регуляторов остальных контуров регулирования (скорости электродвигателя, тока возбуждения и ЭДС электродвигателя) для рассматриваемого случая не отличается от рассмотренного выше варианта использования для защиты обмотки возбуждения генератора варистора.

Описанные анализ динамики, построение структуры, определение параметров и настройка контурных регуляторов системы микропроцессорного управления электроприводом по схеме Г-Д с использованием для возбуждения генераторов и электродвигателей тиристорных преобразователей фирмы SIEMENS успешно применены при создании двухзонной САР скорости электродвигателей реконструированных электроприводов валков клетей непрерывного пятиклетевого стана 1700 холодной прокатки, электропривод которых осуществляется от приводных двухякорных электродвигателей 2х2400 (2х2900) кВт при мощности генераторов 5200 (5700) кВт. В связи с параллельным включением якорей электродвигателей и индивидуальным приводом валков описанная САР скорости вращения электродвигателей дополнена контуром выравнивания нагрузки между якорями и контуром выравнивания нагрузки между электроприводами валков одной клети, которые также успешно введены в работу. При этом связь между тиристорными преобразователями САР электроприводов верхнего и нижнего валков одной клети осуществлена при помощи быстродействующей сети.

Качество регулирования скорости электропривода, полученное в описанной системе, может быть проиллюстрировано осциллограммами рис. 2.6 и рис. 2.7.

На осциллограмме рис. 2.9 показано изменение параметров электропривода – задания скорости, скорости электродвигателя, тока в якорной цепи, напряжения генератора и динамической ошибки скорости электродвигателя рабочего валка клети в режиме разгона стана.

На осциллограмме рис. 2.10 показано изменение тех же параметров электропривода рабочего валка клети в режиме пропуска шва на стане, т.е. торможение стана до пониженной скорости и последующий разгон до рабочей скорости.

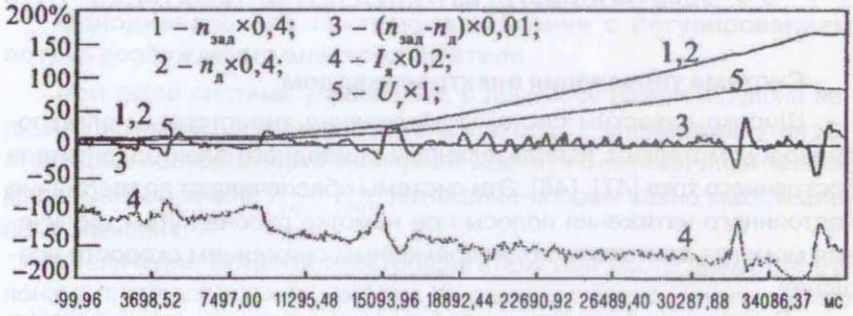


Рис. 2.9. Параметры электропривода рабочего валка клети при разгоне стана

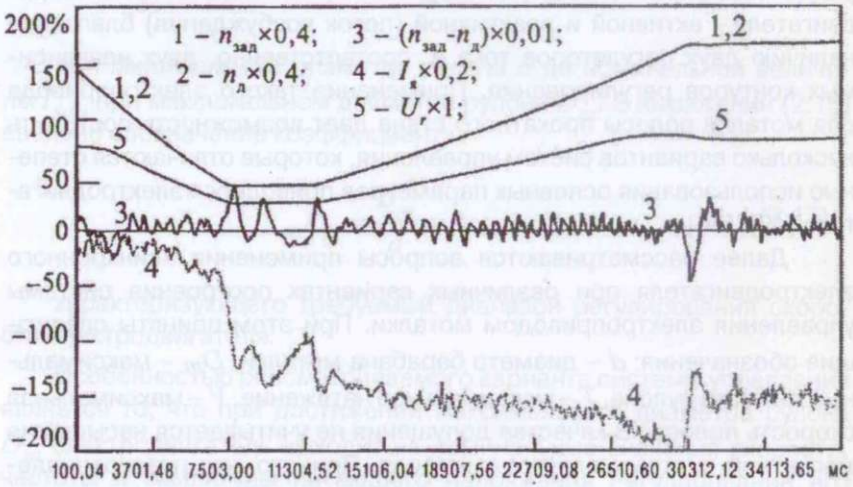


Рис. 2.10. Параметры электропривода рабочего валка клети при пропуске сварного шва

Как видно из осциллограмм, максимальная динамическая ошибка САР скорости электропривода в приведенных режимах не превышает 0,5%, что можно считать хорошим показателем качества работы САР скорости электропривода рабочего валка стана холодной прокатки.

2.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД МОТАЛКИ ПО СИСТЕМЕ ПЧ-АД

Система управления электроприводом

Широко известны системы управления тиристорным электроприводом моталки с использованием приводного электродвигателя постоянного тока [47], [48]. Эти системы обеспечивают поддержание постоянного натяжения полосы при намотке рулона путем увеличения момента двигателя с одновременным снижением скорости вращения.

Современной альтернативой такому электроприводу моталки является электропривод переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с использованием векторного управления. В таком преобразователе осуществляется раздельное управление двумя составляющими тока статора электродвигателя – активной и реактивной (поток возбуждения) благодаря наличию двух регуляторов тока и, соответственно, двух независимых контуров регулирования. Применение такого электропривода для моталки полосы прокатного стана дает возможность построить несколько вариантов систем управления, которые отличаются степенью использования основных параметров приводного электродвигателя [49], [50].

Далее рассматриваются вопросы применения асинхронного электродвигателя при различных вариантах построения системы управления электроприводом моталки. При этом приняты следующие обозначения: d – диаметр барабана моталки, D_m – максимальный диаметр рулона, T – максимальное натяжение, V – максимальная скорость полосы. В качестве допущения не учитывается насыщение магнитной системы электродвигателя. Принято, что потокосцепление пропорционально реактивной составляющей тока статора, следовательно, вращающий момент электродвигателя [51], [52] пропорционален произведению

$$M \equiv I_{sq}\Psi \equiv I_{sq}I_{sd}, \qquad (2.15)$$

где I_{sd}, I_{sq} – составляющие тока статора; ψ – потокосцепление электродвигателя.

Однодиапазонная система управления с регулированием потока возбуждения электродвигателя

При такой системе управления, в процессе намотки рулона величина активной составляющей тока статора I_{sq} поддерживается постоянной в соответствии с величиной заданного натяжения, и при номинальной величине $I_{sq} = I_{sqn}$ натяжение полосы равно максимальному значению T.

Увеличение момента электродвигателя при росте диаметра рулона в процессе намотки рулона и, соответственно, снижение его скорости обеспечивается увеличением реактивной составляющей тока статора I_{sd} от минимального значения

$$I_{sd\min} = \frac{I_{sdн}}{K_{\omega}} \qquad (2.16)$$

при минимальном диаметре рулона d до номинальной величины $I_{sdн}$ при максимальном диаметре рулона D_m. В выражении (2.16) введено обозначение коэффициента

$$K_{\omega} = \frac{D_m}{d}, \qquad (2.17)$$

характеризующего требуемый диапазон регулирования скорости электродвигателя.

Особенностью рассматриваемого варианта системы управления является то, что при достижении максимального диаметра рулона D_m электродвигатель выходит на номинальные значения скорости, частоты и амплитуды питающего напряжения Регулирование его скорости в процессе намотки производится при увеличении частоты питающего напряжения сверх номинального значения. Это означает, что электродвигатель должен допускать возможность увеличения скорости в K_{ω} раз по сравнению с номинальной. Требуемые величины номинальных параметров – момента и мощности приводного электродвигателя определяются следующими выражениями:

$$M_{н} \geq \frac{TD_m}{2} \qquad (2.18)$$

$$P_н \geq M_н \omega_н . \quad (2.19)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона, используя методику, примененную в [47]. Примем следующие допущения: скорость прокатки постоянная, время работы на пониженной скорости (заправка) не учитывается, не учитывается время пауз и дополнительный нагрев от динамических токов. Эти допущения не вносят существенных погрешностей и приняты в ряде работ и в проектной практике (47). Закон изменения реактивной составляющей тока статора в процессе намотки рулона соответствует выражению

$$I_{sd1} = I_{sdн} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sdн} D}{K_\omega d}, \quad (2.20)$$

в котором D – текущее значение диаметра рулона, равное при толщине полосы h и скорости V [53]

$$D = d\sqrt{1+\frac{4hVt}{\pi d^2}} . \quad (2.21)$$

Эквивалентный (среднеквадратичный) ток за цикл намотки рулона

$$I_{sd1э} = \sqrt{\frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} I_{sd1}^2 dt} , \quad (2.22)$$

где T_0 – время цикла намотки рулона максимального диаметра, равное из (2.21)

$$T_0 = \frac{\pi d^2 \left(K_\omega^2 - 1\right)}{4hV} . \quad (2.23)$$

Используя выражения (2.20) и (2.23), из (2.22) получим

$$I_{sd1э} = I_{sdн}\sqrt{\frac{K_\omega^2+1}{2K_\omega^2}}. \qquad (2.24)$$

Теперь, с учетом известных соотношений для асинхронного электродвигателя $I_{sqн} = I_{sн} \cdot \cos\varphi$ и $I_{sdн} = I_{sн} \cdot \sin\varphi$ найдем эквивалентный ток статора за цикл намотки из равенства

$$I_{s1э} = \sqrt{I_{sdн}^2 + I_{sq1э}^2}. \qquad (2.25)$$

После подстановки в (2.25) полученного значения (2.24) и преобразования получим выражение полного тока статора электродвигателя за цикл намотки

$$I_{s1э} = I_{sн}\sqrt{\frac{K_\omega^2+1}{2K_\omega^2} + \frac{K_\omega^2-1}{2K_\omega^2}cos^2\varphi}. \qquad (2.26)$$

Численный анализ полученного выражения показывает, что рассмотренная система управления обеспечивает неплохое использование приводного электродвигателя в цикле намотки рулона. Так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 коэффициент использования электродвигателя при $\cos\varphi = 0{,}8$ находится в пределах от 0,93 до 0,908 номинального тока.

Однодиапазонная система управления без регулирования потока возбуждения электродвигателя

В процессе намотки рулона в такой системе величина реактивной составляющей тока статора поддерживается постоянной и равной номинальной $I_{sdн}$. Увеличение момента электродвигателя по мере роста диаметра рулона производится путем увеличения активной составляющей тока статора от минимального значения

$$I_{sq2\min} = \frac{I_{sqн}}{K_\omega} \qquad (2.27)$$

до номинального значения $I_{sqн}$ при максимальном диаметре рулона D_m. Скорость приводного электродвигателя при этом снижается от номинальной при минимальном диаметре рулона до минимальной при максимальном диаметре рулона, благодаря соответствующему снижению частоты и амплитуды питающего напряжения. Тем самым регулирование скорости электродвигателя при намотке рулона производится вниз от номинальной. Величина момента приводного электродвигателя для создания натяжения T определяется (2.18), а номинальная мощность электродвигателя будет

$$P_{н2} \geq M_н \cdot \omega_{\max} = P_{н1} K_\omega . \qquad (2.28)$$

Из (2.28) следует, что номинальная мощность электродвигателя в K_ω раз выше, а номинальная скорость в K_ω раз ниже, чем $P_{н1}$ в предыдущем варианте.

Так же, как и в предыдущем варианте, рассмотрим, степень загрузки электродвигателя в цикле намотки. Закон изменения активной составляющей тока статора в процессе намотки рулона имеет вид, подобно (2.20)

$$I_{sq2} = I_{sqн} \frac{D}{D_m} = \frac{I_{sqн} D}{K_\omega d}, \qquad (2.29)$$

а ее среднеквадратичное значение за цикл намотки рулона равно

$$I_{sq2э} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I_{sq2}^2 dt} . \qquad (2.30)$$

Подставив в (2.30) T_0 из (2.23), D из (2.21) и I_{sq2} из (2.29), после интегрирования получим

$$I_{sq2э} = I_{sq2н} \sqrt{\frac{K_\omega^2 + 1}{K_\omega^2}} . \qquad (2.31)$$

Теперь, используя (2.25), после подстановки полученного значения (2.31) найдем величину эквивалентного полного тока электродвигателя за цикл намотки рулона максимального диаметра

$$I_{s2э} = I_{sн}\sqrt{1-\frac{K_\omega^2-1}{2K_\omega^2}\cos^2\varphi}\,. \qquad (2.32)$$

Анализ выражения (2.32) показывает, что рассмотренный вариант системы управления обеспечивает худшее использование приводного электродвигателя в цикле намотки, чем предыдущий. Так, при изменении величины K_ω в диапазоне от 2 до 6 использование электродвигателя при $\cos\varphi = 0{,}8$ находится в пределах от 0,87 до 0,83 номинального тока.

Двухдиапазонная система управления

Применение двухдиапазонной системы управления позволяет использовать асинхронный электродвигатель с меньшей требуемой величиной диапазона регулирования скорости ослаблением потока возбуждения электродвигателя по сравнению с однодиапазонной системой с регулированием потока возбуждения, и в то же время меньшей требуемой мощностью, чем при применении однодиапазонной системы без регулирования потока возбуждения электродвигателя.

В этом варианте системы управления, в отличие от двух рассмотренных выше, цикл намотки рулона максимального диаметра разделяется на два диапазона: первый – от минимального диаметра рулона d до некоторого промежуточного D_0, и второй – от диаметра D_0 до максимального D_m, рис. 2.11.

В первом диапазоне намотки рулона, при постоянной величине активной составляющей тока статора, равной минимальному значению

$$I_{sq31\min} = I_{sqн}\frac{D_0}{D_m}, \qquad (2.33)$$

и номинальном напряжении электродвигателя снижение скорости электродвигателя производится посредством увеличения реак-

тивной составляющей тока статора (потока возбуждения) от минимальной величины

$$I_{sq31\min} = I_{sqн}\frac{d}{D_0} \qquad (2.34)$$

до номинальной $I_{sdн}$, которая достигается при диаметре рулона D_0. Во втором диапазоне намотки рулона, при увеличении диаметра рулона от D_0 до D_m, поток возбуждения электродвигателя поддерживается постоянным, равным номинальному. При этом увеличение момента электродвигателя происходит путем увеличения активной составляющей тока от минимального до номинального значения, которое достигается при максимальных величинах натяжения и диаметра рулона. Снижение скорости электродвигателя в этом диапазоне производится снижением частоты и амплитуды питающего напряжения.

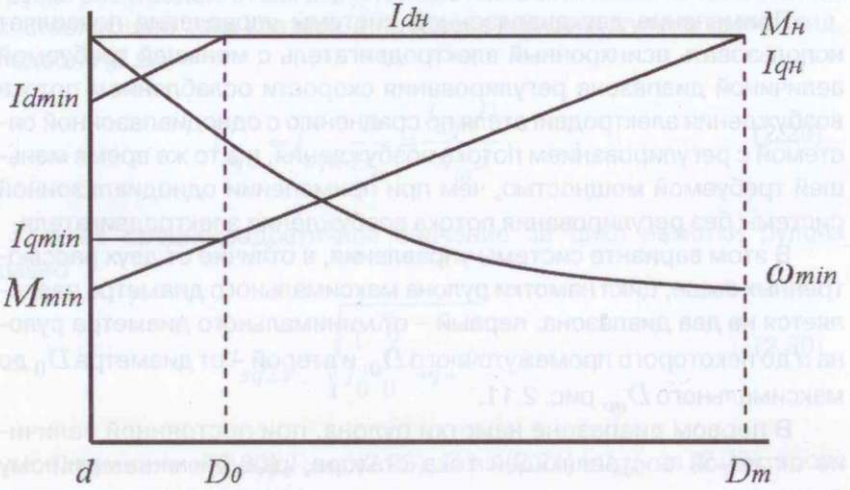


Рис. 2.11. Изменение параметров электродвигателя при намотке рулона (двухдиапазонная система)

Применение рассматриваемого варианта системы управления позволяет использовать для моталки в качестве приводного электро-

двигатель с меньшим диапазоном регулирования скорости свыше номинальной, равным отношению

$$K_0 = \frac{D_0}{d}. \qquad (2.35)$$

Требуемый номинальный момент электродвигателя определяется выражением (2.16), а его номинальная скорость достигается при намотке диаметра D_0 таким образом, мощность электродвигателя для создания натяжения T равна

$$P_{н3} = M_н \omega_0 = P_{н1} \frac{d}{D_0} = P_{н1} \frac{K_\omega}{K_0}. \qquad (2.36)$$

Рассмотрим, как загружен электродвигатель в цикле намотки рулона при использовании рассматриваемого варианта двухдиапазонной системы управления.

В первом диапазоне намотки активная составляющая тока статора остается постоянной, а реактивная составляющая изменяется по закону

$$I_{sd31} = I_{sdн} \frac{D}{D_0}. \qquad (2.37)$$

Используя (2.21), найдем время намотки рулона в первом диапазоне

$$T_1 = \frac{\pi d^2 (K_0^2 - 1)}{4h \cdot V}. \qquad (2.38)$$

Из (2.22), применительно к первому диапазону намотки, можно записать выражение эквивалентного значения реактивной составляющей тока

$$I_{sd31э} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} I_{sd31}^2 dt}, \qquad (2.39)$$

которое после подстановки (2.38) дает

$$I_{sd31э} = I_{sdн}\sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2}}. \qquad (2.40)$$

Используя теперь (2.25) с учетом (2.33), получим выражение эквивалентного полного тока статора в первом диапазоне намотки рулона

$$I_{s31э} = I_{sн}\sqrt{\frac{1+K_0^2}{2K_0^2} - \frac{K_0^2K_\omega^2 + K_\omega^2 - 2K_0^4}{2K_0^2K_\omega^2}\cos^2\varphi}. \qquad (2.41)$$

Во втором диапазоне реактивная составляющая тока статора не изменяется и равна номинальному значению $I_{sdн}$, а активная составляющая увеличивается пропорционально диаметру рулона по закону

$$I_{sq32} = I_{sq31}\frac{D}{D_0} = I_{sqн}\frac{D}{K_\omega d}. \qquad (2.42)$$

Используя (2.21), применительно ко второму диапазону намотки, найдем время намотки во втором диапазоне

$$T_2 = \frac{\pi d^2(K_\omega^2 - K_0^2)}{4hV}. \qquad (2.43)$$

Аналогично предыдущему случаю, из выражения эквивалентного значения активной составляющей тока в этом диапазоне намотки

$$I_{sq32э} = \sqrt{\frac{1}{T_2}\int_0^{T_2} I_{sq32}^2 dt} \qquad (2.44)$$

с учетом (2.42) и (2.43) находим

$$I_{sq32э} = I_{sqн}\sqrt{\frac{K_0^2 + K_\omega^2}{2K_\omega^2}}. \qquad (2.45)$$

Используя выражение (2.25) с учетом (2.45), получим значение эквивалентного полного тока статора во втором диапазоне намотки рулона

$$I_{s32э} = I_{sн}\sqrt{1-\frac{K_\omega^2-K_0^2}{2K_\omega^2}\cos^2\varphi}\ . \qquad (2.46)$$

Найдем значение эквивалентного полного тока статора электродвигателя за весь цикл намотки максимального диаметра

$$I_{sзэ} = I_{sн}\sqrt{\frac{I_{s31э}^2T_1+I_{s32э}^2T_2}{T_0}}\ , \qquad (2.47)$$

которое после подстановки (2.41) и (2.46) дает, 1в общем виде

$$I_{s3э} = I_{sн}\sqrt{A+B\cos^2\varphi}\ , \qquad (2.48)$$

где

$$A = \frac{2K_0^2K_\omega^2-K_0^4-1}{2K_0^2(K_\omega^2-1)}, \qquad (2.49)$$

$$B = -\frac{K_\omega^4K_0^2-K_\omega^2K_0^4+2K_0^4-K_\omega^2-K_0^6}{2K_0^2K_\omega^2(K_\omega^2-1)}. \qquad (2.50)$$

Анализ выражения (2.48) показывает, что степень использования электродвигателя при применении двухдиапазонной системы управления не лучше, чем предыдущей однодиапазонной системы без регулирования тока возбуждения.

Снижение требуемой мощности приводного электродвигателя и улучшение технико-экономических показателей электропривода моталки с асинхронным электродвигателем может быть достигнуто применением модифицированных вариантов систем управления.

Ниже рассмотрены два варианта таких систем управления.

Однодиапазонная модифицированная система управления

Основная особенность рассматриваемых далее систем заключается в том, что в процессе намотки рулона с максимальным натяжением полосы, часть цикла намотки рулона максимального диаметра происходит при токе статора электродвигателя, превышающем номинальное значение. При этом среднеквадратичное значение тока за цикл намотки не превышает номинальной величины, что предотвращает перегрев электродвигателя, рис. 2.12.

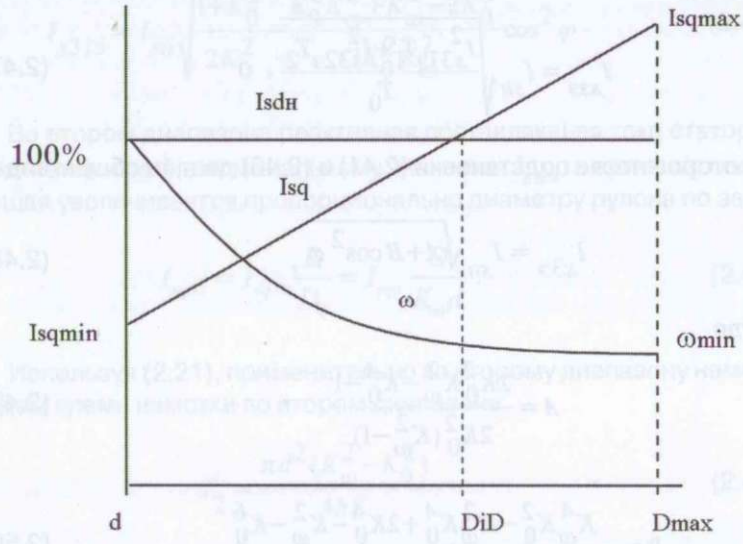


Рис. 2.12. Изменение параметров электродвигателя при намотке рулона (однодиапазонная модифицированная система)

В данном варианте системы управления поток возбуждения электродвигателя в процессе намотки рулона поддерживается постоянным и равным номинальному, то есть уменьшение скорости электродвигателя производится только путем снижения частоты питающего напряжения от номинального значения при минимальном диаметре рулона до минимального – при максимальном диаметре. Увеличение момента электродвигателя при намотке производится путем роста активной составляющей тока статора сначала от минимального зна-

чения при минимальном диаметре рулона до номинального, которое достигается при некотором промежуточном диаметре рулона

$$d < D_i < D_m . \tag{2.51}$$

Дальнейшее увеличение активной составляющей тока сверх номинального значения происходит, когда $D>D_i$, так что

$$I_{sq4\min} = I_{sqн} \frac{d}{D_i}, \tag{2.52}$$

$$I_{sq4\max} = I_{sqн} \frac{D_m}{D_i} = I_{sqн} K_i . \tag{2.53}$$

Номинальная скорость электродвигателя соответствует минимальному диаметру рулона, а его номинальная мощность достигается при максимальном натяжении и диаметре рулона D, т.е.

$$P_{н4} = P_н \frac{K_\omega}{K_i} . \tag{2.54}$$

Для анализа загрузки электродвигателя в рассматриваемом варианте системы используем примененную ранее методику. Найдем эквивалентное значение активной составляющей тока статора за цикл намотки рулона максимального диаметра, принимая во внимание, что закон изменения этой составляющей имеет вид

$$I_{sq4} = I_{sqн} \frac{D}{D_i}, \tag{2.55}$$

а поэтому

$$I_{sq4э} = I_{sqн} \sqrt{\frac{K_i^2 (K_\omega^2 + 1)}{2K_\omega^2}} . \tag{2.56}$$

Соответственно, полный ток электродвигателя будет равен

$$I_{s4э} = I_{sн} \sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_i^2 K_\omega^2 + K_i^2}{2K_\omega^2} \cos^2 \varphi} . \tag{2.57}$$

Номинальной загрузке электродвигателя за цикл намотки соответствует условие равенства $I_{sq4э}$ номинальному значению $I_{sqн}$. При этом должно быть выполнено условие

$$\frac{K_i^2(K_\omega^2+1)}{2K_\omega^2}=1, \qquad (2.58)$$

которое дает

$$K_i = K_\omega\sqrt{\frac{2}{K_\omega^2+1}}. \qquad (2.59)$$

Из (2.59) можно найти величину коэффициента K_i по известной величине диапазона изменения диаметра рулона K_ω, рис. 2.13.

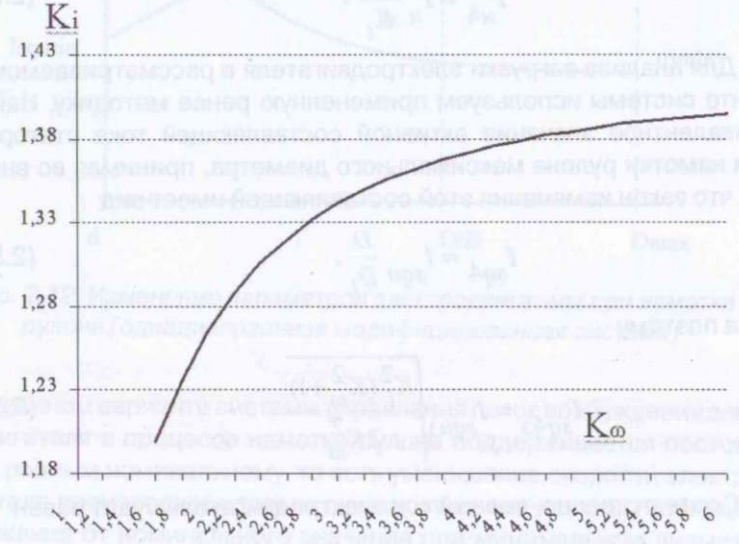


Рис. 2.13. Зависимость коэффициента K_i от коэффициента K_ω

Двухдиапазонная модифицированная система управления

Намотка рулона при применении этого варианта системы, как и при использовании обычной двухдиапазонной системы, происходит в два этапа, рис. 2.14.

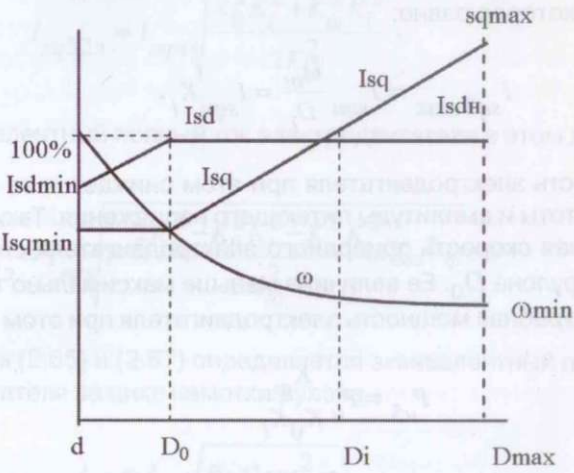


Рис. 2.14. Изменение параметров электродвигателя при намотке рулона (двухдиапазонная модифицированная система)

Сначала, в первом диапазоне, при изменении диаметра рулона от d до D_0, намотка происходит при постоянной величине активной составляющей тока, равной

$$I_{sq51\min} = I_{sqн}\frac{D_0}{D_i} = I_{sqн}\frac{K_0 K_i}{K_\omega}, \qquad (2.60)$$

и увеличении реактивной составляющей тока от минимальной величины, определяемой выражением

$$I_{sd51\min} = I_{sdн}\frac{d}{D_0} = \frac{I_{sdн}}{K_0} \qquad (2.61)$$

до номинального значения. При этом скорость электродвигателя снижается от максимального до номинального значения путем снижения частоты питающего напряжения при номинальной амплитуде.

При дальнейшем увеличении диаметра рулона в процессе намотки от величины D_0 до максимального значения D_m реактивная составляющая тока поддерживается номинальной. Активный ток растет пропорционально диаметру, достигая номинального значения при диаметре D_i, и далее, при диаметре рулона D_m – максимального значения, которое равно:

$$I_{sq5\max} = I_{sqн}\frac{D_m}{D_i} = I_{sqн}K_i. \qquad (2.62)$$

Скорость электродвигателя при этом снижается за счет уменьшения частоты и амплитуды питающего напряжения. Таким образом, номинальная скорость приводного электродвигателя соответствует диаметру рулона D_0. Ее величина меньше максимально требуемой в K_0 раз. Потребная мощность электродвигателя при этом равна

$$P_{н5} = P_н\frac{K_\omega}{K_0K_i}. \qquad (2.63)$$

Определить параметры приводного электродвигателя и произвести разбивку диапазонов регулирования при конструировании такой системы управления электроприводом моталки можно, используя нижеприведенные зависимости, которые получены с использованием примененной ранее методики.

Эквивалентное значение реактивной составляющей тока за время работы в первом диапазоне

$$I_{sd51э} = I_{sdн}\sqrt{\frac{K_0^2+1}{2K_0^2}}, \qquad (2.64)$$

а эквивалентный полный ток, с учетом (2.60) определяется как

$$I_{s51э} = I_{sн}\sqrt{\frac{K_0^2+1}{2K_0^2} - \frac{K_0^2K_\omega^2+K_\omega^2-2K_0^4K_i^2}{2K_0^2K_\omega^2}\cos^2\varphi}. \qquad (2.65)$$

Во втором диапазоне намотки при номинальной величине реактивной составляющей тока эквивалентное значение активной составляющей определяется выражением:

$$I_{sq52э} = I_{sqн}\sqrt{\frac{K_0^2K_i^2 + K_\omega^2K_i^2}{2K_\omega^2}}, \qquad (2.66)$$

а эквивалентный полный ток электродвигателя в этом диапазоне равен

$$I_{s52э} = I_{sн}\sqrt{1 - \frac{2K_\omega^2 - K_0^2K_i^2 - K_\omega^2K_i^2}{2K_\omega^2}\cos^2\varphi}. \qquad (2.67)$$

С учетом (2.65) и (2.67) определяется эквивалентный полный ток электродвигателя за цикл намотки рулона

$$I_{s5} = I_{sн}\sqrt{P - Q\cos^2\varphi}, \qquad (2.68)$$

где

$$P = \frac{2K_0^2K_\omega^2 - K_0^4 - 1}{2K_0^2(K_\omega^2 - 1)}, \qquad (2.69)$$

а

$$Q = \frac{K_0^6K_i^2 - 2K_0^4K_i^2 + K_0^4K_\omega^2 - 2K_0^2K_\omega^4 + K_0^2K_i^2K_\omega^4 + K_\omega^2}{2K_0^2K_\omega^2(K_\omega^2 - 1)}. \qquad (2.70)$$

Очевидно, что для полного (наилучшего) использования электродвигателя, его эквивалентный ток за цикл намотки рулона должен быть равен номинальному значению. Для этого выражение, находящееся в (2.68) под знаком радикала, должно равняться 1. Как показал численный анализ, при реальных значениях K_ω (от 2 до 6) и коэффи-

циента K_0 (от 1,1 до 1,5) величина слагаемого P с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть принята равной 1 (максимальная погрешность достигает 12% при маловероятном сочетании значений $K_\omega = 2$ и $K_\omega = 1{,}5$). Это означает, что номинальной загрузке приводного электродвигателя соответствует равенство нулю сомножителя Q, т.е.

$$K_0^6 K_i^2 - 2K_0^4 K_i^2 + K_o^4 K_\omega^2 - 2K_0^2 K_\omega^4 + K_0^2 K_i^2 K_\omega^4 + K_\omega^2 = 0. \qquad (2.71)$$

При известном диапазоне изменения диаметра рулона K_ω, задавшись максимальной и номинальной скоростью электродвигателя (K_0), из (2.71) можно определить величину коэффициента K_i, которая обеспечит желаемую загрузку электродвигателя при использовании рассматриваемой системы управления.

В заключение следует отметить, что любой из пяти рассмотренных вариантов систем управления может быть использован при конструировании новых или реконструкции действующих электроприводов намоточно-размоточных механизмов полосового материала. Среди них, в первую очередь, моталки и разматыватели станов холодной прокатки и агрегатов непрерывной обработки полосового материала. Рекомендуется использовать в качестве приводных – асинхронных электродвигателей с питанием их от преобразователей частоты с векторным управлением или с системой прямого управления моментом электродвигателя. При этом выбор варианта системы управления должен определяться с учетом конкретных параметров механизма и желаемых энергетических показателей электромеханической системы.

Полученные соотношения позволяют определить основные параметры приводного электродвигателя для конкретного использования любого из рассмотренных вариантов систем управления. В случае применения зависимостей, полученных в разделах для модифицированных систем управления, обеспечивается некоторый запас по нагреву, так как не учтено время пауз на снятие смотанного рулона и заправку нового, а также благодаря неучтенной нелинейности магнитной системы электродвигателя.

2.4. КОМПЕНСАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА МОТАЛКИ

При косвенном регулировании натяжения полосы в процессе намотки рулона на барабан моталки точность поддержания натяжения в динамических режимах работы прокатного стана зависит от точности компенсации динамического момента в этих режимах. Это традиционно достигается изменением задания якорного тока системы регулирования на величину динамической составляющей в режимах ускорения или замедления стана.

Для моталок высокоскоростных непрерывных или дрессировочных станов холодной прокатки такая компенсация уже недостаточна, так как при этом не учитывается влияние всех составляющих динамического момента электропривода, действующих в процессе намотки рулона [54], [55].

Как известно, уравнение движения системы с переменной массой, отнесенное к валу, который вращается с угловой скоростью ω, имеет вид [56]:

$$M_Д - M_C = J\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2}\cdot\frac{dJ}{dt} = \frac{J}{R}\cdot\frac{dV}{dt} - \frac{JV}{R^2}\cdot\frac{dR}{dt} + \frac{\omega}{2}\cdot\frac{dJ}{dt}. \qquad (2.72)$$

Правая часть уравнения (2.72) представляет собой динамический момент электропривода. Первое слагаемое определяет составляющую динамического момента, связанную с изменением угловой скорости электропривода. Традиционно в схемах управления моталками проводилась компенсация только этой составляющей. Рассмотрим вторую составляющую.

Момент инерции безредукторного электропривода моталки может быть представлен суммой

$$J = J_Д + J_{МЕХ} + J_{РУЛ}, \qquad (2.73)$$

где $J_Д$, $J_{МЕХ}$ – моменты инерции электродвигателя и механизма моталки;

$$J_{РУЛ} = \frac{\pi b\gamma}{2}(R^4 - r^4) \qquad (2.74)$$

момент инерции рулона, в котором b – ширина полосы; γ – удельная плотность наматываемого материала; R, r – соответственно, радиус рулона и радиус барабана моталки.

Отметим, что составляющую динамического момента, связанную с производной момента инерции компенсировать не нужно, так как она компенсируется за счет кинетической энергии движущейся полосы, при ее намотке на барабан моталки [48].

Найдем производную радиуса рулона, продифференцировав преобразованное выражение (2.21), определяющее изменение диаметра во времени при намотке рулона:

$$R = r\sqrt{1+\frac{hVt}{\pi r^2}}, \qquad (2.75)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{hV}{2\pi R}. \qquad (2.76)$$

Подставим полученные выражения в правую часть (2.72), чтобы найти выражение для динамического момента электропривода моталки:

$$M_{ДИН} = (J_Д + J_{МЕХ} + J_{РУЛ})\frac{1}{R}\cdot\frac{dV}{dt} - (J_Д + J_{МЕХ} + J_{РУЛ})\frac{hV^2}{2\pi R^3}. \qquad (2.77)$$

Выражение (2.77) пригодно для вычисления динамического момента в режимах ускорения или замедления стана, а также при работе стана на постоянной скорости V. Два слагаемых в правой части (2.77) определяют две составляющих динамического момента электропривода моталки. Их физический смысл следующий:

– первая составляющая определяет величину и знак динамического момента, который необходим для изменения кинетической энергии электропривода, связанного с увеличением или уменьшением скорости прокатки. При постоянной скорости полосы она обращается в нуль;

– вторая составляющая определяет величину динамического момента, который необходим для уменьшения кинетической энергии электропривода при снижении угловой скорости вращения в процессе намотки полосы из-за увеличения диаметра рулона на барабане моталки.

Для обеспечения поддержания постоянства натяжения полосы в процессе намотки рулона необходимым условием является компенсация первых двух составляющих динамического момента (2.77).

Учитывая, что величина второй составляющей динамического момента пропорциональна второй степени величины линейной скорости движения наматываемой полосы, компенсация этой составляющей особенно актуальна для высокоскоростных прокатных станов. Для тихоходных агрегатов обработки полосы компенсацией этой составляющей можно пренебречь без особого ущерба для точности поддержания натяжения.

Компенсация динамического момента асинхронного электропривода моталки полосы

При применении моталки с приводным электродвигателем постоянного тока и регулированием скорости при увеличении радиуса рулона путем изменения потока возбуждения, компенсация динамического момента сводится к росту якорного тока электродвигателя на величину, которая может быть получена из (2.77)

$$I_{дин} = (J_c + J_v) \cdot \frac{I_н}{M_н} \left(\frac{R_m}{R^2} \cdot \frac{dV}{dt} - \frac{R_m h V^2}{2\pi R^3} \right), \qquad (2.78)$$

в котором $J_c = J_Д + J_{МЕХ}$ – сумма моментов инерции якоря электродвигателя, барабана моталки и элементов передачи; $J_v = J_{РУЛ}$ – переменная составляющая момента инерции электропривода, связанная с изменением момента инерции рулона; I_H и M_H – номинальные ток и момент электродвигателя; R_m – максимальный радиус рулона.

Компенсация динамического момента электропривода моталки при использовании приводного асинхронного электродвигателя с питанием от преобразователя частоты с векторным управлением имеет некоторые отличия.

В этом случае компенсация динамического момента производится путем изменения величины активной (моментообразующей) составляющей тока статора I_q с учетом того, какая система управления принята для регулирования координат электропривода [49], [51]. Для простоты далее рассматривается компенсация только первой составляющей динамического момента электропривода моталки.

Как видно из анализа вариантов систем управления, выполненного в разделе 2.3, в процессе роста момента электродвигателя при

намотке полосы одновременно может существовать только один из двух возможных режимов изменения параметров электропривода:

– увеличение активной составляющей тока пропорционально радиусу рулона при постоянной величине потокосцепления;

– увеличение потокосцепления (реактивной составляющей тока) пропорционально росту радиуса рулона при постоянной величине активной составляющей тока [57].

Для получения зависимостей, определяющих величину динамического тока асинхронного электродвигателя, введем обозначение коэффициента потокосцепления

$$K_{\varphi} = \frac{M_{н}}{I_{qн}} = \frac{M_{н}}{I_{н} \cdot \cos \varphi_{н}}, \qquad (2.79)$$

где $I_{н}$, $I_{qн}$ – номинальные значения тока статора и его активной составляющей.

Для случая, когда регулирование натяжения при намотке производится при постоянном потокосцеплении, величина активной составляющей тока статора для компенсации динамического момента электропривода может быть рассчитана по следующим зависимостям:

$$I_{sd1} = (J_{c} + J_{v}) \frac{1}{R \cdot k_{\varphi}} \cdot \frac{dV}{dt}, \qquad (2.80)$$

$$I_{sd1} = (J_{c} + J_{v}) \frac{1}{R k_{\varphi} \alpha} \frac{dV}{dt}. \qquad (2.81)$$

Формула (2.80) пригодна для случая, когда регулирование натяжения при намотке рулона производится при номинальном потокосцеплении, а формула (2.81) – для случая, когда при регулировании значение потокосцепления постоянно, но меньше номинального в α раз, например, при двухдиапазонном регулировании.

Для случая, когда регулирование натяжения при намотке рулона осуществляется потокосцеплением при постоянной величине актив-

ной составляющей тока статора, динамическая составляющая этого тока рассчитывается по формуле

$$I_{sd2} = (J_c + J_v)\frac{R_m}{R^2 \cdot k_\varphi} \cdot \frac{dV}{dt}. \qquad (2.82)$$

Зависимости (2.80), (2.81) и (2.82) целесообразно использовать при разработке алгоритма компенсации динамического момента, особенно в системах с микропроцессорным управлением электроприводом моталки.

В качестве примера приведенные формулы использованы для расчета загрузки электродвигателя в режиме компенсации динамического момента электропривода моталки четырехклетевого стана холодной прокатки 1700.

Параметры стана: максимальная скорость 25 м/с; ускорение 2,5 м/с^2; максимальное натяжение полосы – 100 кН; ширина полосы 0,9 м–1,5 м; радиус барабана моталки 0,3 м; максимальный радиус рулона 1,1 м.

Для безредукторного привода моталки с такими параметрами может быть использован двухдвигательный электропривод с асинхронными двигателями. Параметры каждого из них 2000 кВт, 333 об/мин, J = 871 кгм^2. Номинальный момент одного электродвигателя 57,4 кНм, что позволяет применить однозонную систему управления с регулированием скорости посредством изменения потокосцепления.

Результаты расчета величины активной составляющей тока электродвигателя для компенсации динамического момента при постоянной величине ускорения стана 2,5 м/с^2 и намотке полос разной ширины приведены на рис. 2.15.

Для сравнения на рис. 2.16 приведены кривые зависимости величины динамического тока для безредукторного электропривода той же моталки, но с приводным трехякорным электродвигателем постоянного тока с параметрами 3х1250 кВт, 210/800 об/мин, J= 3х5000 кгм^2.

Как видно из кривых, электропривод с асинхронными электродвигателями требует меньших затрат энергии для компенсации динамического момента благодаря лучшим динамическим характеристикам.

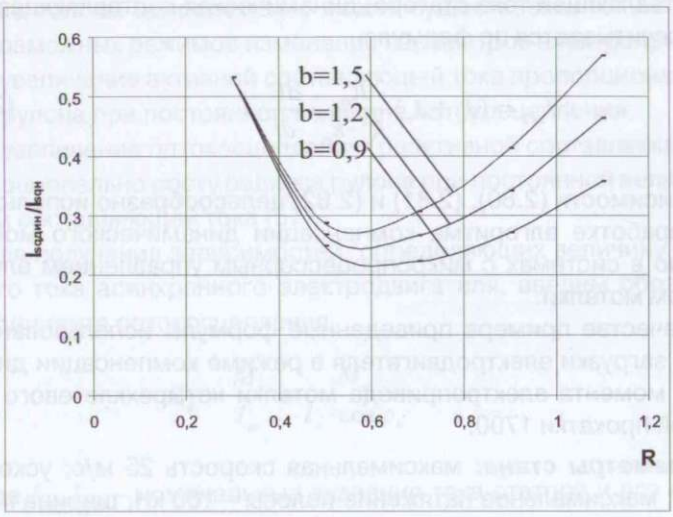


Рис. 2.15. Кривые зависимости динамического тока асинхронного электропривода моталки

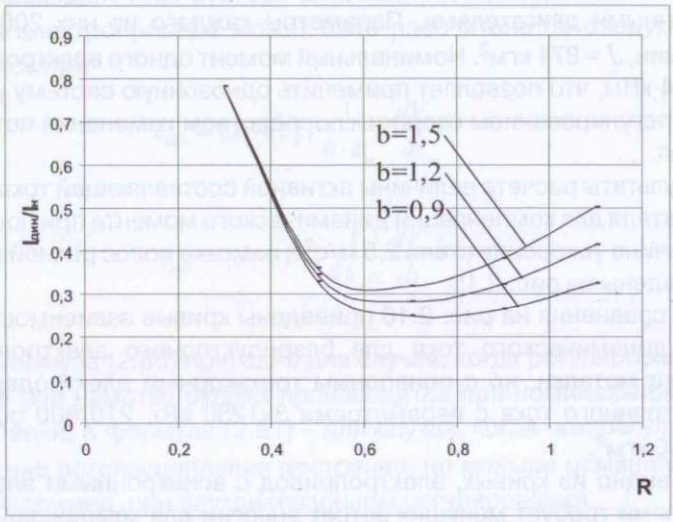


Рис. 2.16. Кривые зависимости динамического тока электропривода постоянного тока моталки

В заключение, на рис. 2.17 приведены зависимости полного тока асинхронного электродвигателя моталки от радиуса рулона при компенсации динамического момента в режиме ускорения стана. Кривые рассчитаны для условия, когда натяжение полосы максимально возможное ($I_q = I_{qн}$).

Эти зависимости позволяют оценить величину динамических нагрузок электродвигателей и возможности изменения динамических параметров стана, в частности целесообразность увеличения ускорения, которые при применении электропривода постоянного тока недостижимы.

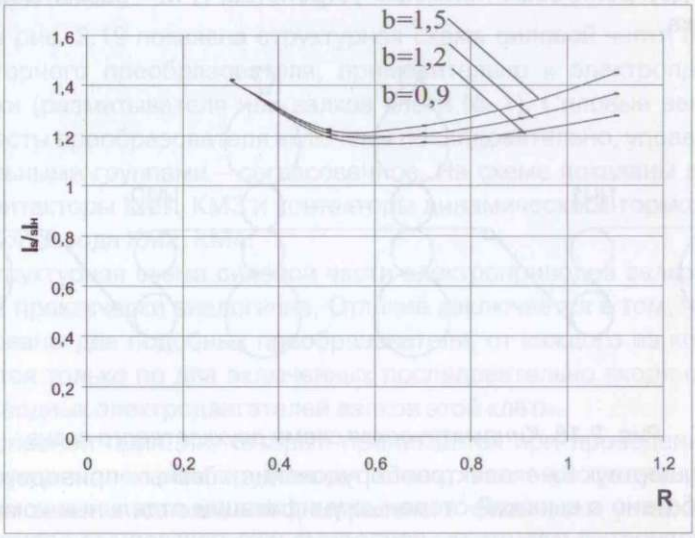


Рис. 2.17. Кривые зависимости полного тока асинхронного электропривода моталки

2.5. О РЕКОНСТРУКЦИИ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДВУХКЛЕТЕВОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Действующий высокоскоростной двухклетевой стан холодной прокатки предназначен для дрессировки (со скоростью до 40 м/с) или прокатки (со скоростью до 25 м/с) тонких и тончайших стальных полос в рулонах. Он оснащен уникальным электрооборудованием

главных электроприводов валков клетей, моталки и разматывателя: электродвигателями постоянного тока индивидуального исполнения и разработанными для их питания тиристорными преобразователями. Длительный, свыше 20 лет, срок эксплуатации стана и повышение требований к качеству динамических характеристик электроприводов в связи с возросшими требованиями к качеству прокатной продукции предопределяет проведение комплексной реконструкции электроприводов и систем автоматизации стана, с широким использованием микропроцессорной техники.

Кинематическая схема стана представлена на рис. 2.18, где обозначено: К1, К2 – прокатно-дрессировочные клети «кварто»; НУ1, НУ2 – двухроликовые натяжные устройства; Р, М – разматыватель и моталка.

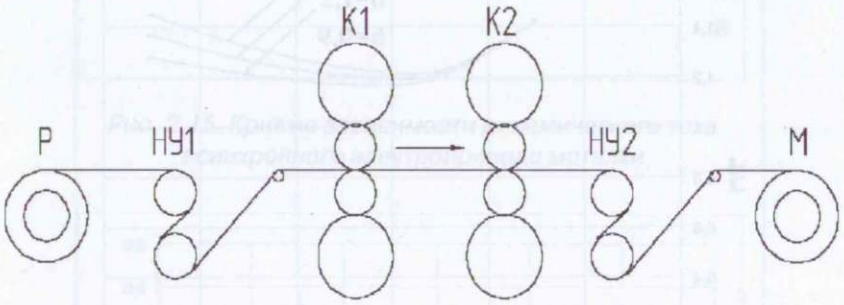


Рис. 2.18. Кинематическая схема двухклетевого стана

Существующее электрооборудование главных приводов стана разработано с высокой степенью унификации отдельных компонентов. Полностью идентичны приводные четырехякорные электродвигатели моталки и разматывателя (4х630 кВт, 4х1540 А, 440 В); для привода валков клети № 1 применены двухякорные электродвигатели, но с такими же якорями (2х630 кВт, 2х1540 А, 440 В); валки клети № 2 приводятся одинаковыми двухякорными электродвигателями (2х1000 кВт, 2х2460 А, 440 В). Для питания указанных электродвигателей применены 5 одинаковых тиристорных преобразователей (4000 А, 1050 В). Четыре якоря электродвигателя моталки и разматывателя соединены по два последовательно в две параллельные ветви и подключены к одному тиристорному преобразователю. Два якоря каждого электродвигателя валков клети № 1 соединены последова-

тельно и подключены параллельно к одному тиристорному преобразователю. Последовательно соединенные якори каждого электродвигателя валков клети № 2 подключены каждый к своему тиристорному преобразователю.

Специфической особенностью электроприводов стана является то, что каждый из вышеперечисленных тиристорных преобразователей питается от сети 10 кВ через свой силовой трансформатор. Он состоит из двух трехобмоточных активных частей со схемой соединения обмоток Y/ΔΔ, Y/ΔΔ, что обеспечивает питание двух комплектов 12-пульсных схем выпрямления с последовательным соединением сдвинутых по фазе на 30 электрических градусов выпрямительных мостов.

На рис. 2.19 показана структурная схема силовой части одного тиристорного преобразователя, применительно к электроприводу моталки (разматывателя или валков клети № 1). Силовые вентильные мосты преобразователя включены последовательно, управление вентильными группами – согласованное. На схеме показаны линейные контакторы КМ1, КМ3 и контакторы динамического торможения электропривода КМ2, КМ4.

Структурная схема силовой части электроприводов валков клети № 2 практически аналогична. Отличие заключается в том, что использованы два подобных преобразователя, от каждого из которых питаются только по два включенных последовательно якоря одного из приводных электродвигателей валков этой клети.

Основной принцип, который принимается при проведении реконструкции электрооборудования стана, является разумное сочетание замены изношенного, морально и физически устаревшего электрооборудования новым, имеющим высокие показатели надежности и качества, с обоснованным максимально возможным сохранением действующего оборудования, которое по своим техническим характеристикам допускает длительную дальнейшую эксплуатацию. Исходя из этого принципа, при реконструкции электрооборудования стана целесообразно сохранить действующие приводные электродвигатели, силовые трансформаторы и сглаживающие реакторы. Полностью заменяются тиристорные преобразователи с системами управления, а также изношенная силовая коммутационная и защитная аппаратура.

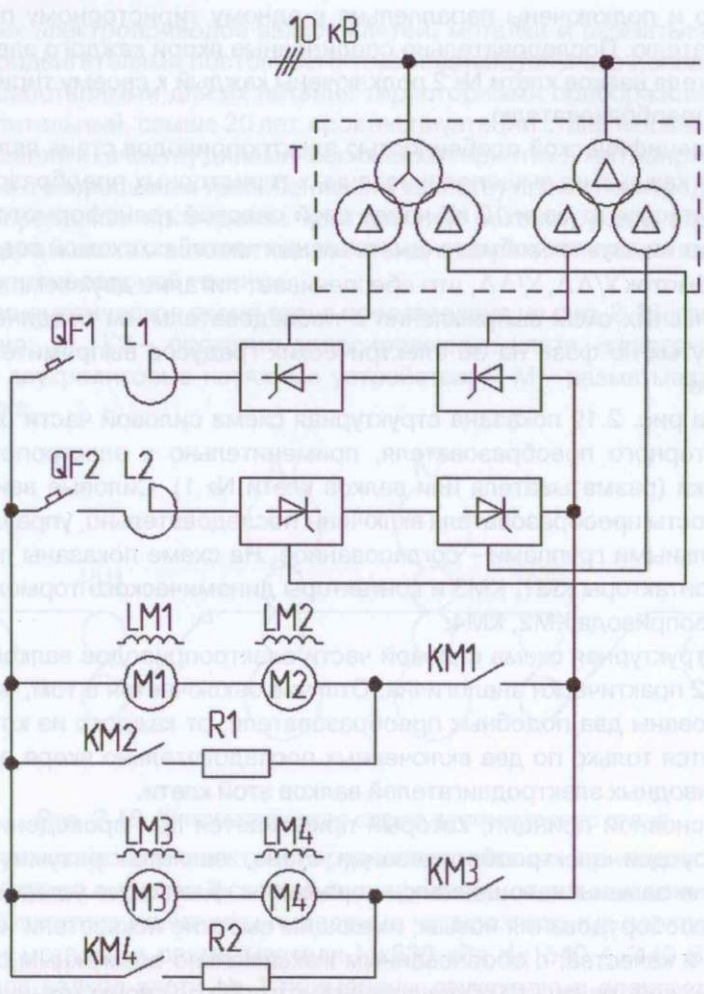


Рис. 2.19 Структура силовой части существующего электропривода моталки

При определении технических средств для выполнения реконструкции, с учетом вышеизложенного, рассмотрены два основных варианта, в основе которых, для примера, лежит применение технических средств иностранных и отечественных фирм:

1 – использование технических средств только фирмы SIEMENS;

2 – использование «гибридных» технических средств на базе силовой части тиристорных преобразователей отечественного производителя и микропроцессорной системы управления и регулирования фирмы SIEMENS.

В обоих вариантах отсутствует возможность полного сохранения принципиальной схемы силовой части тиристорного преобразователя с последовательным соединением выпрямительных мостов, показанной на рис. 2.20. Это обусловлено тем, что преобразователи и системы управления фирмы SIEMENS не могут функционировать при последовательном соединении выпрямительных мостов силовой схемы. Поэтому для сохранения питания электродвигателей в основном рабочем режиме от 12-пульсной схемы выпрямления, вместо последовательного соединения выпрямительных мостов предложено их параллельное соединение. Это приводит к необходимости существенного изменения всей силовой части схемы электропривода.

Из структурной схемы электропривода моталки, приведенной на рис. 2.20, видно, что для питания каждой пары включенных параллельно якорей электродвигателя используется отдельный несимметричный тиристорный преобразователь. Он имеет 12-пульсную схему для основного рабочего режима и 6-пульсную – для режима возможного редкого реверса. Каждый преобразователь построен по параллельной схеме и состоит из двух типовых тиристорных преобразователей, представляющих собой серийные устройства – четырехквадрантное и двухквадрантное (±3000 А, 440 В и 3000 А, 440 В). В схеме сохранен существующий силовой трансформатор и два существующих сглаживающих реактора L1 и L2, а два реактора L2 и L4 – новые. Для коммутации силовой цепи электродвигателя применены новые автоматические выключатели на стороне выпрямленного тока, и силовые контакторы – линейные и динамического торможения.

Предлагаемая схема обеспечивает загрузку существующего силового трансформатора в рабочем режиме на уровне не более 50%. Это будет способствовать продлению срока его службы. Использованные в схеме преобразователи обеспечивают допустимую высокую рабочую перегрузку электродвигателей (до 280% номинального тока в течение 10 с в 15-минутном цикле нагрузки).

Выравнивание токов нагрузки параллельно включенных якорей электродвигателя производится воздействием на токи возбуждения. Схемы силовых цепей электроприводов разматывателя и валков

клети № 1 полностью идентичны схеме рис. 2.17. Якори приводных электродвигателей валков клети № 2 подключены индивидуально к четырем таким же преобразователям, какие показаны на рис. 2.17, т.е. из схемы рис. 2.7 следует исключить якори М2 и М4.

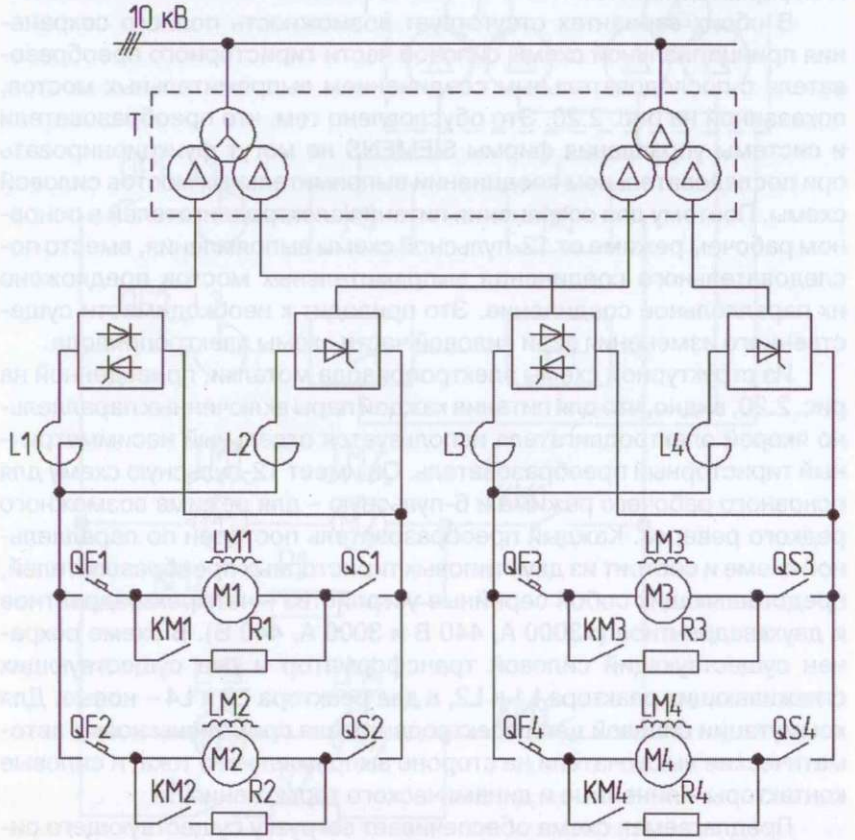


Рис. 2.20. Реконструированная силовая схема электропривода моталки

Таким образом, для питания электродвигателей всех главных приводов стана удалось обосновать использование 10 штук абсолютно одинаковых тиристорных преобразователей (6000/3000 А, 440 В).

Индивидуальная защита якорных цепей электродвигателей выполнена при помощи быстродействующих автоматических выключа-

телей. Для двухполюсного отключения якорей использованы силовые рубильники. Программное обеспечение системы управления обеспечивает качественное цифровое регулирование основных координат электроприводов.

Структурная схема электропривода моталки для варианта 2 приведена на рис. 2.21, на котором СМ1–СМ4 – микропроцессорные модули управления фирмы SIEMENS.

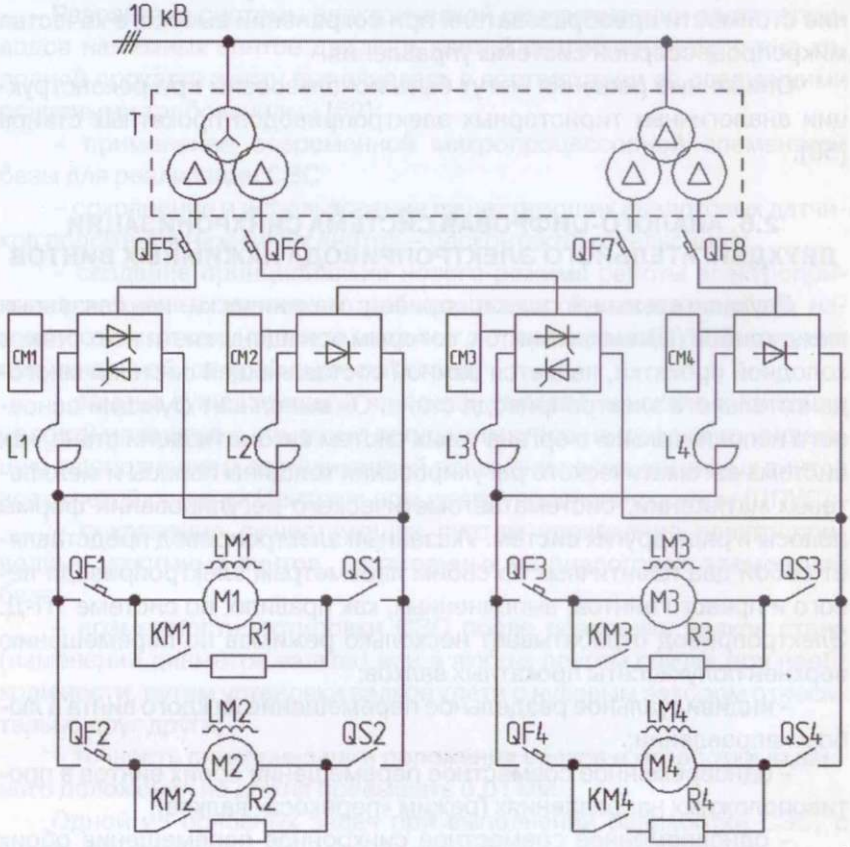


Рис. 2.21. Структурная схема электропривода моталки для варианта 2

Как видно из рис. 2.21, схема якорных цепей электродвигателя идентична схеме варианта 1, с параллельным соединением якорей. Подключение преобразователя к высоковольтной сети 10 кВ и его силовая схема также идентичны варианту 1. Основное отличие варианта 2 заключается в том, что вместо тиристорных устройств фирмы SIEMENS использованы преобразователи (1600 А, 440 В) отечественного производства, а модули управления и регулирования СМ – фирмы SIEMENS. Это обеспечивает существенное снижение стоимости преобразователя при сохранении высокого качества микропроцессорной системы управления.

Описанные решения могут быть использованы при реконструкции аналогичных тиристорных электроприводов прокатных станов [58].

2.6. АНАЛОГО-ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАЖИМНЫХ ВИНТОВ

Двухдвигательный электропривод механически не связанных между собой нажимных винтов, которым оснащены клети всех станов холодной прокатки, является важной составляющей системы многодвигательного электропривода стана. Он выполняет функции основного исполнительного органа таких систем автоматизации стана, как система автоматического регулирования толщины полосы и межклетевых натяжений, система автоматического регулирования формы полосы и ряда других систем. Указанный электропривод представляет собой два идентичных по своим параметрам электропривода левого и правого винтов, выполненных, как правило, по системе ТП-Д. Электропривод отрабатывает несколько режимов по перемещению верхней полукассеты прокатных валков:

– индивидуальное раздельное перемещение каждого винта в любом направлении;

– одновременное совместное перемещение обоих винтов в противоположных направлениях (режим «перекоса» валков);

– одновременное совместное синхронное перемещение обоих винтов в одном направлении;

– одновременное совместное синхронное перемещение обоих винтов в одном направлении на повышенной скорости, при проведении технологической перевалки валков.

Синхронное перемещение винтов в двух последних из вышеперечисленных режимов должно обеспечиваться с сохранением ранее достигнутого в процессе работы стана рассогласования их взаимного положения, то есть при любом, наперед не заданном, их взаимном расположении.

Последнее требование выполняется посредством использования предлагаемой системы электрической синхронизации (СЭС) движения валов приводных электродвигателей.

Разработка системы электрической синхронизации электроприводов нажимных винтов для всех клетей шестиклетевого стана холодной прокатки жести выполнялась в соответствии со следующими основными требованиями [59]:

– применение современной микропроцессорной элементной базы для реализации СЭС

– сохранение и использование существующих аналоговых датчиков положения нажимных винтов – бесконтактных сельсинов;

– создание принципиально нового режима работы электроприводов нажимных винтов – отработка электроприводом любого нажимного винта каждой клети заданного оператором ЦПУС положения при начальной настройке клетей стана;

– замена существующей на постах управления стана индикации положения винтов с помощью продуктиметров на цифровую индикацию с дополнением ее индикацией положения всех нажимных винтов всех клетей стана на Центральном посту управления станом (ЦПУС);

– сохранение существующих систем управления электроприводами нажимных винтов, построенных на аналоговой элементной базе;

– возможность юстировки СЭС после перевалки валков стана (изменение диаметра валков) или в любом другом случае при необходимости, путем установки валков клети с нулевым зазором относительно друг друга;

– точность синхронизации положения валков и отработки заданного положения не дожна превышать 0,01 мм.

Одной из основных задач при выполнении разработки СЭС, с учетом вышеперечисленных требований, оказалась задача создания алгоритма определения положения нажимного винта по показаниям аналогового сельсина-датчика. Это осложнялось тем, что в современных микропроцессорных средствах управления и автоматизации, например в широко применяемых программируемых контроллерах,

стандартные средства преобразования аналогового сигнала положения ротора сельсина в цифровую величину, отсутствуют. Предусматривается использование только цифровых датчиков – импульсных или кодовых.

При разработке алгоритма использовано известное свойство сельсина – при наличии возбуждения на его однофазной обмотке ротора генерировать на обмотках статора, соединенных в звезду, напряжения, отличающиеся мгновенным значением:

$$U_{1c} = U_m \sin \omega t \cos \varphi , \tag{2.83}$$

$$U_{2c} = U_m \sin \omega t \cos(\varphi + \frac{2}{3}\pi) , \tag{2.84}$$

$$U_{3c} = U_m \sin \omega t \cos(\varphi + \frac{4}{3}\pi) ; \tag{2.85}$$

где φ – угол, определяющий положение ротора сельсина.

Так как нулевая точка звезды обмоток статора сельсина недоступна (вывод отсутствует), в СЭС использованы квазилинейные значения напряжений, представляющие собой их векторную сумму, а именно:

$$\overline{U}_{1-2} = \overline{U}_1 + \overline{U}_2 , \tag{2.86}$$

$$\overline{U}_{2-3} = \overline{U}_2 + \overline{U}_3 . \tag{2.87}$$

Эти напряжения определяются следующими выражениями:

$$U_{1-2c} = U_m \sin \omega t (\frac{1}{2}\cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin \varphi) ; \tag{2.88}$$

$$U_{2-3c} = U_m \sin \omega t \cos(-\varphi) . \tag{2.89}$$

Как видно из приведенных зависимостей (2.88) и (2.89), выполнив измерение мгновенных значений напряжений $U_{1\text{-}2c}$ и $U_{2\text{-}3c}$ в любой момент времени и взяв их отношение, можно получить выражение

для определения угла положения ротора сельсина φ, а тем самым, и положения нажимного винта.

$$\varphi = arctg \frac{2U_{1-2c} + U_{2-3c}}{\sqrt{3}U_{2-3c}}. \qquad (2.90)$$

Выражение (2.90) позволяет определить искомый угол, независимо от величины и фазы питающего обмотку возбуждения ротора сельсина напряжения.

Полученная зависимость (2.90) и использована в качестве алгоритма для определения текущего положения каждого нажимного винта. Знание положения винта необходимо как при установке валков в заданное положение при начальной настройке стана, так и для формирования в СЭС сигнала корректировки задания скорости электроприводам нажимных винтов для синхронизации их движения при совместном перемещении.

Для минимизации погрешности вычисления положения нажимного винта с применением предложенного алгоритма цифровая СЭС должна быть оснащена быстродействующими аналого-цифровыми преобразователями. Это не позволяет использовать в качестве технических средств СЭС любую микропроцессорную технику, например, обычные программируемые контроллеры. Рассматриваемая СЭС реализована на базе PC-контроллеров (PC-based controller), по одному на каждую клеть, с общим компьютером, установленным на ЦПУС.

Таким образом, СЭС одной клети представляет собой промышленный PC-контроллер на основе промышленной платы семейства xx386, без дисплея и без клавиатуры, но с соответствующими каналами ввода-вывода дискретной и аналоговой информации. Она включает цифровые однострочные светодиодные индикаторы (высота цифр – 24 мм), установленные на постах управления стана на клетях.

Связь между PC-контроллерами и компьютером ЦПУС осуществляется при помощи быстродействующей локальной сети, а связь между PC-контроллером и индикаторами, установленными на постах управления стана, также по сети через интерфейс RS485.

С помощью разработанной СЭС удалось обеспечить требуемую точность электрической синхронизации электроприводов нажимных винтов для всех шести клетей прокатного стана.

2.7. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАЖИМНЫХ ВИНТОВ

Режим совместного позиционирования электроприводов нажимных винтов клети стана холодной прокатки при установке валков в заданное положение используется значительно чаще, чем рассмотренный ранее в разделе 1.7 режим позиционирования механизма перемещения ножей дисковых ножниц для обрезки кромок полосы на агрегате обработки. Позиционирование нажимных винтов производится при перестройке прокатного стана на получение нового сортамента листа, а также после любой смены (перевалки) рабочих или опорных валков при их установке в рабочее положение. В этом режиме электропривод работает с системой автоматического регулирования положения с обратной связью от датчиков положения винтов, потребляя определенное количество энергии из питающей сети.

Известен [60] такой способ управления электроприводом в режиме позиционирования, при котором количество энергии, потребляемое из сети, минимально. Предложенный способ универсален и может быть широко использован для управления режимом позиционирования электроприводов механизмов различного назначения.

Сущность способа управления заключается в том, что производится измерение фактического положения механизма и величины рассогласования по пути. В зависимости от величины и знака этого рассогласования производится управление скоростью движения механизма таким образом, чтобы величины ускорения и скорости электропривода не превышали максимально допустимых значений, а в момент остановки рассогласование по пути было равно нулю. При этом скорость механизма во время разгона и торможения электропривода должна изменяться по закону

$$V = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{a_0}{S_P} \left[S_P (\Delta S - S_y) - (\Delta S - S_y)^2 \right]}, \qquad (2.91)$$

где S_P – расчетное значение перемещения, определяемое соотношением

$$S_P = \begin{cases} S_3, \text{ если } S_3 < S_0 \\ S_0, \text{ если } S_3 > S_0 \end{cases}, \qquad (2.92)$$

S_y – величина перемещения электропривода с постоянной скоростью V_0; ΔS_P – рассогласование по пути между заданным S_3 и фактическим положением механизма

$$\Delta S = S_3 - S_\Phi \tag{2.93}$$

Величина S_y определяется следующим выражением

$$S_y = \begin{cases} 0, \text{ если } S_3 < S_0 \text{ или } \Delta S < \dfrac{S_0}{2}; \\ S_3 - S_0, \text{ если } S_3 > S_0. \end{cases} \tag{2.94}$$

В (2.94) S_0 – величина перемещения, при котором скорость электропривода достигает максимального значения V_0, равная

$$S_0 = \frac{8}{3} \cdot \frac{V_0^2}{a_0}; \tag{2.95}$$

В приведенных формулах a_0 – максимальное ускорение электропривода во время разгона или торможения.

При использовании предлагаемого способа управления позиционированием электропривода во время разгона и торможения его скорость изменяется по закону, близкому к параболическому, что обеспечивает минимум потерь энергии в силовой цепи электропривода.

Функциональная схема позиционного электропривода переменного тока, выполненного по системе ПЧ-АД, показана на рис. 2.22. На рис. 2.23 приведены кривые изменения скорости механизма в соответствии с вышеприведенными выражениями (2.91)–(2.95).

В схеме на рис. 2.22 обозначено: М – приводной асинхронный электродвигатель; ПЧ – преобразователь частоты; СУ – система управления преобразователя частоты; РТ1 – регулятор активной составляющей тока статора I_q; РСП, РСИ – пропорциональный и интегральный регуляторы частоты вращения; К – управляемый ключ; КП – компаратор; БИ – блок интегрирования; БЗП – блок задания перемещения; ФП – функциональный преобразователь; ДС – датчик скорости.

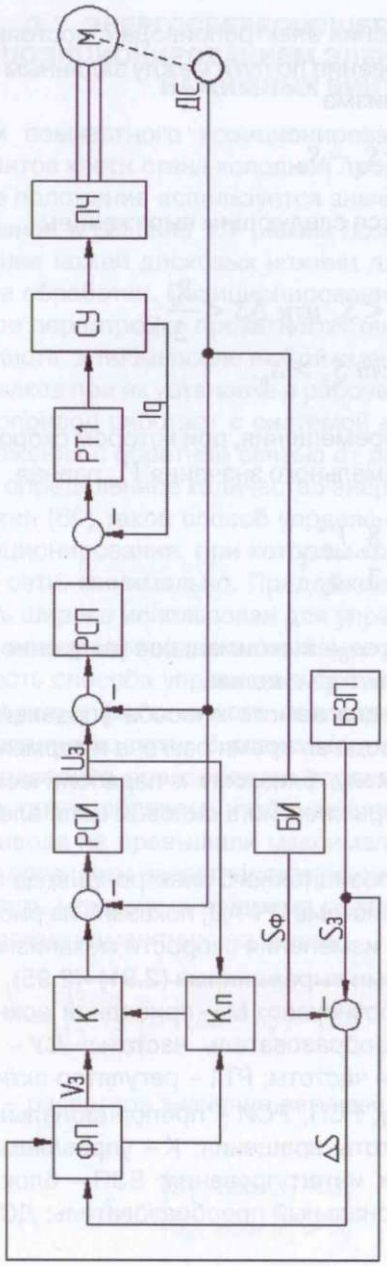


Рис. 2.22. Функциональная схема управления позиционным электроприводом переменного тока

Структурная схема рис. 2.22 представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования электропривода, построенную в соответствии с принципами подчиненного регулирования. В систему входят контур регулирования активной составляющей тока статора электродвигателя с регулятором РТ1, первый контур регулирования скорости с пропорциональным РС, второй контур регулирования скорости с интегральным РС и контур регулирования положения с регулятором на базе функционального преобразователя ФП, компаратора КП и ключа К.

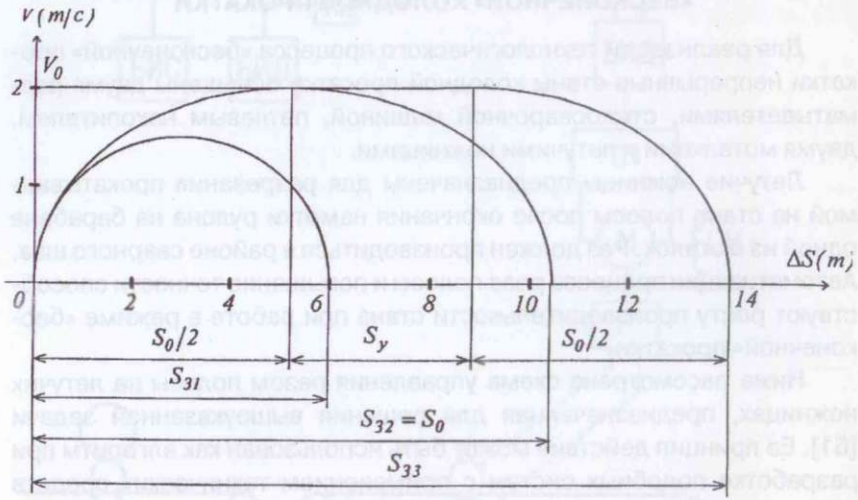


Рис. 2.23. Кривые изменения скорости позиционного электропривода

В качестве датчика положения используется блок интегрирования БИ, на вход которого подается сигнал от датчика скорости ДС. Нужно отметить, что для получения высокой точности позиционирования вместо блока БИ и ДС следует использовать непосредственное измерение положения с помощью цифрового датчика положения.

Для пояснения работы схемы рис. 2.19 отметим, что при поступлении на вход функционального преобразователя ФП сигнала рассогласования ΔS, при наличии задания на отработку перемещения S_3, на выходе ФП формируется сигнал задания скорости электропривода в соответствии с вышеприведенными формулами (2.91)–(2.95).

Компаратор КП формирует сигнал открытия ключа К, когда величина $\Delta S > V_3$.

В результате применения описанной схемы управления позиционированием удается уменьшить потери энергии в силовой цепи электропривода, что позволяет снизить установленную мощность и стоимость приводного электродвигателя и остальных элементов силовой части схемы.

2.8. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ СТАНА «БЕСКОНЕЧНОЙ» ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Для реализации технологического процесса «бесконечной» прокатки непрерывные станы холодной прокатки оснащены двумя разматывателями, стыкосварочной машиной, петлевым накопителем, двумя моталками и летучими ножницами.

Летучие ножницы предназначены для разрезания прокатываемой на стане полосы после окончания намотки рулона на барабане одной из моталок. Рез должен производиться в районе сварного шва. Автоматизация процесса реза полосы и повышение точности способствуют росту производительности стана при работе в режиме «бесконечной» прокатки.

Ниже рассмотрена схема управления резом полосы на летучих ножницах, предназначенная для решения вышеуказанной задачи [61]. Ее принцип действия может быть использован как алгоритм при разработке подобных систем с применением технических средств программируемой микропроцессорной техники.

На рис. 2.24 приведена функциональная и кинематическая схемы электропривода. Показаны последняя клеть прокатного стана, натяжное устройство за клетью НУ, летучие ножницы ЛН с барабанами разного диаметра, которые приводятся во вращение через общий редуктор и моталка полосы. В схему управления входят приводной электродвигатель М летучих ножниц, подключенный к тиристорному преобразователю ТП, система автоматического регулирования скорости электропривода, кнопка КУ ручного пуска ножниц, блок сравнения сигналов БС, триггер Т, ключи К1 и К2, устройство слежения за сварным швом УССШ, блок формирования сигнала автоматического включения ножниц БФС, блок измерения скорости полосы БИС и блок измерения длины полосы БИД.

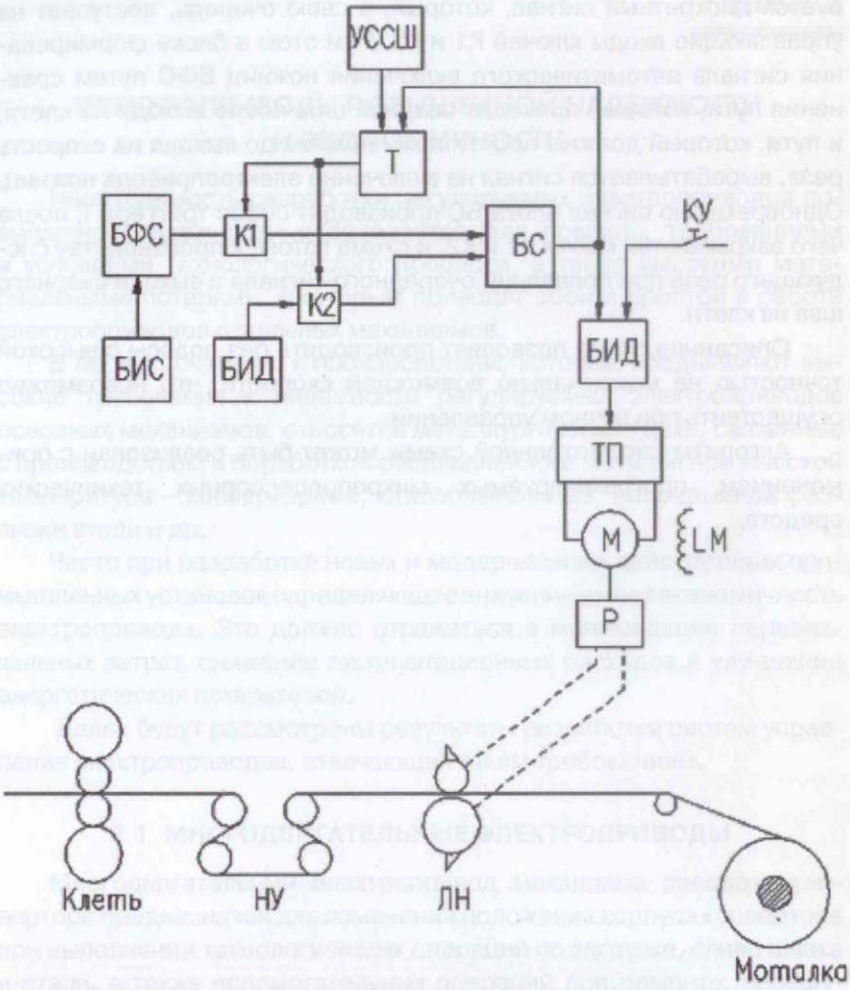


Рис. 2.24 Функционально-кинематическая схема системы управления электроприводом летучих ножниц

Схема рис. 2.24 работает следующим образом. В момент выхода сварного шва из последней клети стана на выходе устройства УССШ появляется сигнал прохождения сварного шва, который поступает на первый вход триггера Т. В результате на выходе триггера форми-

руется дискретный сигнал, который, в свою очередь, поступает на управляющие входы ключей К1 и К2. При этом в блоке формирования сигнала автоматического включения ножниц БФС путем сравнения пути, который проходит сварной шов после выхода из клети, и пути, который должны пройти ножи ножниц до выхода на скорость реза, вырабатывается сигнал на включение электропривода ножниц. Одновременно сигнал блока БС производит сброс триггера Т, после чего закрываются ключи К1 и К2, и схема готова к производству следующего реза при появлении очередного сигнала о выходе сварного шва из клети.

Описанная схема позволяет производить рез полосы с высокой точностью на максимально возможной скорости, что невозможно осуществить при ручном управлении.

Алгоритм рассмотренной схемы может быть реализован с применением программируемых микропроцессорных технических средств.

Глава 3

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ

Необходимость разработки регулируемых электроприводов повышенной надежности определяется, как правило, требованиями и условиями технологического процесса, а также высокими материальными потерями, к которым приводят сбои и простои в работе электроприводов отдельных механизмов.

В первую очередь, к производствам, которые предъявляют высокие требования к надежности регулируемых электроприводов основных механизмов, относятся металлургические цеха, связанные с производством и обработкой расплавленного металла при высокой температуре – конверторные, сталеплавильные, непрерывной разливки стали и др.

Часто при разработке новых и модернизации действующих промышленных установок определяющее значение имеет экономичность электропривода. Это должно отражаться в минимизации первоначальных затрат, снижении эксплуатационных расходов и улучшении энергетических показателей.

Далее будут рассмотрены результаты разработки систем управления электроприводов, отвечающих таким требованиям.

3.1. МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Многодвигательный электропривод механизма поворота конвертора предназначен для изменения положения корпуса конвертора при выполнении технологических операций по загрузке, сливе шлака и стали, а также вспомогательных операций при ремонте, перефутеровке и т.п. Приводные электродвигатели, количество которых от четырех до двенадцати определяется рабочей емкостью конвертора и требуемым запасом мощности, через индивидуальные редукторы приводят во вращение одну или две общих шестерен-колес, связанных с корпусом конвертора.

К системе управления электроприводом конвертора предъявляются такие требования, как поддержание заданной скорости движе-

ния корпуса конвертора. Для получения высокой надежности требуется обеспечение равномерного распределения нагрузки между всеми работающими электродвигателями, в том числе и при выходе из строя одного или более электродвигателей [62]. Так, четырехдвигательный электропривод механизма поворота конвертора емкостью 130 или 160 тонн стали должен обеспечить нормальную работу конвертора до перефутеровки (30–40 плавок) при выходе из строя одного электропривода, а при выходе из строя двух любых электроприводов – доведение до конца рабочего цикла текущей плавки [62]. Это требование не позволяет использовать известную структуру многодвигательного электропривода: один ведущий – остальные ведомые, которая становится неработоспособной с точки зрения распределения нагрузок при выходе из строя одного – ведущего электродвигателя.

Функциональная схема управления многодвигательным регулируемым электроприводом постоянного тока, которая обеспечивает вышеописанные требования надежности и долговечности приведена на рис. 3.1.

Как видно из схемы рис. 3.1, четыре приводных электродвигателя М получают питание от индивидуальных тиристорных преобразователей ТП, что является принципиальным при построении системы управления повышенной надежности. Каждый индивидуальный электропривод управляется двухконтурной системой подчиненного регулирования, в состав которой входят регуляторы тока РТ и скорости РС, датчики тока ДТ и индивидуальные датчики скорости ДС.

Общим для всех указанных систем автоматического регулирования является задатчик скорости механизма поворота ЗС. Для выравнивания токов нагрузки электроприводов используются четыре регулятора выравнивания нагрузки РВН, которые включены по кольцевой схеме. Таким образом, вместо системы «ведущий»–«ведомые» предлагается схема кольцевого выравнивания токов нагрузки [63], которая при появлении разности токов нагрузки любой пары приводных электродвигателей производит соответствующую корректировку задания скорости всех четырех электродвигателей до тех пор, пока не произойдет их выравнивание.

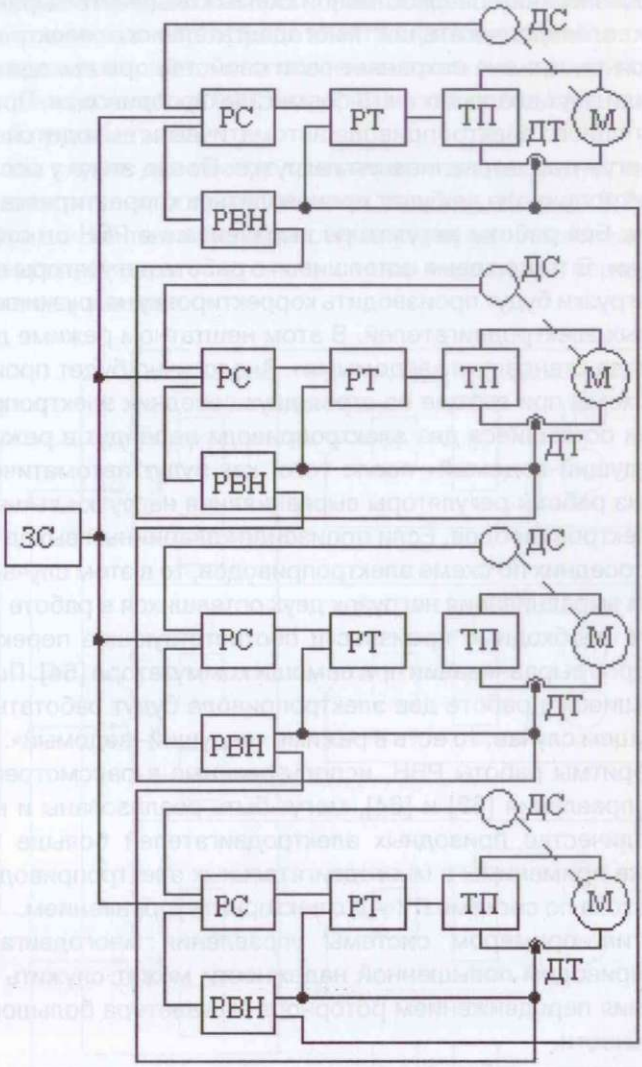


Рис. 3.1. Функциональная схема системы управления четырехдвигательным электроприводом механизма поворота конвертора

К достоинствам разработанной схемы кольцевого выравнивания нагрузок электродвигателей многодвигательного электропривода относится то, что она сохраняет свои свойства при выходе из строя одного или двух входящих в его состав электроприводов. При выходе из строя одного электропривода автоматически выводится из работы его регулятор выравнивания нагрузки. После этого у соседнего с ним электропривода не будет производиться корректировка задания скорости. Без работы регулятора выравнивания РВН он становится «ведущим». В то же время оставшиеся в работе регуляторы выравнивания нагрузки будут производить корректировку нагрузки остальных приводных электродвигателей. В этом нештатном режиме два электропривода становятся «ведомыми». Аналогично будет происходить работа схемы при выходе из строя двух соседних электроприводов. При этом оставшиеся два электропривода перейдут в режим работы – «ведущий-ведомый» после того, как будут автоматически выведены из работы регуляторы выравнивания нагрузки вышедших из строя электроприводов. Если произойдет аварийный выход из строя двух не соседних по схеме электроприводов, то в этом случае для сохранения выравнивания нагрузок двух оставшихся в работе электроприводов необходимо произвести соответствующее переключение регуляторов выравнивания при помощи коммутатора [64]. После этого оставшиеся в работе два электропривода будут работать, как и в предыдущем случае, то есть в режиме «ведущий–ведомый».

Алгоритмы работы РВН, использованные в рассмотренных системах управления [63] и [64], могут быть реализованы и в случае, когда количество приводных электродвигателей больше четырех. Они также применимы в многодвигательных электроприводах переменного тока по системе ПЧ-АД с векторным управлением.

Другим примером системы управления многодвигательным электроприводом повышенной надежности может служить система управления передвижением роторного экскаватора большой производительности.

Механизм передвижения состоит из нескольких тележек, каждая из которых может приводиться в движение несколькими электродвигателями. Тележки в режиме передвижения экскаватора работают независимо друг от друга, поэтому нагрузки электродвигателей имеют произвольный характер. Следствием этого при определенном

профиле местности, по которой происходит передвижение, может возникнуть высокая перегрузка электропривода одной из тележек. Она приведет к аварийному отключению этого электропривода из-за того, что данная тележка, например, не может преодолеть возникшее перед ней препятствие.

В этом случае для преодоления препятствия следует использовать мощности электроприводов всех тележек. На рис. 3.2, [65] показана функциональная схема системы управления многодвигательным электроприводом постоянного тока механизма передвижения роторного экскаватора.

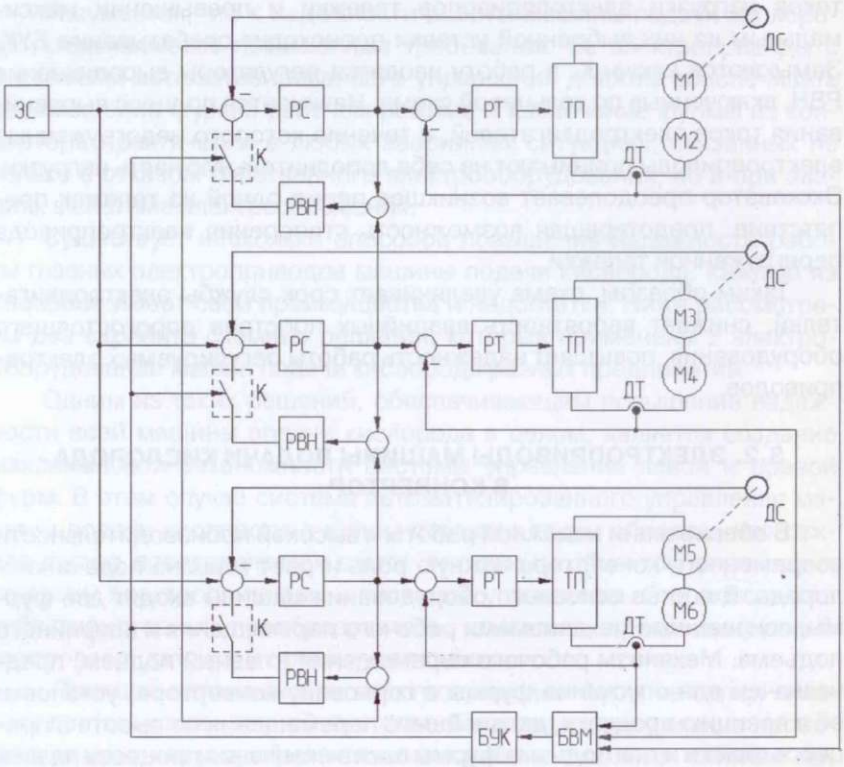


Рис. 3.2. Функциональная схема системы управления электроприводом механизма передвижения роторного экскаватора

На схеме обозначено: М – приводные электродвигатели тележек роторного экскаватора; ТП – тиристорные преобразователи; ДТ, ДС – датчики тока и частоты вращения электроприводов; РТ, РС – регуляторы тока и частоты вращения; ЗС – общий задатчик скорости; РВН – регуляторы выравнивания нагрузки электроприводов; К – управляемые ключи; БУК – блок управления ключами К; БВМ – блок выделения максимального сигнала.

Работа схемы происходит следующим образом. На входы блока выделения максимального сигнала БВМ подключены выходы датчиков тока ДТ всех электроприводов. Выход блока БВМ соединен с управляющими входами блока ключей БУК. При неравномерности токов нагрузки электроприводов тележки и превышении максимальным из них выбранной уставки происходит срабатывание БУК. Замыкаются ключи К, в работу вводятся регуляторы выравнивания РВН, включенные по кольцевой схеме. Начинается процесс выравнивания токов электродвигателей, в течение которого недогруженные электроприводы принимают на себя дополнительную часть нагрузки. Экскаватор преодолевает возникшее перед одной из тележек препятствие, предотвращая возможность стопорения электропривода перегруженной тележки.

Таким образом, схема увеличивает срок службы электродвигателей, снижает вероятность аварийных простоев дорогостоящего оборудования, повышает надежность работы регулируемых электроприводов.

3.2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МАШИНЫ ПОДАЧИ КИСЛОРОДА В КОНВЕРТОР

В обеспечении надежной работы и высокой производительности современного конвертора важную роль играет машина подачи кислорода. В состав основного оборудования машины входят две фурмы, оснащенные механизмами рабочего перемещения и аварийного подъема. Механизм рабочего перемещения (главный подъем) предназначен для опускания фурмы в горловину конвертора, установки её в позицию продувки, дальнейшего перемещения по высоте в процессе плавки и для подъема фурмы после окончания процесса плавки стали. Механизм аварийного подъема служит для подъема фурмы из горловины конвертора в случае выхода из строя рабочего механизма перемещения и при других нештатных ситуациях, например, отключении электроснабжения.

Кроме вышеизложенного, для более полного представления о данном механизме, следует отметить, что схема пути передвижения фурм машины подачи кислорода, конструкции ОАО «АЗОВМАШ», для обеспечения надежности имеет Y-образную форму. То есть, путь рабочего перемещения левой и правой фурм частично общий, и только в верхней части пути фурмы расходятся в разные стороны, каждая по своей направляющей. Отсюда следует одно из главных условий построения любой системы управления электроприводами данного механизма: в работе может находиться только одна фурма, вторая фурма должна быть в крайнем верхнем положении на своей направляющей, в так называемом положении замены.

Разумеется, что к надёжности работы машины подачи кислорода предъявляются повышенные требования. Ее электроприводы с системами автоматизированного управления должны обеспечивать перемещение фурм в рабочем режиме и извлечение фурмы из конвертора практически в любых аварийных ситуациях, связанных не только с отказом собственного электрооборудования, но и при авариях в системе электроснабжения.

Существует несколько способов повышения надежности работы главных электроприводов машины подачи кислорода. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Ниже рассмотрены два варианта схемных решений, которые применены в электрооборудовании машин подачи кислорода разных предприятий

Одним из таких решений, обеспечивающим повышение надежности всей машины подачи кислорода в целом, является создание максимальной автономности системы управления левой и правой фурм. В этом случае система автоматизированного управления машины подачи кислорода в целом строится таким образом, что каждая фурма представляется самостоятельным объектом управления со своим электроприводом и системой управления. Они включают в себя тиристорный преобразователь, двигатель, программируемый контроллер, датчики и органы управления.

Принцип автономности электроприводов фурм является главным достоинством данной системы. Благодаря этому можно проводить ремонтные и профилактические работы с полным снятием напряжения на электрооборудовании одной из фурм, оставляя вторую в работе. Это является весомым плюсом с точки зрения обслуживания. Также к положительным качествам данной системы можно отнести относительную простоту схем электропривода, которые не перегру-

жены различными дополнительными перекрестными переключающими связями и аппаратурой.

В то же время, автономность, как неоспоримое преимущество данной системы, в некоторых случаях может стать недостатком. В процессе эксплуатации иногда возникают ситуации, когда одна из фурм не готова к работе из-за неисправности одного из элементов электропривода, например, тиристорного преобразователя или программируемого контроллера. При этом вторая фурма может оказаться неработоспособной по причине неисправности механического оборудования или системы подачи энергоносителей. Такая ситуация приводит к тому, что парализуется работа всей машины подачи кислорода и, как следствие, работа конвертора.

Функциональная схема электроприводов машины подачи кислорода с использованием описанного принципа показана на рис. 3.3, применительно к электроприводам постоянного тока.

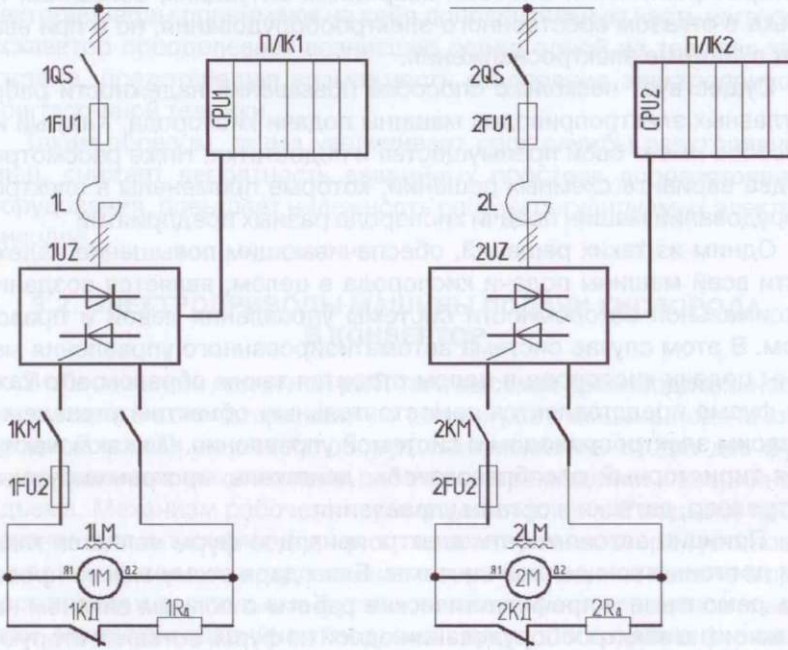


Рис. 3.3. Функциональная схема электроприводов машины подачи кислорода

На схеме рис. 3.3 обозначено: 1QS, 2QS – рубильники; 1FU1, 1FU2 – быстродействующие предохранители, встроенные в рубильники; L – коммутационные реакторы; 1UZ1, 1UZ2 – реверсивные тиристорные преобразователи; 1KM, 2KM, 1КД, 2КД – контакторы; 1FU2, 2FU2 – предохранители; 1M, 2M – приводные электродвигатели; 1Rд, 2Rд – резисторы динамического торможения; ПЛК1, ПЛК2 – программируемые логические контроллеры системы управления.

Второе системное решение, которое исключает возникновение ситуации, описанной выше, заключается в ином подходе к построению системы автоматизированного управления электроприводами фурм. В этом случае, за основу построения системы принимается не только принцип автономности электроприводов и системы автоматизированного управления фурм, как основополагающий, но и принцип максимальной гибкости системы управления.

Добиться гибкости системы возможно благодаря применению взаимного резервирования как электроприводов, так и процессорной части программируемого контроллера. Силовая часть электропривода всей машины подачи кислорода в этом случае строится таким образом, что электродвигатель каждой из фурм может питаться от любого тиристорного преобразователя. Схема позволяет подключить любой тиристорный преобразователь к любому электродвигателю. Управление тиристорными преобразователями, диагностика электрооборудования и визуализация управления осуществляются при помощи одного программируемого контроллера, но с резервируемым процессорным модулем.

Такой подход к построению общей системы управления обеспечивает взаимное резервирование и гибкость системы, снижает вероятность простоев из-за выхода из строя дорогостоящего оборудования. Ликвидируется вероятность аварийного простоя конвертора при возникновении ранее описанной ситуации, когда обе фурмы не готовы к работе из-за неисправности различного характера. В данной системе, по причине взаимного резервирования, в силовой части схемы электроприводов появляются дополнительные связи и силовые переключатели, часть из которых являются общими для обоих электроприводов. Это несколько усложняет саму схему и увеличивает количество коммутационной аппаратуры. Возможный выход из строя этих элементов парализует работу всей машины подачи кислорода. Все же, следует отметить, что надежность работы коммута-

ционной аппаратуры выше, чем тиристорных преобразователей. Это существенно сокращает время простоя оборудования в аварийной ситуации.

Функциональная схема электроприводов машины подачи кислорода с использованием второго принципа показана на рис. 3.4 применительно к электроприводам постоянного тока в трансформаторном варианте.

На схеме обозначено: 1QF, 2QF – автоматические выключатели; 1Т, 2Т – силовые трансформаторы; 1FU1, 1FU2 – быстродействующие предохранители, встроенные в рубильники 1QS, 2QS; 1KM1, 2KM1, 1KM2, 2KM2, 1КД, 2КД – контакторы; Р – силовой переключатель; 1М, 2М – приводные электродвигатели; 1Rд, 2Rд – резисторы динамического торможения; ПЛК – программируемый контроллер системы управления.

Переключение обмоток возбуждения электродвигателей выполняется аналогично переключению якорных цепей.

Таким образом, какой бы из рассмотренных принципов не был использован при построении системы, ни один из них не гарантирует абсолютно безотказную работу электрооборудования машины подачи кислорода. Как следствие, по тем или иным причинам, с большей или меньшей вероятностью, в любой момент может произойти аварийная остановка главных приводов.

Аварийная остановка главных приводов при нахождении фурмы внутри конвертора, когда идет процесс плавки металла, может привести к тяжелым последствиям с большими материальными затратами на восстановление. Поэтому каждая фурма, кроме главного привода подъема, оборудована индивидуальным автономным приводом аварийного подъема, на работу которого никак не влияет работоспособность электрооборудования основного рабочего электропривода. Приводы аварийного подъема бывают двух типов: электрические и пневматические. Основные принципы их создания – это простота, минимум коммутационной и другой аппаратуры и, как следствие, максимальная надежность работы.

Отметим, что по первому варианту построения системы управления, то есть с автономными электроприводами, были спроектированы, изготовлены и введены в действие четыре машины подачи кислорода конверторных цехов двух металлургических комбинатов [66].

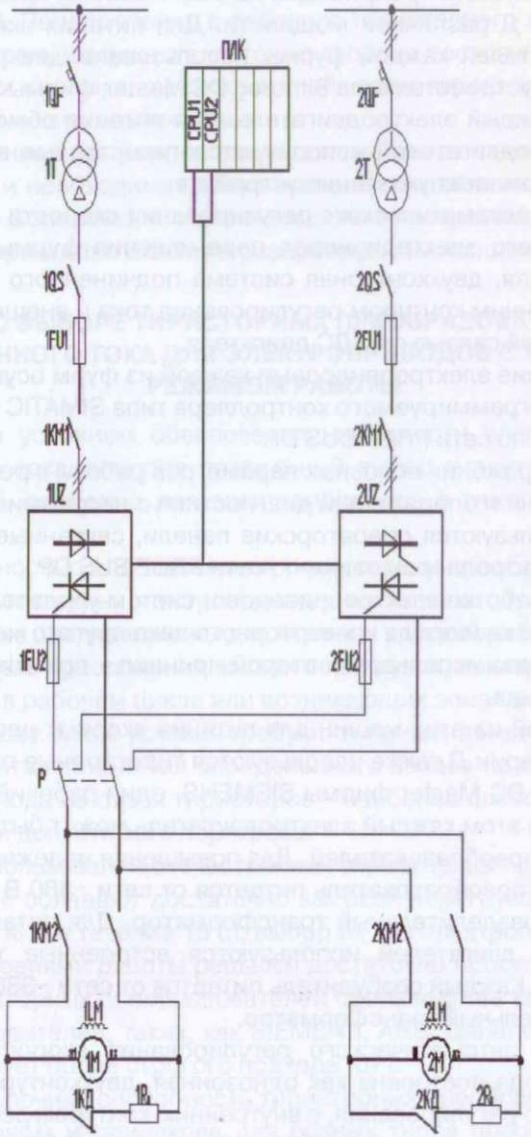


Рис. 3.4. Функциональная схема электроприводов машины подачи кислорода с взаимным резервированием

Для главных электроприводов на этих машинах применены двигатели серии Д различной мощности. Для питания якорных цепей электродвигателей каждой фурмы использованы два реверсивных тиристорных устройства типа Simoreg DC Master, фирмы SIEMENS, по одному на каждый электродвигатель. Для питания обмоток возбуждения электродвигателей используются тиристорные возбудители, входящие в комплект указанных устройств.

Система автоматического регулирования скорости электродвигателя рабочего электропривода перемещения фурмы построена, как однозонная, двухконтурная система подчиненного регулирования, с внутренним контуром регулирования тока и внешним – скорости, с обратной связью по ЭДС двигателя.

Управление электроприводами каждой из фурм осуществляется от своего программируемого контроллера типа SIMATIC S7-300 фирмы SIEMENS, по сети PROFIBUS DP.

Для отображения основных параметров работы в реальном масштабе времени и оперативной диагностики о нарушениях в работе и отказах используются операторские панели, связанные с программируемым контроллером также по сети PROFIBUS DP .

При разработке электроприводов и систем управления для двух машин подачи кислорода конверторного цеха другого металлургического комбината использован второй принцип – принцип взаимного резервирования.

На каждой из этих машин для питания якорных цепей электродвигателей серии Д также используются тиристорные преобразователи Simoreg DC Master фирмы SIEMENS, один рабочий, другой резервный. При этом каждый электродвигатель может быть подключен к любому из преобразователей. Для повышения надежности каждый тиристорный преобразователь питается от сети ~380 В через индивидуальный разделительный трансформатор. Для питания обмоток возбуждения двигателей используются встроенные тиристорные возбудители. Каждый возбудитель питается от сети ~380 В также через разделительный трансформатор.

Система автоматического регулирования скорости рабочего электропривода построена как однозонная, двухконтурная система подчиненного регулирования, с внутренним контуром регулирования тока и внешним – скорости, с обратной связью по ЭДС двигателя.

Коммутация силовой цепи электропривода осуществляется на стороне постоянного тока. Одновременно может работать только

один электродвигатель с питанием от одного из тиристорных преобразователей. Переключение с рабочего тиристорного преобразователя на резервный осуществляется на стороне постоянного тока, при помощи двух силовых переключателей: один переключает якорную цепь, второй – цепь возбуждения.

Управление электроприводами, диагностика состояния электроаппаратуры и необходимая визуализация осуществляются по сетям DeviceNet и ControlNet, с использованием программируемого контроллера фирмы Allen Bradley в резервируемом исполнении.

3.3. О ВЫБОРЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ТЯЖЕЛЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Важным условием обеспечения надежности электроприводов постоянного тока является правильный выбор тиристорных преобразователей, особенно для электроприводов с тяжелым режимом работы.

Особенностью использования тиристорных преобразователей в составе регулируемых электроприводов постоянного тока по системе ТП-Д, которые предназначены для тяжелых условий работы, является необходимость преодоления частых перегрузок, повторяющихся периодически в рабочем цикле или возникающих эпизодически по случайному закону. Такие условия требуют от применяемых тиристорных преобразователей наличия определенного запаса по нагреву во избежание выхода из строя тиристоров – наиболее слабого их звена с точки зрения допустимого перегрева.

При использовании отечественных тиристорных преобразователей, которые обладают достаточно высокой перегрузочной способностью (200% Iн в течение 15 с), выбор их для электроприводов с тяжелыми условиями работы решался достаточно просто. При применении тиристорных преобразователей производства ведущих мировых производителей, таких, как SIEMENS, ABB, General Electric, этот вопрос требует более строгого подхода [67].

Перегрузочная способность тиристорных преобразователей зарубежных фирм неодинакова для разных типов преобразователей даже в пределах одной серии. Она существенно зависит от величины тока нагрузки, который предшествовал началу перегрузки.

Так, например, тиристорные преобразователи постоянного тока фирмы SIEMENS (серия SIMOREG 6RA70) и фирмы ABB (серия DCS600) допускается использовать в следующих четырех типовых режимах.

1 Режим DC1. Это длительный режим работы с током нагрузки равным номинальному току преобразователя. Перегрузки в этом режиме не допускаются.

2 Режим DC2. Этот режим – перемежающийся, допускающий перегрузку тиристорного преобразователя в течение 60 сек, равную 150% по отношению к току нагрузки преобразователя, который протекает в течение последующих 15 мин. Для тиристорных преобразователей серии SIMOREG 6RA70 ток нагрузки, по отношению к которому допускается перегрузка, составляет от 72% до 85% номинального тока для нереверсивных и от 74% до 86% – для реверсивных преобразователей, в зависимости от типа (мощности) конкретного преобразователя. Таким образом, фактическая допустимая перегрузка в этом режиме составляет всего от 8% до 29% номинального тока преобразователя.

3 Режим DC3. Этот режим – перемежающийся, допускающий перегрузку тиристорного преобразователя в течение 120 сек, равную 150% по отношению к току нагрузки преобразователя, который протекает в течение последующих 15 мин. Для тиристорных преобразователей серии SIMOREG 6RA70 ток нагрузки, по отношению к которому допускается перегрузка, составляет от 70% до 80% номинального тока для нереверсивных и от 72% до 85% – для реверсивных преобразователей, в зависимости от типа конкретного преобразователя. Фактическая перегрузка в этом режиме – от 5% до 27,5% номинального тока преобразователя.

4 Режим DC4. Этот режим – перемежающийся, допускающий перегрузку тиристорного преобразователя в течение 10 сек, равную 200% по отношению к току нагрузки преобразователя, который протекает в течение последующих 15 мин. Для тиристорных преобразователей серии SIMOREG 6RA70 ток нагрузки, по отношению к которому допускается перегрузка, составляет от 65% до 77% номинального тока для нереверсивных и от 62% до 80 – для реверсивных преобразователей, в зависимости от типа конкретного преобразователя. В этом режиме фактическая перегрузка составляет от 24% до 60% номинального тока преобразователя [68].

Анализ показывает, что приведенные в вышеописанных режимах величины токов перегрузки рассматриваемых тиристорных преобразователей существенно ниже, чем величины допустимых значений токов этих режимов, рассчитанных из условий равенства номинального значения тока преобразователя его среднеквадратичной величине тока за предлагаемые в режимах DC1–DC4 циклы нагрузки.

Для выбора тиристорного преобразователя в случаях, когда предполагаемый режим работы и перегрузки электропривода существенно отличаются от вышеописанных, следует руководствоваться приводимыми в фирменных каталогах кривыми, которые позволяют оценить допустимую величину перегрузки и величину допустимого тока для требуемого рабочего цикла нагрузки конкретного механизма. Кроме того, следует учитывать информацию о предельно допустимой величине тока перегрузки. Например, для тиристорных преобразователей серии SIMOREG 6RA70 эта величина не должна превышать 180% номинального тока, независимо от предыдущих и последующих условий работы преобразователя.

Вышеизложенное особо следует учитывать при определении параметров тиристорных преобразователей, которые предполагается использовать для работы в составе электроприводов с тяжелыми условиями работы механизмов.

3.4. УРОВЕНЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПИТАНИИ ЕГО ОТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Выбор рационального соотношения напряжений питающего трансформатора и электродвигателя и определение требуемого уровня напряжения изоляции якорной цепи являются важными вопросами при разработке регулируемого электропривода по системе «тиристорный преобразователь – электродвигатель постоянного тока» [69]. Это особенно важно в связи с тенденцией повышения напряжения преобразователей и электродвигателей, которая обусловлена стремлением улучшить технико-экономические показатели электропривода.

В общем случае, при питании якоря электродвигателя от тиристорного преобразователя напряжение $U_{ИЗ}$, прикладываемое к изоляции, определяется соотношениями:

$$U_{ИЗ} = E_Д + U_V, \qquad (3.1)$$

$$U_V = L_Я \frac{dI_Я}{dt} + IR_Я, \qquad (3.2)$$

в которых $E_Д$ – ЭДС электродвигателя; U_V – переменная составляющая выпрямленного напряжения, прикладываемого к якорной цепи электродвигателя; $R_Я, L_Я, I_Я$ – индуктивность, сопротивление и ток якорной цепи электродвигателя.

Методику определения требуемого напряжения изоляции электродвигателя рассмотрим на примере питания его от преобразователя с нереверсивной m-фазной схемой выпрямления, рис. 3.5.

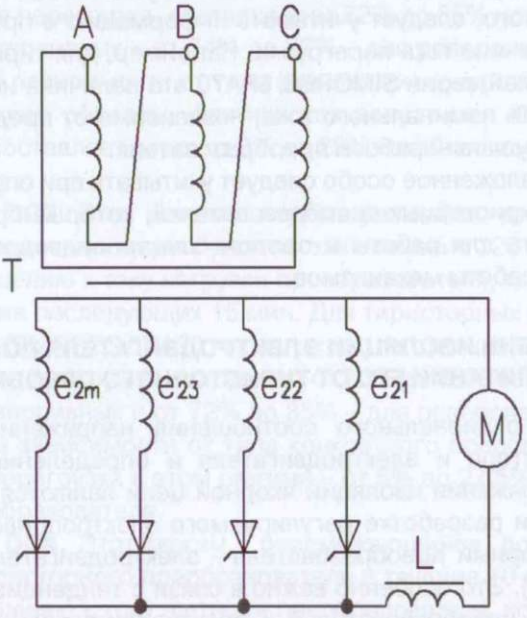


Рис. 3.5. Схема тиристорного электропривода с m-фазной схемой выпрямления

В дальнейшем эта методика может быть распространена на другие варианты схем выпрямления, с учетом их особенностей.

Для схемы рис. 3.5 справедливы такие выражения:

$$e_2 = E_Д + L_\Sigma \frac{dI_Я}{dt} + I_Я R_\Sigma + \Delta U_В , \quad (3.3)$$

$$E_Д = E_0 \cos\alpha - I_Я R_\Sigma - \Delta U_В . \quad (3.4)$$

Совместное решение выражений (3.1)–(3.4) с учетом известных зависимостей

$$e_2 = E_{2m} \sin\omega t , \quad (3.5)$$

$$E_{d0} = K_{CX} E_2 \quad (3.6)$$

дает

$$U_{ИЗ} = E_d \left[(1 - \frac{L_Д}{L_\Sigma}) \cos\alpha + \frac{\sqrt{2} L_Д}{K_{CX} L_\Sigma} \sin\omega t \right] - I_Я R_\Sigma - \Delta U_В . \quad (3.7)$$

В приведенных выражениях введены обозначения: e_2, E_2, E_{2m} – мгновенное, эффективное и максимальное значения фазной ЭДС вторичной обмотки трансформатора;

$L_\Sigma = L_Т + L_Д + L_{ДР}$; $R_\Sigma = R_Т + R_Д + R_{ДР}$ – соответственно, индуктивности и сопротивления: суммарные цепей выпрямленного тока, трансформатора, отнесенные к цепи выпрямленного тока, якорной цепи электродвигателя и сглаживающего дросселя; E_{d0} – максимальное значение выпрямленной ЭДС преобразователя при холостом ходе; α – угол регулирования преобразователя; $\Delta U_В$ – падение напряжения в вентиле; K_{CX} – коэффициент, определяемый схемой выпрямления по отношению к фазной ЭДС трансформатора.

Максимальное напряжение изоляции имеет место в режиме холостого хода, при $I_Я \approx 0$. Поэтому, пренебрегая падением в вентиле, выражение (3.7) можно упростить:

$$U_{ИЗ} = E_{Д0} \left[(1 - \frac{L_Д}{L_\Sigma}) \cos\alpha + \frac{\sqrt{2} L_Д}{K_{CX} L_\Sigma} \sin\omega t \right] . \quad (3.8)$$

Из (3.8) видно, что напряжение изоляции состоит из двух составляющих: постоянной, зависящей от величины угла регулирования преобразователя, с ее максимальным значением при $\alpha \approx 0$, и периодической, максимальное значение которой имеет место каждые

$$\omega t = \frac{2\pi n}{m} + \frac{\pi}{4}(n = 0,1.2,3....) \cdot \qquad (3.9)$$

Таким образом, максимальное значение напряжения, прикладываемого к изоляции электродвигателя, определяется из выражения

$$U_{ИЗ} = E_{d0}\left[1 + \frac{L_Д}{L_\Sigma}\left(\frac{\sqrt{2}}{K_{СХ}} - 1\right)\right] \cdot \qquad (3.10)$$

Переходя к относительным единицам, получим окончательное выражение для напряжения, приложенного к изоляции электродвигателя, для рассматриваемой схемы выпрямления преобразователя

$$u_{ИЗ} = 1 + l\left(\frac{\sqrt{2}}{K_{СХ}} - 1\right) \cdot \qquad (3.11)$$

Здесь $u_{ИЗ} = \frac{U_{ИЗ}}{E_{d0}}$ – относительное значение напряжения изоляции электродвигателя,

$l = \frac{L_Д}{L_\Sigma}$ – относительная индуктивность якорной цепи электродвигателя.

Используя предложенную методику, можно получить соответствующие выражения для определения напряжения изоляции электродвигателя при питании его от других вариантов преобразователей с нереверсивными схемами выпрямления. Эти выражения вместе с соотношениями для определения относительной индуктивности приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Схема выпрямления	Относительное напряжение изоляции, $u_{из}$	Относительная индуктивность, l	Коэффициент схемы, $K_{сх}$
Однофазная мостовая	$1+l(\frac{\sqrt{2}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{L_т+L_д+L_{др}}$	0,9
Трехфазная нулевая	$1+l(\frac{\sqrt{2}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{L_т+L_д+L_{др}}$	1,17
Шестифазная нулевая	$1+l(\frac{\sqrt{2}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{L_т+L_д+L_{др}}$	1,35
Трехфазная мостовая	$1+l(\frac{\sqrt{6}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_L}{2L_т+L_д+L_{др}}$	2,34
Шестифазная с уравнительным реактором	$1+l(\frac{\sqrt{6}}{2K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,5L_т+L_д+L_{др}}$	1,17

Используя примененную методику, в работе [68] выполнено определение величины напряжения изоляции электродвигателя при использовании для его питания реверсивных тиристорных преобразователей с уравнительным током и различными схемами выпрямления. Результаты этого анализа сведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Схема выпрямления	Относительное напряжение изоляции, $u_{из}$	Относительная индуктивность, l	Коэффициент схемы, $K_{сх}$
Трехфазная нулевая перекрестная	$1+l(\frac{\sqrt{6}}{2K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,5(L_т+L_{ур})+L_д}$	1,17
Шестифазная нулевая перекрестная	$1+l(\frac{\sqrt{2}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,5(L_т+L_{ур})+L_д}$	1,35
Трехфазная мостовая перекрестная	$1+l(\frac{\sqrt{6}}{2K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,5L_{ур}+L_т+L_д}$	2,34
Трехфазная нулевая встречно-параллельная	$1+l(\frac{\sqrt{2}}{K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,5(L_т+L_{ур})+L_д}$	1,17
Шестифазная встречно-параллельная с уравнительным реактором	$1+l(\frac{\sqrt{6}}{2K_{сх}}-1)$	$\frac{L_д}{0,25L_т+0,5L_{ур}+L_д}$	1,17

Очевидно, что величина напряжения изоляции якорной цепи электродвигателя при питании его от реверсивного тиристорного преобразователя без уравнительного тока определяется по формулам для нереверсивных схем.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

а) для трехфазных мостовых и шестифазных нулевых схем напряжение изоляции электродвигателя составляет $(1,05–1,1)E_{d0}$ и практически не зависит от индуктивности якорной цепи;

б) для трехфазной нулевой схемы напряжение изоляции электродвигателя достигает $1{,}2E_{d0}$; при питании электродвигателя от тиристорного преобразователя с номинальным напряжением $U_{ДН}$ = 440 В требуемое напряжение изоляции может достигать 550–600 В;

в) для однофазной мостовой схемы напряжение изоляции электродвигателя достигает $1{,}5E_{d0}$; при питании электродвигателя от бестрансформаторного тиристорного преобразователя от сети 380 В требуемое напряжение изоляции достигает 540 В.

Изложенная методика и полученные зависимости позволяют определить величину напряжения изоляции для цепей возбуждения машин постоянного тока при питании их от тиристорных преобразователей. Относительную величину индуктивности при этом следует принимать равной единице.

Таким образом, для обеспечения надежной работы электродвигателя при питании от тиристорного преобразователя уровень его изоляции должен быть не ниже, чем $U_{ИЗ} \geq 1{,}2E_{d0}$.

3.5. ЗАЗЕМЛЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В связи с развитием микропроцессорной техники, в настоящее время во всех отраслях промышленного производства при строительстве нового и модернизации существующего оборудования получили широкое распространение автоматизированные комплексные системы управления электроприводами. В состав этих систем входят оборудование электроприводов (электродвигатели, силовые трансформаторы, регулируемые преобразователи энергии постоянного и переменного тока на базе тиристоров и IGBT-транзисторов, с микропроцессорным управлением) и внешние управляющие устройства. Последние включают программируемые микроконтроллеры с центральными процессорами и модулями удаленного ввода-вывода, операторские станции (автоматизированные рабочие места, АРМ на базе персональных компьютеров и операторских панелей).

Быстродействующая связь между перечисленными устройствами управления осуществляется при помощи быстродействующих информационных сетей, таких, как Profibus, Modbus, CAN, Ethernet. Особенностью таких комплексных систем является наличие потен-

циальной электрической связи между элементами входящих в них устройств.

В таких системах вопросы защитного заземления, зануления и выравнивания нулевых потенциалов в силовых цепях и цепях управления с целью снижения перенапряжений, подавления помех и обеспечения надежной и безопасной работы приобретают важное значение. Они должны решаться при проектировании и внедрении этих систем комплексно с вопросами электрической безопасности обслуживающего персонала [70].

К сожалению, как будет показано ниже, в существующих нормативных материалах эти вопросы освещены не полностью.

В соответствии с рекомендациями МЭК определены следующие типы систем заземления: TN-C, TN-C-S, TN-S, TT и IT.

TN-C – сеть с глухозаземленной нейтралью трансформатора, в которой функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводника объединены в одном проводнике во всей сети.

TN-C-S – сеть с глухозаземленной нейтралью трансформатора, в которой функции нулевого рабочего (N) и нулевого защитного (PE) проводников объединены в одном проводнике (PEN) в части сети, а остальная часть сети имеет систему заземления типа TN-S.

TN-S – сеть с глухозаземленной нейтралью трансформатора, в которой нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники работают раздельно во всей сети; открытые токопроводящие части электроприемников присоединены нулевыми защитными проводниками к нейтрали трансформатора.

TT – сеть с глухозаземленной нейтралью трансформатора, в которой открытые токопроводящие части электроприемников присоединены нулевыми защитными проводниками (PE) к заземлителю, электрически независимому от заземлителя нейтрали трансформатора.

IT – питающая сеть не имеет непосредственной связи токоведущих частей с землей, а открытые токопроводящие части потребителей заземлены.

В соответствии с новой редакцией ПУЭ [71], посвященной электрооборудованию специальных установок, для электрооборудования жилых, общественных, административных зданий, лифтов, установок во взрывоопасных зонах в сетях с глухозаземленной нейтралью трансформатора требуется применение системы защитного заземления типов TN-C-S и TN-S. При этом разделение нулевого рабочего

(N) и нулевого защитного (PE) проводников необходимо выполнить, начиная с вводных щитов.

Для общепромышленных установок в ныне действующей редакции ПУЭ, 6 издание, в сетях с глухозаземленной нейтралью трансформатора сохраняется система защитного заземления TN-C (см. ПУЭ, п.1.7.73), а именно: в качестве нулевых защитных проводников должны в первую очередь использоваться нулевые рабочие проводники, а также могут быть использованы металлические конструкции, арматура железобетонных строительных конструкций, стальные трубы электропроводки и т.п.

Учитывая вышеизложенное и принимая во внимание рекомендации инофирм-изготовителей электрооборудования с микропроцессорными системами управления (например, [72], [73]), при проектировании комплексов автоматизированных электроприводов и систем автоматизированного управления были использованы нижеописанные принципы выполнения защитного заземления и выравнивания нулевых потенциалов, которые и предлагаются для обсуждения.

Выравнивание нулевого потенциала

Оно должно быть обеспечено между низковольтными комплектными устройствами (НКУ) с тиристорными преобразователями или преобразователями частоты регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, шкафами с программируемыми контроллерами и с модулями удаленного ввода-вывода, пультами с АРМ и т.п. электрооборудованием, имеющим в своем составе микропроцессорные устройства управления. Для этого в вышеперечисленных НКУ устанавливаются на изоляторах медные заземляющие шины PE сечением не менее 25 мм^2. Указанные шины PE заземляющими кабелями сечением не менее 16 мм^2

соединяются с «землей» комплекса, например, с шиной PEN главного вводного распределительного щита.

Шины PE разных шкафов НКУ соединяются между собой кабелем сечением не менее 16 мм^2. При соединении этих шин следует избегать образования «петель» и, при возможности, применять радиальную схему соединения.

Защитное заземление, зануление

В НКУ комплекса, получающих питание 380/220 В от сети 380 В с глухозаземленной нейтралью трансформатора, шина PE является

нулевым защитным проводником. Питание шкафов НКУ выполняется кабелем с нулевой рабочей жилой. Рабочий нулевой проводник N в этих шкафах изолирован от корпуса шкафа. Такая система заземления является системой типа TN-S.

К шине PE шкафа должны быть присоединены корпус шкафа (боковые, верхняя и задняя панели, днище и двери), а также корпусы электрооборудования, установленного в данном шкафу (преобразователи, трансформаторы, блоки питания и т.п.). Присоединение выполняется гибким проводом сечением не менее 4–6 мм^2.

В шкафах НКУ, в которых установлены программируемые контроллеры, к шине PE проводами с изоляцией желто-зеленого цвета сечением 2,5 мм^2 присоединяются модули питания, процессорные и интерфейсные модули. Рейки для установки модулей и корпус шкафа присоединяются к шине PE заземляющим проводом сечением не менее 10 мм^2.

Питание трехфазных потребителей (например, асинхронных электродвигателей) от шкафов НКУ с преобразователями частоты с микропроцессорным управлением осуществляется 4-жильными кабелями, нулевые жилы которых используются для зануления корпусов электрических приемников и подключаются к шинам PE соответствующих шкафов. Питание однофазных потребителей производится 3-жильными кабелями, третьи жилы которых аналогично соединяют корпусы электрических приемников с шинами PE соответствующих шкафов. В сигнальных кабелях, соединяющих датчики, установленные на механизмах, одна жила используется для присоединения корпуса датчика к шине PE шкафа.

В системе заземления типа TN-S допускается, чтобы шкафы НКУ имели дополнительное защитное заземление – соединение с металлоконструкциями (швеллеры), на которых установлены шкафы, или с металлоконструкциями здания, имеющими непосредственную связь с землей или заземлителем.

Экраны экранированных кабелей, применяемых для защиты от помех, должны быть заземлены. Заземление экранов осуществляется присоединением их к шинам PE шкафов НКУ или присоединением к отдельной шине экранов PS, которая соединяется медным проводником сечением не менее 16 мм^2 с шиной PE. Заземление экранов производится на обоих концах кабеля в случае необходимости подавления высокочастотных помех. Экраны контрольных кабелей, пред-

назначенных для передачи низкочастотных дискретных или аналоговых сигналов, как правило, заземляются только на одном конце кабеля.

Экраны информационных сетевых кабелей (например, Profibus) присоединяются к корпусам разъемов этих кабелей, с помощью которых кабели присоединяются к модулям соответствующих управляющих устройств.

Вышеизложенные принципы использованы при выполнении проектной документации и внедрении ряда промышленных объектов, в том числе:

– электроприводы и автоматизированная система управления комплексом механизмов района моталки реверсивного стана 2840 горячей прокатки алюминия металлургического завода;

– автоматизированные электроприводы и АСУ ТП основных технологических отделений цеха агломерации металлургического комбината;

– электроприводы и система управления комплекса аппаратов воздушного охлаждения нефтеперерабатывающего завода;

– электроприводы и система управления специальных мостовых и козловых кранов, портального крана и др.

3.6. ЭКОНОМИЧНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СХЕМЕ АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

Электропривод конвейеров большой производительности и длины выполняется, как правило, многодвигательным с несколькими приводными барабанами, передающими тяговое усилие ленте.

Для конвейеров, в зависимости от их конструкции используются различные системы управления электроприводом: от простых релейно-контакторных систем с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором (прямой пуск) и асинхронными электродвигателями с фазным ротором (плавный запуск с последовательным выведением резисторов, включаемых в роторные цепи) – до систем ПЧ-АД.

К многодвигательному электроприводу конвейеров большой производительности и большой длины предъявляются следующие требования: обеспечение пуска конвейера с заданным моментом и ускорением, что исключает возникновение недопустимых статических и динамических нагрузок на ленту (упругое звено) и металло-

конструкции; обеспечение заданного распределения нагрузок между приводными электродвигателями барабанов.

Оптимальным является поддержание между приводными барабанами такого распределения передаваемого ленте тягового усилия в процессе работы конвейера, которое изменяется в зависимости от загрузки, физического состояния и натяжения ленты, а также других факторов.

Исходя из указанных требований, в ряде случаев, при больших мощностях электропривода, предпочтение целесообразно отдать электроприводу по схеме асинхронного вентильного каскада (АВК). Каскад позволяет бесконтактно осуществить плавный пуск и регулирование скорости асинхронного электродвигателя с фазным ротором путем введения добавочной ЭДС в цепь ротора. Изменение ЭДС, вводимой в цепь ротора электродвигателя в схеме АВК, обеспечивается регулированием по заданному закону угла открывания α тиристорного преобразователя постоянного тока, включенного совместно с выпрямителем в цепь ротора и работающего в инверторном режиме.

В процессе работы АВК происходит возвращение энергии скольжения ротора приводного асинхронного электродвигателя в питающую сеть, благодаря чему эта схема электропривода имеет высокий коэффициент полезного действия.

При разработке электроприводов по схеме АВК следует учитывать, что их механические характеристики получаются достаточно «мягкими» из-за увеличения сопротивления цепи ротора.

Использование АВК оказывается экономически целесообразным в случае применения достаточно мощных электроприводов, для которых требуются плавный пуск и небольшой диапазон регулирования скорости, не превышающий 3:1. В то же время к этим электроприводам предъявляются невысокие требования по точности и быстродействию системы автоматического регулирования.

В этом случае преобразованию подлежит только часть мощности асинхронного электродвигателя, а именно – энергия скольжения. Поэтому установленная мощность тиристорного преобразователя не превышает 50% мощности электродвигателя. В то же время при использовании электропривода по системе ПЧ-АД преобразователь следует выбирать на полную мощность электродвигателя. В этом

и состоит основное преимущество, обеспечивающее применение электропривода по системе АВК.

Принимая во внимание все вышеизложенные соображения, схема АВК была применена при разработке многодвигательного электропривода крутонаклонного конвейера КНК-30, изготовленного ОАО «АЗОВМАШ» г. Мариуполь [74].

Крутонаклонный конвейер (КНК) предназначен для перегрузки горнорудной массы из карьера в транспортную систему, которая состоит из нескольких транс-портеров. Перепад высот для перегружателя – 30 м, угол наклона конвейера – 370. Кинаматическая схема КНК-30 показана на рис. 3.6.

Особенностью конструкции КНК является наличие двух лент – грузонесущей и прижимной. Прижимная лента роликами прижимается к нагруженной грузонесущей для удержания рудной массы в процессе транспортировки и при остановках нагруженного конвейера. Длина ветви грузонесущей ленты – 88 м, прижимной ленты – 74 м. Усилие натяжения, создаваемое грузовыми натяжными устройствами в ветви грузонесущей ленты – до 30 кН, в ветви прижимной ленты – до 25 кН.

Для привода грузонесущей и прижимной лент применены асинхронные электродвигатели с фазным ротором, во взрывозащищенном исполнении типа ВАОК-355М8У1, 160 кВт, 750 об/мин, 380 В, 50 Гц, в количестве 4 штуки.

Электродвигатели с редукторами устанавливаются на приводах опорной S-образной станции грузонесущей ленты: на нижнем барабане – два электродвигателя 1М1 и 1М2 с двух сторон барабана, на верхнем барабане – 1М3, и на приводном барабане прижимной ленты – 2М1.

Основные требования к системе управления электроприводами барабанов КНК следующие:

– выравнивание скоростей грузонесущей и прижимной лент;

– выравнивание нагрузок между электродвигателями нижнего барабана S-образной тянущей станции грузонесущей ленты и электродвигателем верхнего барабана;

– поддержание заданного распределения нагрузок между электроприводами;

– плавный пуск конвейера с заданным ускорением и ограничением тока электродвигателей.

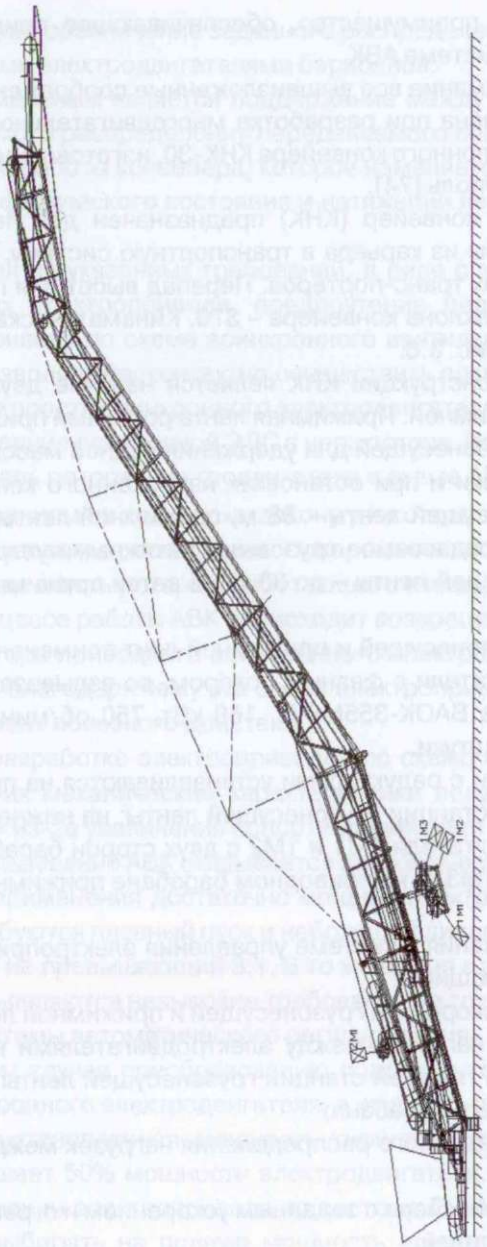


Рис. 3.6. Кинематическая схема крутонаклонного конвейера КНК-30

Для питания и управления статорными и роторными цепями приводных асинхронных электродвигателей КНК по схеме АВК применены комплектные устройства типа ККПУФ-400/380-30Р32У3, 400 А, 380 В, разработанные и изготовленные ООО «Электроимпульсные системы», г. Чебоксары, Россия.

В соответствии с дополнительными требованиями, предъявленными изготовителю, серийные комплектные устройства ККПУФ, первоначально разработанные только как устройства плавного пуска электроприводов по схеме АВК и поэтому рассчитанные на работу в повторно-кратковременном режиме, были модернизированы для возможности обеспечения регулирования скорости электродвигателей по схеме АВК в длительном режиме.

Функциональная схема системы регулирования трехдвигательного электропривода барабанов грузонесущей ленты показана на рис. 3.7.

Обозначения на схеме: 1М1, 1М2, 1М3 – электродвигатели; БУТ – блок управления тиристорами; РТ, РС – регуляторы тока и скорости; ЗИ – задатчик интенсивности; РВН – регулятор выравнивания нагрузок между электроприводами барабанов; ПЛК – программируемый контроллер.

После модернизации комплектные устройства ККПУФ обеспечивают:

– ограничение максимального тока двигателя в переходных режимах на уровне до 200% $I_{ном}$;

– плавное уменьшение напряжения на зажимах ротора за заданное время при пуске двигателя;

– поддержание скорости электродвигателя на заданном уровне.

Управляющий микроконтроллер, входящий в состав ККПУФ-Р, обеспечивает импульсно-фазовое управление инвертором АВК, управляет режимами переключения силовой коммутационной аппаратуры, формирует сигнал задания напряжения на входе аналогового регулятора напряжения ротора.

Система автоматического регулирования АВК – аналоговая, построенная по принципу подчиненного регулирования, двухконтурная: с внешним кконтуром регулирования скорости ротора и внутренним контуром регулирования тока.

Система управления электроприводами КНК, выполненная на базе устройств ККПУФ-Р, управляется программируемым контроллером типа SIMATIC S7-300 фирмы SIEMENS.

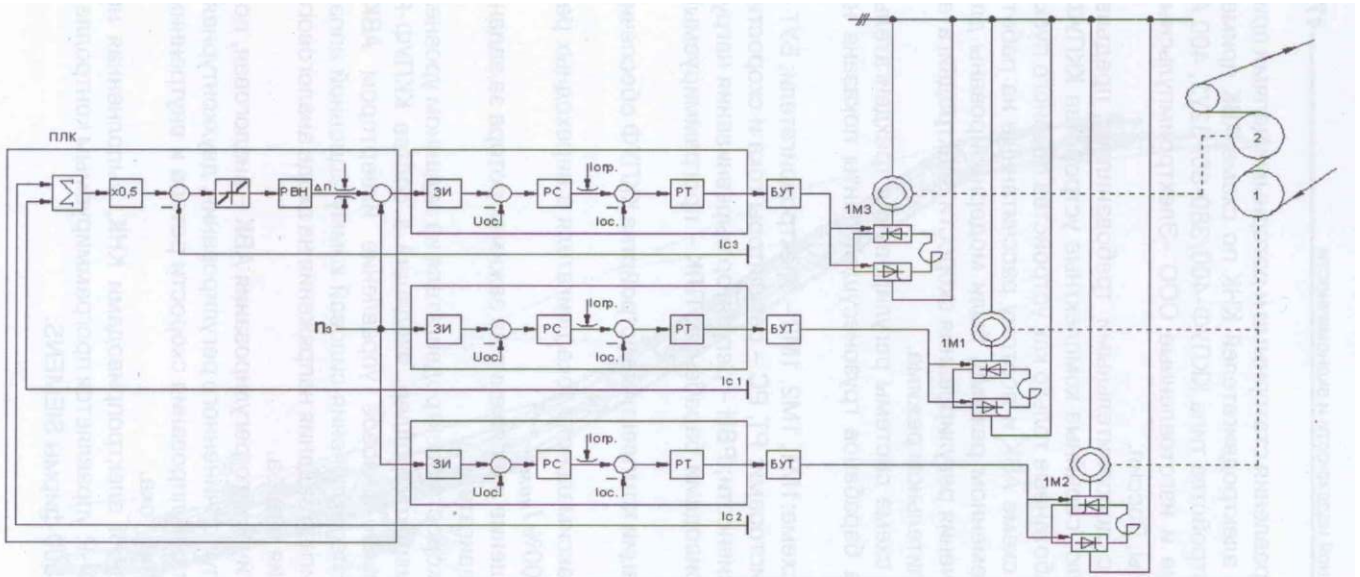


Рис. 3.7. Функциональная схема системы регулирования трехдвигательного электропривода барабанов

В качестве датчиков скорости вращения приводных и холостых барабанов КНК используются простые импульсные индуктивные датчики, на которые воздействуют две стальные пластины, установленные на каждом барабане через 180°. Импульсы датчиков поступают в программируемый контроллер, который измеряет не частоту импульсов, а время паузы между ними. Примененный способ вычисления скорости барабанов позволил отказаться от использования импульсных датчиков скорости, установка которых усложняла конструкцию барабанов.

Система управления электроприводами КНК выполняет следующие основные функции:

1. Осуществление разгона и торможения всех электроприводов с заданным ускорением при помощи общего задатчика интенсивности, реализованного в программируемом контроллере и выдающего задания скорости вращения на входы систем регулирования АВК.

2. Реализация выравнивания скоростей грузонесущей и прижимной лент. При возникновении разности скоростей холостых барабанов этих лент формируется сигнал коррекции соответствующего знака, который суммируется с сигналом задания скорости общего задатчика интенсивности и выдается на вход системы регулирования АВК прижимной ленты.

3. Реализация распределения нагрузок между электродвигателями нижнего барабана S-образной тянущей станции грузонесущей ленты и электродвигателем верхнего барабана в соотношении 2:1. Скорость движения ленты определяется скоростью электродвигателей нижнего барабана, которые работают в соответствии с заданием.

Выравнивание нагрузок между двумя электродвигателями нижнего барабана обеспечивается предварительной настройкой жесткости механических характеристик АВК каждого двигателя. В программируемом контроллере производится сравнение тока статора электродвигателя верхнего барабана с полусуммой токов статоров электродвигателей нижнего барабана. При возникновении разницы токов более 5–10% формируется сигнал коррекции скорости электродвигателя верхнего барабана с соответствующим знаком. Сигнал коррекции скорости вращения суммируется с сигналом задания скорости от общего задатчика интенсивности и поступает на вход АВК электродвигателя верхнего барабана.

Скорость верхнего барабана корректируется при отработке заданной нагрузки барабана, обеспечивая требуемое распределение нагрузок между барабанами. Максимальная величина сигнала коррекции скорости верхнего барабана ограничена на уровне ±5% от рабочей скорости ленты перегружателя.

4. Контроль проскальзывания лент на барабанах путем сравнения скоростей приводных и холостых барабанов посредством использования сигналов вышеописанных индуктивных датчиков.

В системе управления электроприводами КНК в состав объекта регулирования входит упругое звено – конвейерная лента, имеющая достаточно большую длину. В связи с этим, с целью исключения упругих колебаний, по результатам моделирования динамики электроприводов, регулятор выравнивания скоростей лент и регулятор деления нагрузок между электродвигателями барабанов тянущей станции грузоподъемной ленты выполнены интегральными с достаточно большими величинами постоянных времени интегрирования.

Результаты разработки и наладки электроприводов механизмов крутонаклонного конвейера с применением схемы АВК показали, что, несмотря на наличие широкой гаммы преобразователей частоты для построения электроприводов по схеме ПЧ-АД, электропривод по схеме АВК может быть использован для подобных механизмов, где он обеспечивает выполнение всех необходимых технических требований и является более экономичным.

3.7. УПРАВЛЕНИЕ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В процессе изготовления двигателей внутреннего сгорания, в частности тепловозных, судовых, двигателей спецтехники, последние проходят комплексные испытания различного вида, которые являются составной частью технологического процесса их производства. Испытания проводятся на специализированных испытательных стендах, которые установлены в цехах испытательных станций заводов-изготовителей двигателей внутреннего сгорания.

Основой испытаний двигателей внутреннего сгорания являются режимы проверки их работы на холостом ходу и под нагрузкой при разных скоростях. Длительность этих режимов может составлять от

десятков минут до нескольких часов и более, в зависимости от типа испытаний.

Для реализации режима нагрузки двигателя используется нагружение находящегося на его валу генератора. Так при испытаниях тепловозных двигателей используется, как правило, штатный тепловозный генератор постоянного или переменного тока.

До появления надежных тиристорных преобразователей постоянного тока соответствующей мощности на протяжении многих лет энергия, вырабатываемая двигателем внутреннего сгорания в процессе испытаний превращалась в тепловую энергию за счет подключения к генератору нагрузочного резистора [75]. Вместе с тем, возможность практического использования выделяемой при испытаниях двигателей внутреннего сгорания энергии путем ее рекуперации в сеть указывалась еще академиком Шенфером К.И. в 1946 году [76].

С освоением отечественной промышленностью мощных тиристорных преобразователей постоянного тока при проектировании новых испытательных станций в электрооборудование последних начали внедрять установки рекуперации, которые обеспечивали существенное повышение энергетической эффективности и экономичность процесса испытаний.

При разработке одной из таких испытательных станций для тепловозных двигателей внутреннего сгорания магистральных тепловозов большой мощности для управления электромеханическими установками рекуперации был предложен ряд вариантов систем автоматизированного управления [77], [78].

Функциональная схема одной из таких систем [77] с использованием нагрузочного генератора постоянного тока приведена на рис. 3.8, где использованы такие обозначения:

Д – испытуемый двигатель; Г – нагрузочный генератор; ОВГ – обмотка возбуждения генератора; ТВ – тиристорный возбудитель генератора; ДТВ, РТВГ – датчик тока возбуждения и регулятор тока возбуждения генератора; ЗТВ – задатчик тока возбуждения генератора; ТП – тиристорный преобразователь – инвертор; ДТ, ДН – датчики тока нагрузки и напряжения генератора; РТГ – регулятор тока; РМ – регулятор мощности генератора Г; ДУ – делительное устройство; ЗМ – задатчик мощности генератора.

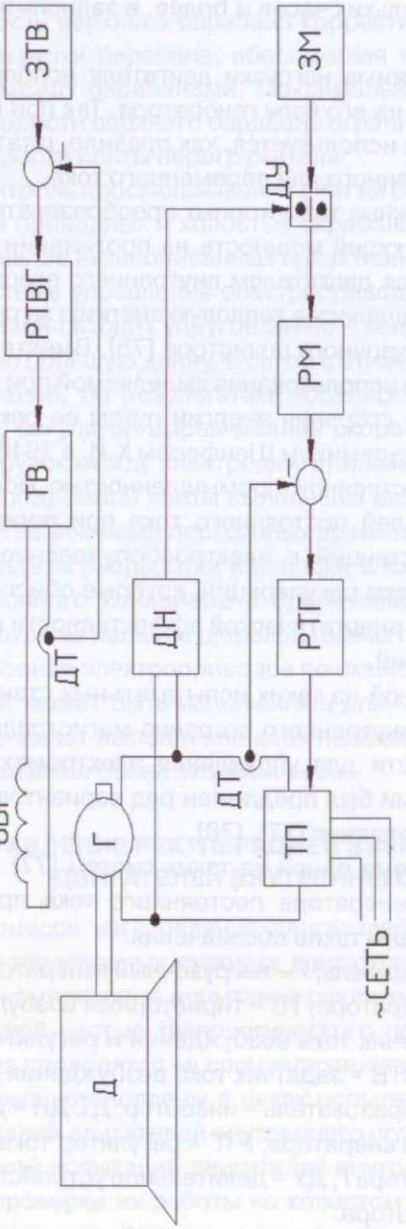


Рис. 3.8. Функциональная схема управления испытательным стендом

В режиме проведения испытаний двигателя схема работает следующим образом. Замкнутая система регулирования тока возбуждения генератора поддерживает заданный ток в обмотке, что обеспечивает напряжение на его якорных зажимах. В свою очередь, замкнутая система регулирования мощности генератора поддерживает в процессе испытания заданную мощность генератора, которая инвертируется тиристорным преобразователем в сеть, создавая при этом требуемую нагрузку на валу испытуемого двигателя внутреннего сгорания.

Требуемая мощность определяется заданием якорного тока генератора. Оно получается путем деления задания мощности на напряжение генератора. Схема обеспечивает высокую точность поддержания заданной мощности при возможных отклонениях напряжения генератора в процессе проведения испытания, например, при отклонениях скорости двигателя, посредством коррекции задания якорного тока. Недостатками описанной схемы можно считать несколько усложненное управление испытательным стендом, так как при проведении испытания необходимо оперировать заданием двух параметров – тока возбуждения генератора и мощности. Кроме того, при снижении скорости двигателя и соответствующем уменьшении напряжения на якоре генератора снижается величина коэффициента мощности установки, так как тиристорный преобразователь в этом режиме будет работать с большей величиной угла регулирования.

Этих недостатков лишена система управления, функциональная схема которой приведена на рис. 3.9. В случае использования при испытаниях двигателя внутреннего сгорания или дизеля генератора переменного тока схема дополняется силовым неуправляемым выпрямителем, который включается в силовой цепи между генератором и тиристорным преобразователем.

В схеме рис. 3.9 введены обозначения, кроме использованных на рис. 3.8: РН – регулятор напряжения генератора; $U_{ГН}$ – задание номинального напряжения генератора.

Кроме указанного на выходе регуляторов напряжения генератора РН и мощности РМ генератора Г введены устройства ограничений сигналов, настроенные на $I_{ВГН}$ и $I_{ГН}$.

Как видно из структурной схемы рис. 3.9, система управления испытательным стендом состоит из двух подсистем: подсистемы управления напряжением генератора и подсистемы управления мощностью рекуперации.

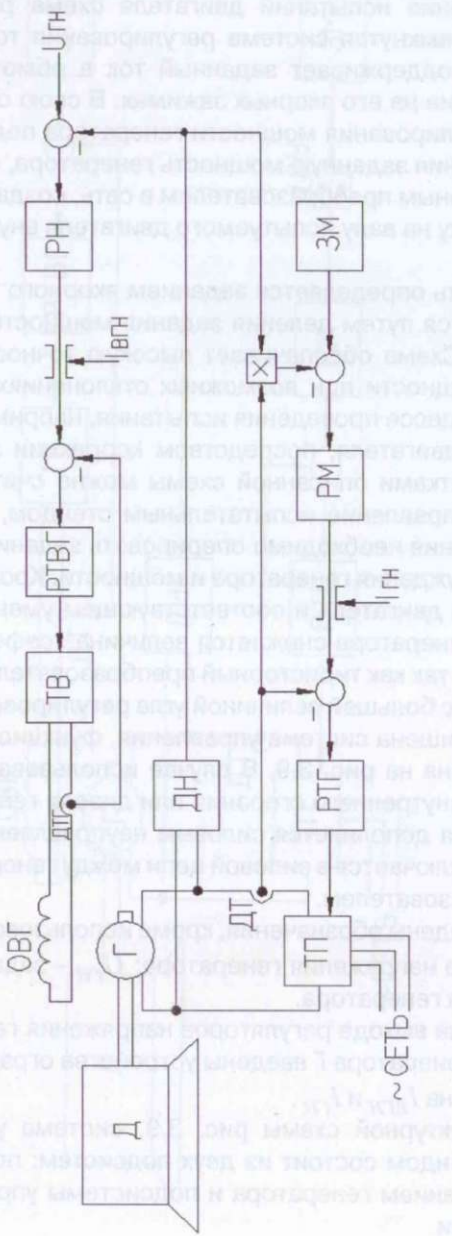


Рис. 3.9. Функциональная схема усовершенствованной системы управления испытательным стендом

Двухконтурная подсистема управления напряжением нагрузочного генератора построена на базе нереверсивного тиристорного возбудителя ТВ, питающего обмотку возбуждения генератора ОВГ. Она включает контур регулирования тока возбуждения генератора с регулятором РТВГ и датчиком ДТГ и контур регулирования напряжения генератора с регулятором РН с устройством ограничения и датчиком ДН. На вход РН подано постоянное задание, соответствующее номинальному напряжению генератора, а устройство ограничения сигнала на выходе регулятора напряжения РН настроено на величину номинального тока возбуждения. Такая настройка подсистемы управления напряжением обеспечивает при скорости испытуемого двигателя, меньшей номинального значения, работу генератора с максимально возможным напряжением. При увеличении скорости испытуемого двигателя система поддерживает напряжение генератора на уровне номинального значения.

Двухконтурная подсистема управления мощностью рекуперации энергии в сеть определяет нагрузку испытуемого двигателя. Она состоит из контура регулирования тока нагрузки генератора (тиристорного преобразователя) с регулятором тока РТГ и датчиком ДТ и контура регулирования мощности рекуперации с регулятором РМ с ограничением выходного сигнала. На вход регулятора мощности от задатчика ЗМ подается задание мощности рекуперации, требуемой в данном режиме испытания, а в качестве сигнала обратной связи используется мощность генератора, вычисляемая как произведение сигналов датчиков ДН и ДТ. Устройство ограничения сигнала на выходе регулятора мощности РМ настроено на величину, соответствующую номинальному току генератора для обеспечения защиты последнего от перегрузки.

Основные особенности описываемой системы управления, позволяющие рекомендовать ее к применению, заключаются в следующем.

Независимые контуры регулирования напряжения генератора и мощности рекуперации обеспечивают высокие быстродействие и требуемую точность регулирования напряжения генератора и мощности нагрузки испытуемого двигателя внутреннего сгорания, независимо от величины заданной двигателю скорости. Это повышает достоверность получаемых результатов нагрузочных испытаний.

При испытаниях двигателя на испытательном стенде для управления электрической частью стенда обслуживающим персоналом ис-

пользуется всего один управляющий орган – аппарат задания мощности нагрузки, что упрощает управление процессом испытаний.

В процессе испытаний двигателя внутреннего сгорания под нагрузкой система регулирования испытательного стенда обеспечивает проведение испытаний при минимальном значении тока нагрузки генератора и максимально возможной величине напряжения. Это повышает энергетические и экономические показатели установки за счет минимизации потерь энергии во всех элементах силовой цепи рекуперации и за счет максимально возможного значения коэффициента мощности тиристорного преобразователя, осуществляющего рекуперацию энергии в сеть.

3.8. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Синхронные электродвигатели, особенно высоковольтные большой мощности, находят широкое применение для электропривода производственных механизмов в разных отраслях промышленного производства. Это преобразовательные двигатель-генераторные агрегаты с генераторами постоянного тока прокатных станов с электроприводами по системе Г-Д, нерегулируемые электроприводы черновых клетей листопрокатных станов горячей прокатки, насосы газоперекачивающих систем, разные типы компрессоров химических производств и др.

В большинстве случаев синхронные электродвигатели перечисленных механизмов эксплуатируются с системами автоматического регулирования возбуждения (АРВ) на базе тиристорных возбудителей с аналоговыми системами автоматического регулирования или генераторов постоянного тока с релейно-контакторной аппаратурой. Модернизация таких систем АРВ с применением современной цифровой микропроцессорной техники позволяет при сравнительно невысоких затратах существенно повысить качество регулирования параметров синхронного электродвигателя и энергетические характеристики питающей сети. В данном случае синхронный электродвигатель используется в качестве источника реактивной энергии и работает с опережающим коэффициентом мощности. Кроме того, повышается эксплуатационная надежность электроприводов с синхронными электродвигателями.

Для подобной модернизации могут быть использованы как отечественные технические средства, так и управляющие устройства производства ведущих мировых производителей электрооборудования.

В качестве источника питания обмотки возбуждения синхронного электродвигателя используется двухквадрантный тиристорный преобразователь постоянного тока, снабженный специализированной системой управления и регулирования на базе цифровой микропроцессорной техники.

Система управления возбуждением мощного синхронного электродвигателя должна выполнять следующие основные функции:

– управление подачей возбуждения в процессе прямого или реакторного пуска электродвигателя;

– управление подачей возбуждения в режиме динамического торможения электродвигателя;

– автоматическое регулирование основных параметров электродвигателя – тока возбуждения, тока статора, напряжения статора, реактивной мощности, коэффициента мощности во всех режимах работы;

– гашение поля возбуждения и защита обмотки возбуждения от перенапряжения в аварийных ситуациях;

– все требуемые виды защиты цепи обмотки возбуждения электродвигателя;

– защиту синхронного электродвигателя от потери возбуждения и затянувшегося пуска;

– защиту от аварийных режимов самого тиристорного возбудителя.

Для выполнения всех этих функций отечественными производителями предлагаются возбудители синхронных электродвигателей разработки НИИ ХЭМЗ серии ВПЦ на токи от 320 А до 1000 А и возбудители разработки НИИ ЗПО «Преобразователь» серии ВТЕ на токи от 200 А до 500 А и серии ВТП на токи от 630 А до 1000 А. Для возбуждения синхронных электродвигателей с бесщеточной системой возбуждения имеется устройство типа СУББ. Все указанные возбудители оснащены системами управления на основе цифровой микропроцессорной техники.

Комплектные возбудители синхронных электродвигателей на токи от 100 А до 1000 А серии Unitrol-F поставляются фирмой ABB. Также в номенклатуре этой фирмы имеется возбудитель типа

Unitrol-1000 для синхронных электродвигателей с бесщеточной системой возбуждения.

В номенклатуре фирмы SIEMENS отсутствуют серийные комплектные тиристорные возбудители для синхронных электродвигателей. В качестве источника питания обмотки возбуждения синхронного электродвигателя можно использовать серийный нереверсивный тиристорный преобразователь постоянного тока с микропроцессорной системой управления SIMOREG 6RA70. Это современное высокоэффективное средство автоматизированного электропривода, благодаря высокоэффективной микропроцессорной системе управления и диагностике, обладает высокой надежностью, простотой наладки, ввода в действие и удобством обслуживания. Для реализации всех ранее перечисленных функций управления возбуждением синхронного электродвигателя этот преобразователь должен быть дополнительно укомплектован специализированными техническими средствами, так как по своему прямому назначению он представляет собой комплектный электропривод постоянного тока. В системе управления этого преобразователя отсутствуют технические средства для контроля статорных тока и напряжения синхронного электродвигателя, вычисления таких параметров, как реактивная мощность, коэффициент мощности. Кроме того, отсутствует устройство резисторного шунтирования обмотки возбуждения электродвигателя в процессе пуска и др.

Опыт применения возбудителей типа ВТП1000/230, 1000 А, 230 В [79] для модернизации систем возбуждения трех синхронных электродвигателей типа ДСЗ 21-125-1МУ4, 20000 кВА, 17500 кВт, 10000 В, 375 об/мин преобразовательных агрегатов стана холодной прокатки показал, что микропроцессорная система управления этих возбудителей имеет в своем составе средства измерения, вычисления и многоконтурную цифровую систему автоматического регулирования основных параметров электродвигателя – тока и напряжения статора, реактивной мощности и напряжения статора. Имеются средства для шунтирования резистором обмотки возбуждения при пуске, все необходимые виды защит как обмотки возбуждения, так и собственно тиристорного возбудителя, от аварийных режимов в процессе эксплуатации. Система управления – программируемая, она

позволяет путем простого параметрирования произвести настройку регуляторов в соответствии с требованиями и параметрами конкретного электропривода при помощи встроенной операторской панели или с использованием обычного компьютера и соответствующего программного пакета.

Указанная система управления способна выполнить следующие функции:

– автоматическую подачу возбуждения в функции тока статора или положения ротора, как при прямом, так и при реакторном пуске электродвигателя;

– гашение поля возбуждения с последующей подачей возбуждения при динамическом торможении электродвигателя;

– форсировку возбуждения по напряжению;

– защиту обмотки возбуждения от максимального тока и от перегрева;

– защиту электродвигателя от потери возбуждения, затянувшегося пуска, несинхронного хода, длительной стоянки с поданным возбуждением и др.

Рассматриваемая система АРВ синхронного электродвигателя преобразовательного агрегата построена как многоконтурная, по принципу подчиненного регулирования, с первым контуром регулирования тока возбуждения, вторым контуром регулирования реактивного тока электродвигателя и внешним контуром регулирования напряжения питающей сети.

Она показана на рис. 3.10, где приняты следующие обозначения: СД – синхронный электродвигатель; ОВСД – обмотка возбуждения СД; ТТ – трансформатор тока; ТН – трансформатор напряжения, ДТВ, ДРТ, ДН – датчики тока возбуждения, реактивного тока электродвигателя и напряжения сети; РТВ, РРТ, РН – регуляторы тока возбуждения, реактивного тока электродвигателя и напряжения.

Так как синхронные электродвигатели преобразовательных агрегатов подключены непосредственно к шинам главной понизительной подстанции глубокого ввода ГПП110/10 цеха холодной прокатки, система управления, показанная на рис. 3.10, поддерживает напряжение на этих шинах при его колебаниях под действием изменений нагрузки. Это положительно сказывается на работе электроприводов всех агрегатов цеха.

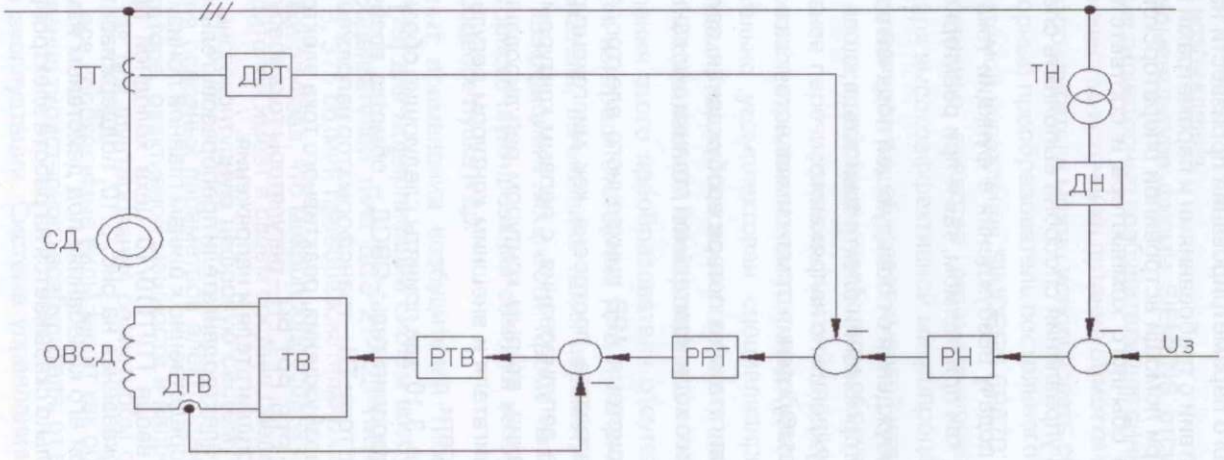


Рис. 3.10. Функциональная схема системы АРВ синхронного электродвигателя преобразовательного агрегата

В прокатных цехах горячей прокатки и в ряде других производств синхронные электродвигатели подключены к шинам распределительных подстанций. К этим же подстанциям подключены другие потребители – асинхронные электродвигатели, тиристорные преобразователи. Нагрузки этих электроприемников создают колебания напряжения на шинах подстанции. Алгоритмы управления и структуры систем АРВ при использовании синхронных электродвигателей в таких случаях рассмотрены в [80], [81], [82].

Анализ показал [80], что для обеспечения абсолютного отсутствия падения напряжения на шинах узла нагрузки $\Delta U_m=0$ система АРВ может иметь всего два контура регулирования – тока возбуждения и реактивного тока. При этом реактивный ток синхронного электродвигателя в каждый момент времени должен быть равен по величине и противоположен по знаку алгебраической сумме реактивных токов остальных потребителей.

Поддержание реактивного тока синхронного электродвигателя в соответствии с этим требованием, соответствовало бы не только поддержанию неизменности напряжения на шинах узла нагрузки, но и работе этого узла с коэффициентом мощности $\cos\varphi=1$. В промышленных условиях такое точное регулирование не требуется. Это подтверждается нормами соответствующих стандартов, а также требованиями ПУЭ к величине средневзвешенного коэффициента мощности (не ниже 0,92–0,94). Поэтому на практике можно ограничиться частичной компенсацией реактивных токов остальных потребителей узла нагрузки.

В то же время, для обеспечения минимума потерь энергии в синхронном электродвигателе и питающей сети реактивный ток должен состоять из двух составляющих: переменной и постоянной. Переменная составляющая определяется суммой реактивных токов остальных потребителей узла нагрузки, а постоянная составляющая определяется конструктивными параметрами синхронного электродвигателя и узла нагрузки.

На рис. 3.11 приведен вариант функциональной схемы системы АРВ для рассматриваемой схемы электроснабжения.

На схеме рис. 3.11 введены обозначения, кроме использованных ранее: БО – блок ограничения сигнала; БС – блок суммирования сигналов; БД – блок дифференцирования; ПК – блок квадратора; U_C – задание постоянной составляющей реактивного тока.

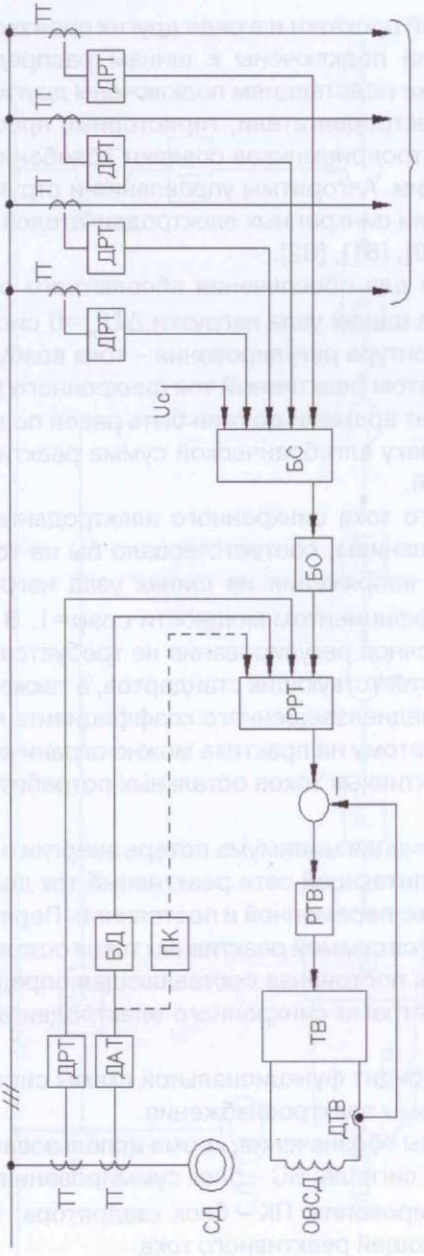


Рис. 3.11. Функциональная схема системы АРВ синхронного электродвигателя

Предлагаемая система АРВ представляет собой двухконтурную систему автоматического регулирования с внутренним контуром регулирования тока возбуждения и регулятором тока возбуждения РТВ. Внешним контуром является контур регулирования реактивного тока с регулятором РРТ. В качестве задания реактивного тока используется сумма сигналов задания постоянной составляющей U_C и выходного сигнала блока ограничения БО. К входу блока БО подключен выход блока БС суммирования сигналов реактивных токов остальных потребителей узла нагрузки. Ограничение сигнала задания регулятору реактивного тока обеспечивает снижение потерь в статоре и роторе и ограничение нагрева электродвигателя за счет ограничения реактивной составляющей полного тока статора и тока возбуждения. Уменьшенная реактивная составляющая тока поддерживается регулятором РРТ неизменной. Благодаря этому, изменения нагрузки на валу синхронного электродвигателя не вызывают изменения напряжения на шинах подстанции. Вместе с тем, при увеличении нагрузки на валу электродвигателя ограничивающее действие блока БО не препятствует автоматическому повышению тока возбуждения на величину, необходимую для обеспечения работы с увеличенной нагрузкой. Автоматическое увеличение тока возбуждения при набросах нагрузки со стороны приводимого синхронным электродвигателем механизма также осуществляется независимо от блока БО.

Схема обладает способностью стабилизировать напряжение на шинах подстанции.

Если проявляются изменения напряжения сети, определяемые влиянием активного сопротивления системы электроснабжения, понизительного трансформатора и элементов распределительной сети, на вход регулятора реактивного тока должен быть введен сигнал дополнительного задания от датчика активного тока через блок квадратора ПК (показан пунктиром).

Описанная схема системы АРВ успешно прошла опробование на нескольких синхронных электродвигателях прокатных станов [82].

При модернизации системы возбуждения высоковольтного синхронного электродвигателя весьма целесообразно реконструировать и систему защиты этого электродвигателя с использованием современных микропроцессорных систем защиты. Такие системы могут быть поставлены фирмами ABB – устройства серии REM, SIEMENS – серии SIPROTEC, Schneider Electric – серии SEPAM.

При подключении на входы выбранного из вышеперечисленных серий устройства защиты выходных сигналов обычных трансформаторов тока и напряжения мощный микропроцессор обеспечивает реализацию функций более 20 видов защиты, в число которых входят:

– максимальная токовая защита с зависимой выдержкой времени;
– максимальная токовая защита мгновенного действия;
– продольно-дифференциальная защита;
– защита от асинхронного хода электродвигателя;
– защита от замыканий на землю;
– защита пусковых режимов электродвигателя;
– защита от повышения напряжения сети;
– защита от понижения напряжения сети и др.

Гибкое программное обеспечение позволяет при помощи встроенных дисплея и клавиатуры или, при наличии соответствующего программного пакета, с использованием компьютера произвести ввод уставок всех выбранных защит и запрограммировать осуществление дополнительных функций, определяемых пользователем. Высокая надежность устройства повышает эксплуатационную надежность и срок службы электродвигателя.

Глава 4

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

4.1. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПО СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»

Регулируемые электроприводы переменного тока с микропроцессорным управлением по системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» (ПЧ-АД) находят широкое применение для промышленных механизмов различного назначения. Очевидно, что электроприводы могут быть широко использованы при конструировании подъемных и транспортных механизмов грузоподъемных кранов различных типов [83]. Здесь и далее имеются в виду современные преобразователи частоты со звеном постоянного тока и инвертором напряжения на базе IGBT – транзисторов, работающих в режиме широтно-импульсной модуляции. Возможность использования для электроприводов крановых механизмов таких преобразователей частоты в сочетании с современными программируемыми контроллерами позволяет создавать высококачественное, долговечное электрооборудование подъемных кранов повышенной надежности.

В этом разделе рассмотрены результаты опыта комплексной разработки и внедрения в промышленную эксплуатацию регулируемых электроприводов по системе ПЧ-АД с микропроцессорным управлением для механизмов ряда различных подъемных кранов, который получен в работах последних лет.

Как показала практика, весьма важным моментом при разработке электроприводов механизмов подъемных кранов является определение параметров и последующий выбор основных элементов силовой цепи электропривода. В частности, – приводного электродвигателя и преобразователя частоты.

Определение мощности и скорости приводных электродвигателей основных крановых механизмов производится традиционно с использованием известной методики на стадии конструирования механического оборудования кранов. Однако, сложность возникает

при выборе исполнения электродвигателя. Важную роль играет его способ охлаждения, с учетом необходимости работы данного электродвигателя при низких скоростях. Кроме этого, возможно оснащение электродвигателя такими дополнительными элементами, как встроенные тормозные устройства, датчики температуры, скорости или положения. Все это должно решаться уже на стадии разработки электрооборудования крана как с учетом режимов работы электроприводов, так и требований к системе управления.

Так, например, электроприводы таких механизмов, как главный крюковой подъем крана, механизмы подъема и замыкания грейфера, по возможности, должны быть оснащены импульсными датчиками скорости для обеспечения высокого качества ее регулирования при векторном управлении. Электроприводы механизмов поворота и вылета стрелы портального крана, передвижения тележки и моста мостовых разливочных кранов, требующие визуализации и управления позиционированием должны быть оснащены кодовыми датчиками положения.

Следует отметить, что при использовании для построения системы управления механизмами крана программируемых контроллеров или других программируемых технических средств предпочтительно использовать датчики положения, выходной сигнал которых может быть подключен непосредственно к информационной сети.

При выборе преобразователей частоты для питания и регулирования скорости приводных асинхронных электродвигателей важным вопросом является определение способа торможения электроприводов крана: рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть или торможение с выделением энергии в тормозном резисторе.

Первый способ требует увеличения первоначальных затрат. Его целесообразно применять либо для механизмов кранов, работающих в напряженном реверсивном режиме, либо для механизмов, работающих продолжительное время в генераторном режиме. Например, для механизмов кранов, находящихся в технологическом цикле круглосуточного производства, или механизмов подъема монтажных кранов с низкими скоростями подъема–опускания и большой высотой подъема (опускания) груза. Для таких кранов можно ожидать быструю окупаемость больших первоначальных затрат за счет экономии электроэнергии. Применение рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть предпочтительно и в тех случаях, когда при тор-

можении выделяется большое количество энергии и требуется применение нескольких параллельно работающих тормозных модулей и, соответственно, большое количество тормозных блоков резисторов.

Независимо от выбранного способа торможения электроприводов крана, некоторое снижение стоимости электрооборудования может быть получено при использовании группового звена постоянного тока для питания инверторов индивидуальных электроприводов механизмов крана. Особенно это целесообразно в тех случаях, когда по технологическим условиям работы крана не требуется одновременное функционирование всех его механизмов. При этом мощность группового выпрямителя постоянного тока может быть принята меньше, чем суммарная мощность инверторов отдельных электроприводов. В этом случае мощность группового выпрямителя звена постоянного тока, а также тормозные модули и тормозные резисторы для такого способа торможения, выбираются по мощности только одновременно работающих электроприводов. Такой подход при конструировании крановых электроприводов возможен только при применении преобразователей частоты модульного исполнения, которые производятся, например, такими фирмами, как SIEMENS, ABB [84], [85], [86], [87], [88].

При выборе выпрямительного модуля звена постоянного тока, независимо от используемого способа торможения, количества тормозных модулей и блоков тормозных резисторов, а также при выборе инверторов или индивидуальных преобразователей частоты особое внимание следует обратить на соответствие перегрузочной способности этого электрооборудования перегрузкам приводных электродвигателей при заданном режиме работы механизмов крана. При этом следует учитывать относительно низкую перегрузочную способность преобразователей частоты, производимых вышеупомянутыми инофирмами, по сравнению с перегрузочными возможностями приводных электродвигателей, особенно электродвигателей крановометаллургических серий. Данные по перегрузочной способности преобразователей частоты фирм SIEMENS и ABB приведены в приложениях П1 и П2.

Как показал опыт, нежелательным является использование двух и более параллельно включенных тормозных модулей. Это может потребоваться тогда, когда количество выделяемой при торможении энергии превышает единичную мощность тормозных модулей. Кон-

структивно сложно добиться хорошей симметрии параллельно работающих тормозных цепей. Это приводит к снижению надежности работы этого узла схемы. В процессе длительной работы в тормозном режиме при спуске груза возможны периодические отключения отдельных тормозных модулей и аварийные остановки электропривода. В этих случаях предпочтительным является применение четырехквадрантных преобразователей частоты с рекуперацией энергии в сеть.

Важным вопросом при конструировании электроприводов крановых механизмов является определение способа регулирования скорости. Опыт показал, что для крановых механизмов, работающих с невысокими скоростями передвижения, например, для мостовых монтажных кранов и им подобных, возможно применение бессенсорного векторного управления при использовании преобразователей частоты с относительно простым программным обеспечением и имеющих невысокую точность регулирования скорости. Для многодвигательных электроприводов, например, передвижения крана или крановой тележки, возможно применение группового питания нескольких электродвигателей от преобразователей частоты со скалярным управлением скоростью электродвигателя. Однако, для крановых механизмов, характеризующихся высокими скоростями передвижения или требующих повышенной точности регулирования скорости или соотношения скоростей, необходимо применение преобразователей частоты с системами векторного управления высокой точности. При этом необходимо использование импульсных датчиков скорости электродвигателя для создания обратной связи. Это же относится к механизмам подъема и замыкания грейфера, механизму передвижения тележки крупного мостового перегружателя и т.п.

При использовании для питания электрооборудования крана троллейного токоподвода и применении электроприводов по системе ПЧ-АД, для повышения надежности их работы, особое внимание следует уделить конструированию токосъемных устройств. Опыт показал, что для механизмов с высокими скоростями передвижения, таких, как, например, тележка мостового перегружателя с большой длиной моста, троллейный подвод должен иметь два и более контактных башмака на фазу. Это полностью решает проблему надежности работы преобразователей частоты при потере одним из башмаков контакта с троллеем во время передвижения.

Решение о выборе типа применяемых на кране преобразователей частоты нужно принимать с учетом их вибрационной устойчивости. Это, в первую очередь, относится к преобразователям частоты, которые устанавливаются в местах с повышенной вибрацией, например, в электропомещении, расположенном на тележке мостового перегружателя. Каталожные показатели вибрационной и ударной устойчивости преобразователей частоты многих инофирм достаточно высоки. Вместе с тем, в ряде случаев конструктивное исполнение этих преобразователей или отдельных их элементов требует принятия дополнительных мер для повышения надежности их работы в условиях повышенных вибраций. В качестве примера можно привести конструктивное исполнение тормозных модулей большой мощности преобразователей частоты серии Simovert Master Drives фирмы SIEMENS, которые имеют неудачное соотношение размеров ширины и глубины при относительно большом весе.

Для общего управления многодвигательным электроприводом основных механизмов крана, информационной визуализации процесса управления, диагностики состояния электрооборудования крана и архивирования событий обычным является использование программируемого логического контроллера. Для этой цели хорошо зарекомендовали себя программируемые контроллеры серии Simatic S7-300 фирмы SIEMENS. В системе автоматизированного управления, построенной на базе такого программируемого контроллера, могут быть реализованы следующие функции:

– полуавтоматическое управление механизмами подъема и замыкания грейфера («грейферный автомат»);

– любые нестандартные задачи управления механизмами крана, например, совместное управление из одной кабины управления механизмами двух кранов при их спаренной работе, позиционирование механизма изменения вылета стрелы портального крана, защита от перекоса опор мостового перегружателя и т.п.;

– контроль функционирования всех основных элементов силовых схем электроприводов, контроль датчиков и другого электрооборудования;

– визуализация управления механизмами крана и визуализация состояния электрооборудования при помощи операторских панелей в кабине управления машиниста и в электропомещении крана;

– диагностика аварийных и предаварийных ситуаций, облегчающая поиск неисправностей и сокращающая неплановые простои

механизмов крана и, тем самым, повышающая производительность крана.

Вышеизложенные подходы к применению для автоматизации механизмов подъемных кранов электроприводов по системе ПЧ-АД апробированы при выполнении ряда разработок и внедрении на подъемных кранах различного назначения [89].

4.2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К подъемным кранам специального назначения, в частности, относятся краны, которые предназначены для монтажа и эксплуатации оборудования гидроэлектрических станций. Это монтажные мостовые краны машинного зала электростанции, при помощи которых ведется монтаж и ремонт гидротурбин и генераторов, козловые краны затворов водоприемника, козловые краны затворов водосливной плотины, мостовой кран затворов отсасывающих труб.

При разработке электроприводов и систем управления основных механизмов таких кранов необходимо учитывать их неординарные технологические и эксплуатационные особенности [90].

К таким особенностям следует отнести относительно невысокие скорости перемещения груза, передвижения тележки и самого крана, а также отсутствие требования плавного и глубокого регулирования скорости рабочих механизмов. Требуемый диапазон регулирования скорости механизмов не превышает 1:5–1:10. При этом достаточно иметь не более 5 фиксированных скоростей приводного электродвигателя в каждом направлении. Как правило, первые 3–4 скорости – это различные пониженные скорости, соответствующие частоте питающего напряжения до 5...20 Гц. Они используются для точного маневрирования грузом. Последняя – максимальная скорость, соответствующая частоте 50 Гц, предназначена для перемещения ненагруженного крана или грузозахватных устройств. Для позиционирования груза применяется так называемый импульсный режим, который позволяет по единичной команде оператора крана поднимать или опускать груз на расстояние порядка 1 мм.

Другой особенностью рассматриваемых кранов является относительно большое время спуска или подъема грузов. Так как с ответственными грузами не работают на номинальных скоростях электродвигателей, то время спуска может достигать 30 минут и более.

В то же время тормозные режимы механизмов передвижения крана и передвижения тележки достаточно кратковременны.

С учетом отсутствия больших ускорений и замедлений для торможения этих механизмов использован режим так называемого «компаундного» торможения, когда торможение электродвигателя осуществляется увеличением постоянной составляющей в токе статора электродвигателя. Благодаря этому, процесс остановки получается контролируемым, и сохраняется возможность точного управления скоростью электродвигателя так же, как и при разгоне. Энергия, выделяемая при торможении, в этом случае рассеивается в электромагнитной системе двигателя. Редкие торможения электроприводов передвижения крана и тележки, которые обычно происходят не с максимальных, а с промежуточных скоростей, а также применение принудительной вентиляции приводных электродвигателей открывают такому типу торможения на кранах гидроэлектростанций широкое применение. Следует отметить, что такой режим торможения обеспечивают не все типы частотных преобразователей, в том числе и не все импортные.

Особенностью работы мостовых кранов машинного зала гидроэлектростанции является необходимость обеспечения спаренной работы двух кранов для работы с особо большими грузами (ротор турбины и т.п.).

С учетом вышесказанного, при проектировании асинхронных электроприводов для механизмов комплекса кранов гидроэлектростанции были применены преобразователи частоты серии Micromaster 440, фирмы SIEMENS.

При этом принимались во внимание такие особенности преобразователей этой серии, как наличие режима бессенсорного векторного управления. Оно позволяет упростить состав электрооборудования электроприводов без ухудшения качественных показателей работы, таких, как точность и быстродействие регулирования скорости вращения в статических и динамических режимах. Такой режим управления, как правило, рекомендуется только для однодвигательных электроприводов. Однако он был применен и в схемах многодвигательных электроприводов механизмов передвижения кранов и тележек. Учитывалось, что, благодаря невысоким скоростям и ускорениям указанных механизмов, проскальзывание колес по рельсам практически отсутствует. Это позволяет считать, что электродвигате-

ли связаны между собой достаточно жестко, и для системы управления преобразователя частоты представляют собой один эквивалентный электродвигатель.

Преобразователи частоты примененной серии оснащаются встроенными тормозными модулями только до мощности 90 кВт. Поэтому для электроприводов механизмов подъема, мощность которых 110 кВт, потребовалось использовать выносные тормозные модули преобразователей частоты другой серии фирмы SIEMENS. Количество и мощность этих модулей рассчитаны с учетом длительности тормозных режимов и величины нагрузки от протягивающего спускаемого груза. Так, для электропривода главного подъема мостового крана машинного зала грузоподъемностью 400 т для обеспечения требуемого темпа торможения при спуске максимального груза потребовалась установка трех тормозных модулей (100 кВт каждый), включенных параллельно, причем к каждому из них подключен свой тормозной резистор.

Расчеты показали, что применение в этом случае четырехквадрантных преобразователей частоты оказывается экономически нецелесообразным, так как из-за редкого использования тормозного режима для спуска больших грузов срок окупаемости окажется весьма большим.

Определенные сложности представляет реализация режима спаренного управления двумя мостовыми кранами машинного зала. При осуществлении этого режима один кран остается без машиниста, а управления согласованной работой всех механизмов обоих кранов производит машинист второго из своей кабины управления. Для обеспечения такого режима управления оба крана оснащены программируемыми контроллерами. Они при раздельной работе кранов выполняют функции управляющих устройств, преобразуя команды, поступающие от машиниста, в соответствующие команды для приведения в действие электроприводов механизмов. Наличие программируемых контроллеров позволило оснастить пульты управления каждого крана операторскими панелями для улучшения визуализации процесса управления краном. Контроллеры снабжены устройствами сетевой связи.

При переходе к спаренной работе двух кранов после сближения и механической стыковки производится соединение программируемых контроллеров по сети с использованием специального сетевого кабеля и штепсельного соединения. После этого команды машини-

ста ведущего крана преобразуются программируемым контроллером в сигналы управления для преобразователей частоты соответствующих механизмов обоих кранов, что и обеспечивает их спаренную работу.

Кроме управления электроприводами, каждый программируемый контроллер осуществляет мониторинг состояния преобразователей частоты и электрооборудования крана. При возникновении предаварийных или аварийных ситуаций на операторскую панель выдается соответствующее сообщение. Одновременно, в зависимости от ситуации, ограничивается или блокируется и запрещается дальнейшая работа крана. На ту же операторскую панель выводятся сообщения о сбоях в работе электрооборудования с указанием местонахождения и причин возникновения неисправностей, что облегчает их поиск и устранение.

Наладка и ввод комплекса электрооборудования кранов гидроэлектростанции показали, что принятые решения обеспечивают высокую точность совместной работы всех механизмов крана, в том числе и самых быстроходных из них – механизмов передвижения кранов. При проведении испытаний все управление спаренной работой кранов производилось из кабины ведущего крана. При отсутствии механической связи между кранами их перемещение на максимальной скорости спаренно в разных направлениях происходило абсолютно синхронно, без изменения расстояния между ними. Это легко индицировалось по положению кабеля сетевой связи, связывающего контроллеры в этом режиме.

Спаренное управление мостовыми кранами реализовано с помощью программируемых контроллеров серии Simatic S7-300, операторских панелей типа OP-7 и сети Profibus-DP – все производства фирмы SIEMENS.

4.3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

Портальные краны различной грузоподъемности, оснащенные грузозахватными устройствами различных типов, широко используются для проведения погрузочно-разгрузочных работ в морских и речных портах, в цехах по переработке металлолома металлургических заводов и на других промышленных предприятиях.

Основными регулируемыми механизмами рассматриваемого полноповоротного портального крана КПП 16-36 грузоподъемностью 16 тонн с длиной стрелы 36 м являются две лебедки для подъема и замыкания грейфера в грейферном режиме работы или для подъема груза при совместной работе в крюковом режиме или при использовании электромагнита. Сюда относятся также механизм изменения вылета стрелы, механизмы поворота и передвижения крана. Все приводные электродвигатели – асинхронные с короткозамкнутым ротором. При этом электроприводы механизмов поворота и передвижения крана – многодвигательные.

Особенностью конструкции является то, что электрооборудование крана размещено частично в электромашинном помещении на поворотной части крана, а частично – на портале. Электрическая связь осуществляется через кольцевой токосъемник. Подвод питающего напряжения к крану производится при помощи кабельного барабана с электроприводом [91].

Электроприводы основных регулируемых механизмов крана выполнены по системе ПЧ-АД с использованием асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором фирмы VEM, Германия. Двигатели оснащены устройствами противоконденсатного подогрева, датчиками температуры и встроенными тормозами. При этом последние отсутствуют у электродвигателей подъема и замыкания грейфера.

Электроприводы всех механизмов сконструированы на базе модулей высокоточных преобразователей частоты серии SIMOVERT Masterdrives фирмы SIEMENS. Система автоматизированного управления построена с использованием программируемого контроллера серии SIMATIC S7-300 и операторской панели OP170B.

Применение преобразователей частоты указанного типа для электроприводов механизмов подъема и замыкания грейфера обусловлено требованиями высокой точности регулирования скорости, которые предъявляют эти механизмы при работе с грейферным или крюковым захватом. Для механизмов поворота крана, изменения длины стрелы и передвижения крана применение высокоточных преобразователей частоты этой серии продиктовано стремлением максимально унифицировать электрооборудование крана. Для управления электроприводами от программируемого контроллера применена сетевая связь Profibus DP.

Технические решения, принятые при разработке электроприводов и программы системы управления, прошли апробацию в процессе наладки и ввода в действие оборудования крана. Получен опыт, который может быть использован при выполнении подобных работ. Он заключается в следующем.

Определенную сложность вызвала настройка режимов работы электроприводов механизмов подъема и замыкания грейфера. В грейферном режиме должны обеспечиваться:

– синхронная работа двух лебедок механизмов подъема и замыкания при опускании и поднятии открытого грейфера;

– раздельная работа лебедок при зачерпывании груза;

– совместная работа двух лебедок при подъеме и опускании закрытого грейфера;

– раздельная работа двух лебедок при открывании грейфера.

Для выполнения этих требований преобразователи частоты электроприводов механизмов подъема и замыкания были настроены на режим векторного управления с обратными связями по скорости электродвигателей. В качестве датчиков скорости электродвигателей использованы импульсные датчики HOG10 фирмы HUBNER, Германия (1024 имп/об). Сигналы задания скорости движения обоим указанным механизмам формировались программируемым контроллером, в зависимости от положения одного основного органа управления – командоаппарата типа «джойстик», имеющего четыре направления по пять положений в каждом. Передача управляющих сигналов в преобразователи частоты от программируемого контроллера осуществлена по сети Profibus DP.

Схема сетевых связей системы управления портального крана показана на рис. 4.1, где обозначено: ПЧ – преобразователь частоты; КД – кодовый датчик положения стрелы крана; ..М.. – электродвигатели.

При работе в режиме синхронной работы лебедок сигнал задания скорости поступает на входы регуляторов скорости систем автоматического регулирования электроприводов обоих механизмов – подъема и замыкания. Одновременно в программируемом контроллере на программном уровне был реализован регулятор положения. Его работа заключалась в корректировке сигналов задания скорости указанным электроприводам в зависимости от рассогласования их положения.

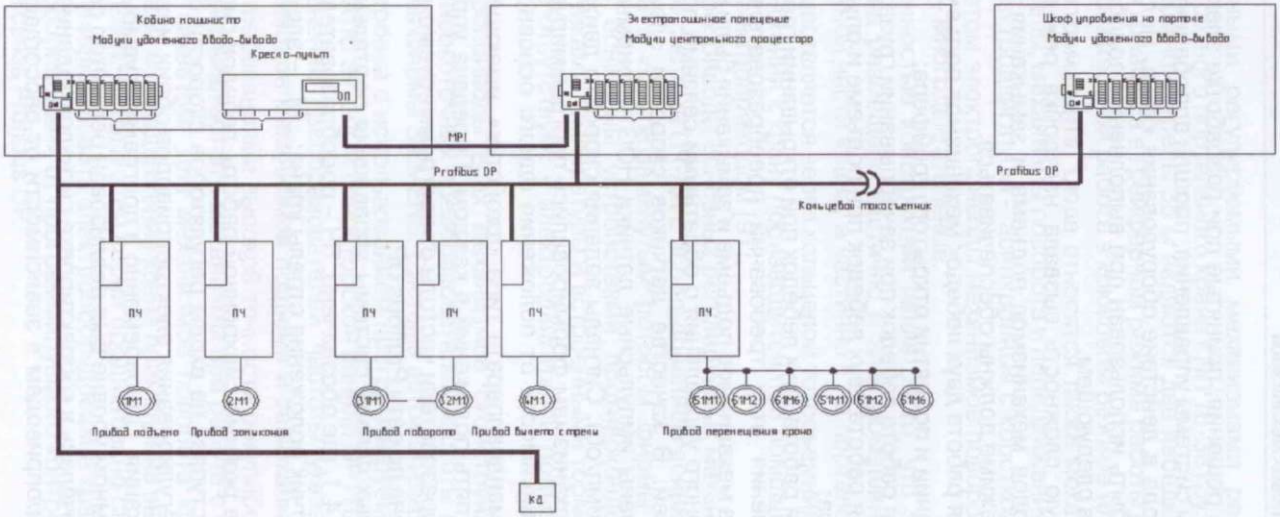


Рис. 4.1. Схема сетевых связей системы управления портального крана

Последнее определялось в программируемом контроллере по показаниям импульсных датчиков. В результате этого намотка и размотка канатов механизмов подъема и замыкания грейфера осуществлялась синхронно, без взаимного рассогласования. Данное решение применялось также для осуществления режима подъема-опускания груза двумя лебедками в крюковом режиме или при использовании электромагнита.

При реализации режима раздельной работы лебедок сигнал задания скорости от программируемого контроллера поступает только на вход регулятора скорости системы автоматического регулирования электропривода механизма замыкания, с учетом состояния грейфера – разомкнут или замкнут. При этом на вход регулятора скорости электропривода механизма подъема поступает «малое» задание скорости на опускание. Это обеспечивает одновременное закрывание грейфера с небольшой его просадкой для эффективного зачерпывания груза.

Для выполнения совместной работы лебедок в режиме с закрытым грейфером следует учитывать две особенности. Необходимость обеспечение выборки слабины канатов механизма при подъеме закрытого грейфера и распределение нагрузок между электроприводами механизмов подъема и замыкания для удержания закрытого состояния грейфера. Это реализовано следующим образом.

Сигнал задания скорости от программируемого контроллера поступает на входы регуляторов скорости систем автоматического регулирования обоих электроприводов механизмов подъема и замыкания. В системе регулирования механизма замыкания введен дополнительный регулятор согласования нагрузок, на входы которого поданы с противоположными знаками сигналы задания вращающих моментов обоих электроприводов. Выходной сигнал этого регулятора является дополнительным сигналом задания скорости. Он поступает на вход регулятора скорости системы регулирования электропривода механизма замыкания.

На рис. 4.2 представлена упрощенная структура схемы реализованной системы управления электроприводами механизмов подъема и замыкания. Здесь PLC – программируемый контроллер; РС – регулятор скорости; РСН – регулятор согласования нагрузок; К – коэффициент согласования.

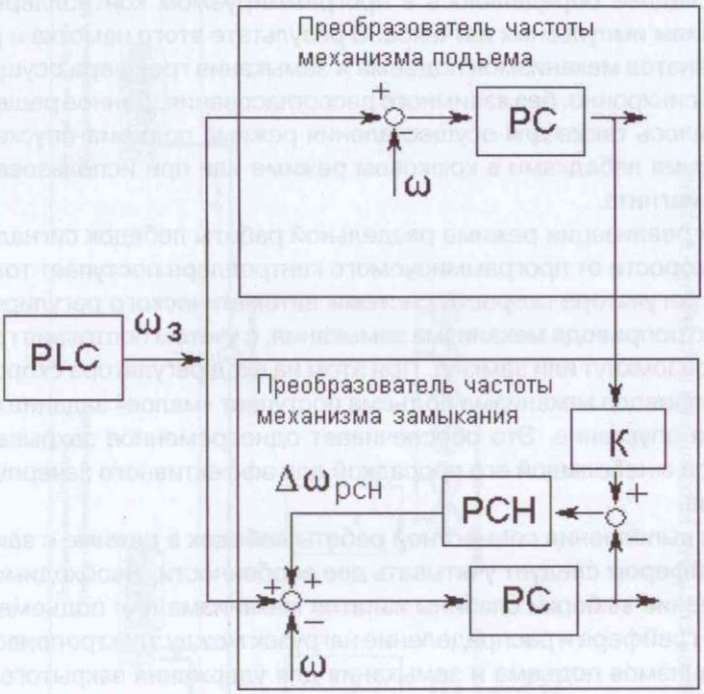


Рис. 4.2. Упрощенная структура системы управления в режиме совместной работы с закрытым грейфером

На рис. 4.3 приведены графики переходных процессов электропривода механизма замыкания в режиме подъема закрытого грейфера на первой (минимальной) скорости. Они получены с помощью программы Drive Monitor. На рис. 4.3 ось Y – скорость электродвигателя в процентах по отношению к номинальной, ось X – время в миллисекундах.

В режиме раздельной работы лебедок при открывании грейфера и стоящем электроприводе механизма подъема программируемый контроллер подает сигнал задания скорости электроприводу механизма замыкания, отслеживая положение грейфера – разомкнут или замкнут.

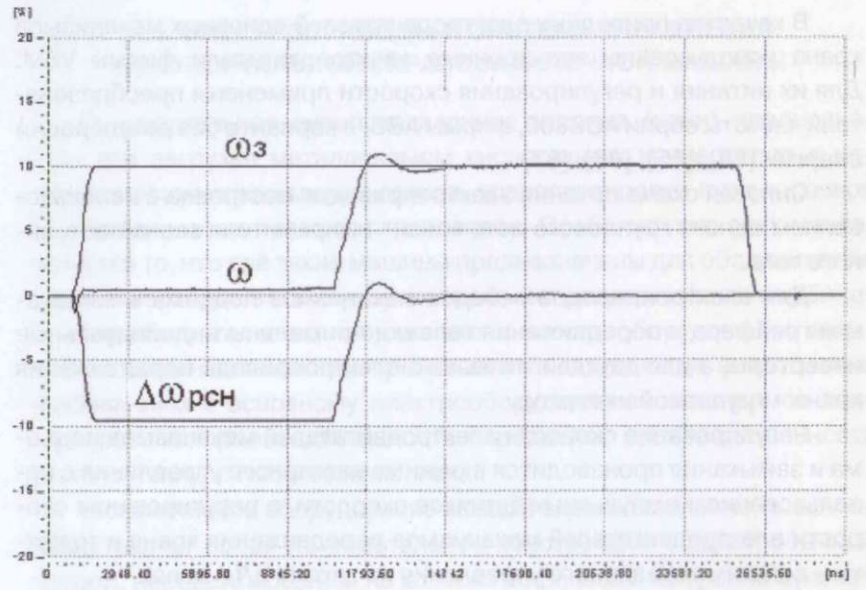


Рис. 4.3. Графики переходных процессов режима подъема закрытого грейфера

К электроприводам механизмов передвижения крана, поворота крана и изменения вылета стрелы крана не предъявляются высокие требования по точности регулирования скорости электродвигателей. Поэтому соответствующие преобразователи частоты настроены на режим скалярного управления без применения датчиков скорости.

Описанные решения показали свою работоспособность и позволили успешно ввести кран в промышленную эксплуатацию в сжатые сроки.

4.4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МОСТОВОГО КРАНА С ГРЕЙФЕРНЫМ ЗАХВАТОМ

Мостовой кран грузоподъемностью 10 тонн с грейферным грузозахватным устройством предназначен для работы на горнообогатительном комбинате. Его электроприводы и электрооборудование, представляют собой пример экономичного применения высококачественного электрооборудования.

В качестве приводных электродвигателей основных механизмов крана использованы асинхронные электродвигатели фирмы VEM. Для их питания и регулирования скорости применены преобразователи частоты серии ACS800, фирмы ABB, в варианте без рекуперации энергии [84], [85], [86], [87].

Силовая схема питания электроприводов построена с использованием одного группового источника – выпрямителя звена постоянного тока.

Для электроприводов лебедок механизмов подъема и замыкания грейфера и передвижения тележки применены индивидуальные инверторы, а для двухдвигательного электропривода передвижения крана – групповой инвертор.

Регулирование скорости электродвигателей механизмов подъема и замыкания производится в режиме векторного управления с использованием импульсных датчиков скорости, а регулирование скорости электродвигателей механизмов передвижения крана и тележки – в режиме скалярного управления по закону U/f = const.

Общая система управления электроприводами крана построена без применения специальных программируемых устройств управления. Осуществлено максимальное использование возможностей программируемых систем микропроцессорного управления преобразователей частоты. Управляющие сигналы задания скоростей механизмов крана от командоаппаратов типа «джойстик» поступают непосредственно на входы систем управления преобразователей частоты соответствующих электроприводов. Упрощенная визуализация управления механизмами производится в кабине управления крана с помощью навесной панели сигнализации. В ее состав входят сигнальные лампочки и измерительные приборы.

Электрооборудование электроприводов и схемы ввода питания скомпоновано в нескольких шкафах управления. Они установлены открыто, на мосту крана.

Все вышеописанные решения по электроприводам этого крана могут быть рекомендованы для применения при разработке новых или реконструкции действующих кранов подобного типа. Их использование целесообразно, когда требуется максимально снизить величину начальных материальных и финансовых затрат.

4.5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПОРТАЛЬНОЙ СКРАПОЗАВАЛОЧНОЙ МАШИНЫ

Полупортальная скрапозавалочная машина (кран) предназначена для загрузки металлоломом кислородных конверторов с использованием специальных совков, транспортировки пустых совков и установки их на тележки скраповозов. Особенностью этих машин является то, что две такие машины предназначены для обслуживания трех конверторов в конверторном цехе металлургического комбината. Это обстоятельство предъявляет к электрооборудованию завалочных машин повышенные требования по надежности, аналогичные требованиям к основному электрооборудованию механизмов конверторов. Их производительность определяет производительность всего металлургического комбината.

Механическое оборудование каждой скрапозавалочной машины представляет собой полупортальную конструкцию с одной обычной опорой, передвигающейся на колесах по рельсам на уровне нулевой отметки цеха. Второй опорой машины являются колеса на рельсах, расположенных на уровне подкрановых путей цеха. На этой конструкции установлены две независимые грузоподъемные тележки, каждая из которых оснащена двумя подъемными лебедками, предназначенными для манипулирования совками. Основные электроприводы завалочной машины предназначены для механизмов подъема совков, передвижения тележек и всей машины.

Для повышения надежности работы машины питание электрооборудования каждой подъемной тележки производится автономно от двух разных систем троллеев. Установка электрооборудования электроприводов каждой тележки, с той же целью, на скрапозавалочной машине выполнена в двух электропомещениях. Это дает возможность при аварийном выходе из строя элементов электрооборудования одной из подъемных тележек сохранить возможность работы машины одной тележкой с некоторым снижением производительности.

Приводные электродвигатели механизмов подъема, передвижения тележек и машины – асинхронные, короткозамкнутые фирмы VEM. Для питания и регулирования скорости электродвигателей применены рекуперативные преобразователи частоты повышенной точ-

ности новой серии Sinamics S120 фирмы SIEMENS [83] в модульном исполнении.

Система управления электроприводами скрапозавалочной машины построена с применением программируемого контроллера Simatic S7-300, с центральным процессором, установленным в кабине управления и двумя одинаковыми комплектами модулей удаленного ввода-вывода, размещенными в электропомещениях тележек. Таким образом, система управления каждой из тележек может функционировать автономно даже при полном выходе из строя электрооборудования второй тележки. Кроме этого, четыре приводных электродвигателя передвижения машины (по два с каждой стороны) получают питание и управляются по два с разных сторон машины из двух разных электропомещений. Таким образом, обеспечивается работа конвертора в аварийной ситуации, при некотором увеличении времени его загрузки одним совком.

Повышенная надежность работы электрооборудования завалочной машины гарантируется и показанной на рис. 4.4 схемой питания ее электроприводов. Предусмотрено соответствующее резервирование элементов силовой схемы многодвигательного электропривода завалочной машины. Кроме того, электрооборудование каждого электропомещения может работать автономно.

На схеме рис. 4.4 обозначено: ЭП1, ЭП2 – электропомещения; 1М1–1М6, 2М1–2М6 – приводные электродвигатели; 1UZ1, 1UZ2, 2UZ1, 2UZ2 – выпрямители звена постоянного тока; 1UZ3–1UZ6, 2UZ3–2UZ6 – инверторы, модули питания электродвигателей; 1QS1, 1QS2, 1QS4, 1QS5, 2QS1, 2QS2, 2QS4, 2QS5 – рубильники; ,1QS3, 2QS3 – рубильники со встроенными предохранителями; 1QF1, 2QF1 – автоматические выключатели; 1KM1, 1KM2, 1KM3, 2KM1, 2KM2, 2KM3 – контакторы; 1QS6–1QS9, 2QS6–2QS9 – переключатели.

Из схемы видно, что резервирование начинается с электрооборудования каждого электропомещения, которое может быть подключено к любому из двух троллейных вводов.

Для питания электродвигателей применена схема с групповым звеном постоянного тока, выпрямители которого рассчитаны на питание всех инверторов электроприводов электропомещения. При этом в каждом электропомещении установлены по два комплекта выпрямительного электрооборудования – рабочий и резервный. К любому из них могут быть подключены все инверторы электроприводов.

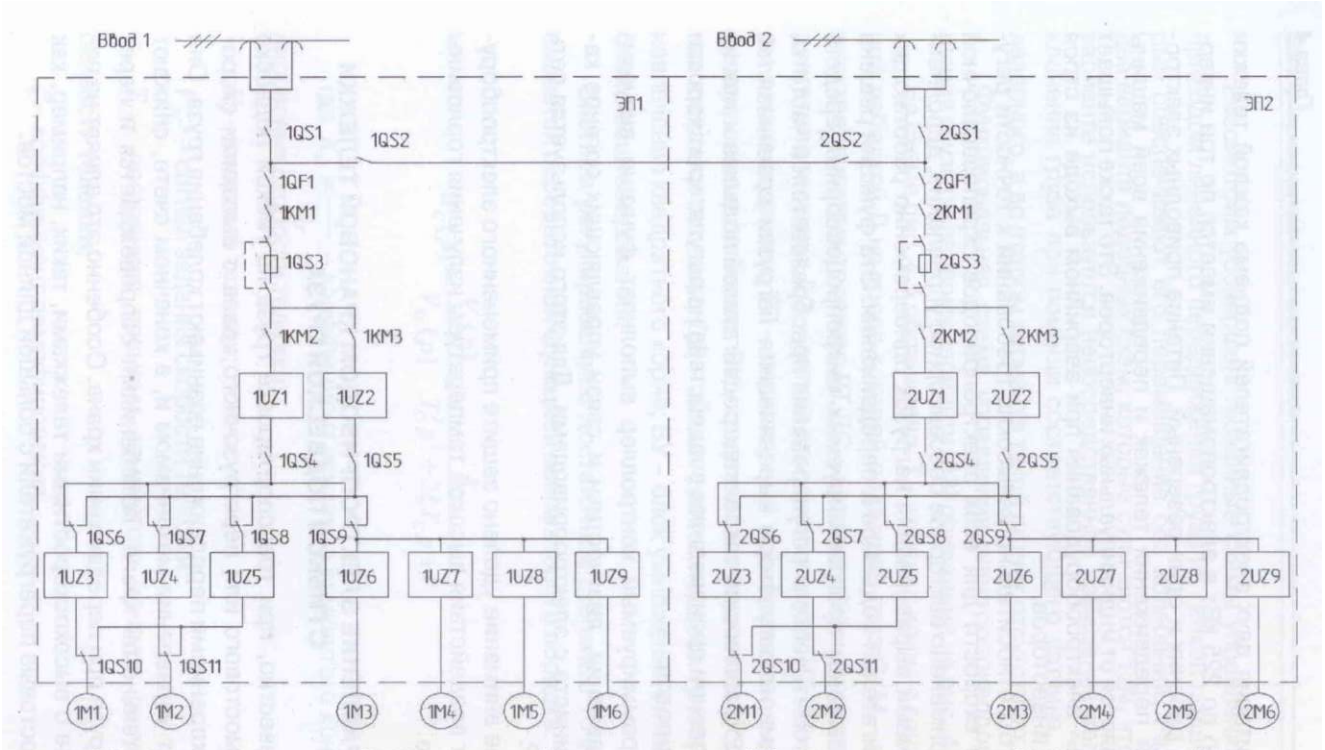


Рис. 4.4. Однолинейная схема питания электроприводов скрапозавалочной машины

Для питания двух электродвигателей подъема каждой тележки мощностью по 225 кВт в электропомещении имеется по три инвертора – два рабочих и один резервный. Питание приводных электродвигателей передвижения тележек и передвижения всей машины осуществляется от индивидуальных инверторов. Это также повышает «живучесть» электрооборудования при аварийном выходе из строя отдельных инверторов.

С учетом относительно невысоких требований к точности регулирования скорости для всех электроприводов скрапозавалочной машины применено векторное бессенсорное управление, дополненное системами выравнивания нагрузок одновременно работающих электродвигателей подъемов и передвижения. Эта функция решена с использованием программируемых микропроцессорных средств систем автоматического регулирования преобразователей частоты. В программном регуляторе выравнивания нагрузки сравниваются активные составляющие токов электродвигателей подъема и при их рассогласовании производится воздействие на регуляторы скорости электроприводов.

Программируемый контроллер выполняет функции визуализации управления, диагностики и связи управляющих органов кабины машиниста с электроприводами. Для этого используется сеть Profibus DP.

Особое внимание уделено защите примененного электрооборудования от воздействия высокой температуры излучения горловины конвертора.

4.6. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КРАНОВОЙ ТЕЛЕЖКИ С ГИБКОЙ ПОДВЕСКОЙ ГРУЗА

Как известно, при транспортировке груза на гибкой подвеске тележкой мостового или перегрузочного крана с высокими скоростями и ускорениями передвижения возникают колебания груза. Они затрудняют управления механизмом и, в конечном счете, снижают производительность крана. Колебаниями сопровождается и перемещение груза при передвижении крана. Особенно это влияет на работу кранов с высокоскоростными тележками, таких, например, как мощные мостовые перегружатели с большой длиной мостов.

Рассмотрим усовершенствованные схемы управления электроприводом линейного передвижения груза на гибкой подвеске, которые обеспечивают его перемещение без колебаний. Разработаны два варианта подобных схем, которые отличаются тем, что в первом варианте используется непосредственное измерение величины отклонения груза при помощи соответствующего датчика, например, лазерного, а во втором варианте такой датчик отсутствует.

Функциональная схема управления электроприводом перемещения груза по первому варианту [92] приведена на рис. 4.5.

На схеме рис. 4.5 обозначено: Т – тележка крана с грузоподъемной лебедкой Л на тросе которой подвешен груз G; М – приводной электродвигатель тележки; ДТ, ДС – датчики тока и скорости электродвигателя тележки; ДО – датчик отклонения груза; РТ, РС – регуляторы тока и скорости; ТП – тиристорный преобразователь; БС – блок суммирования сигналов; ЗИ – задатчик интенсивности; ЗС – задатчик скорости тележки; ДД – датчик длины подвеса груза; БК – блок извлечения квадратного корня; БУ – блок умножения сигналов; БМ – блок масштабирования.

Система регулирования с достаточной степенью точности описывается передаточной функцией звена второго порядка:

$$W_C(p) = \frac{V_T(p)}{V_{ЗТ}(p)} = \frac{K_C}{T_C^2 p^2 + 2\xi T_C p + 1}, \qquad (4.1)$$

где $K_C = \frac{V_T}{V_{ЗТ}}$ – коэффициент усиления замкнутого контура регулирования скорости тележки;

V_T – скорость тележки;

$V_{ЗС}$ – сигнал задания скорости тележки;

T_C – постоянная времени замкнутого контура регулирования скорости тележки;

ξ – коэффициент демпфирования.

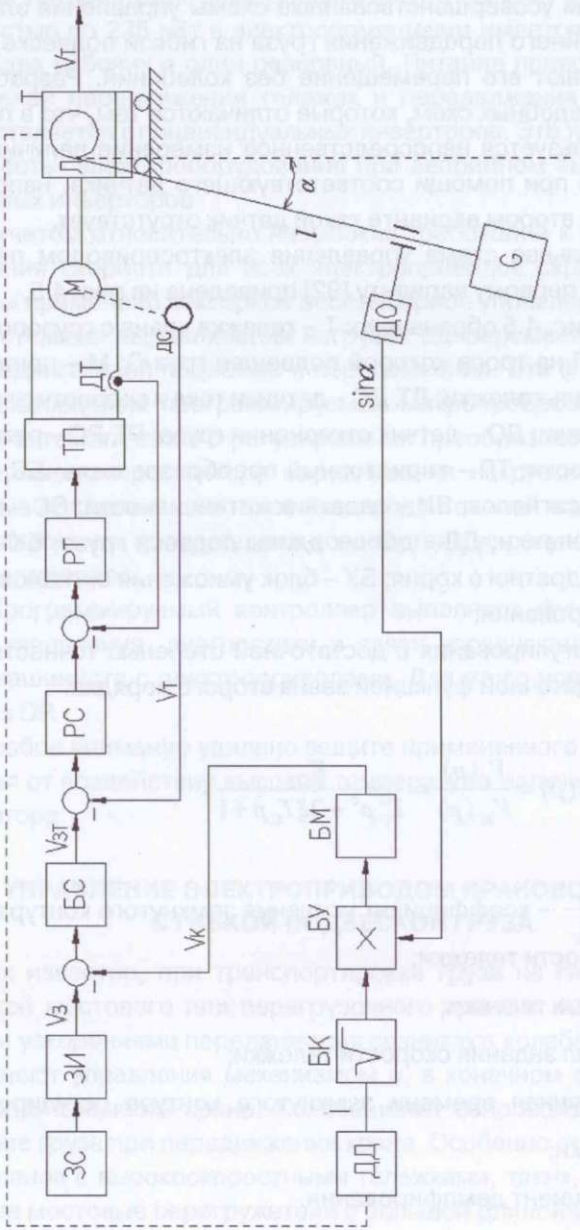


Рис. 4.5. Функциональная схема управления электроприводом перемещения тележки с применением датчика отклонения

Движение подвешенного груза описывается консервативным звеном:

$$W_Г(p) = \frac{V_Г(p)}{V_Т(p)} = \frac{1}{T_К^2 p^2 + 1}, \quad (4.2)$$

в котором $V_Г$ – скорость груза; $T_К$ – постоянная времени звена, равная периоду собственных колебаний груза

$$T_К = \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (4.3)$$

где l – длина подвеса; g – ускорение свободного падения.

Резонансная частота консервативного звена равна

$$\omega_р = \frac{1}{T_К} = \frac{1}{\sqrt{\frac{l}{g}}} = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4.4)$$

Ускорение груза в результате воздействия на него силы, возникающей при отклонении подвеса от вертикали равно

$$\frac{dV_Г}{dt} = g \cdot \sin\alpha, \quad (4.5)$$

где α – угловое отклонение подвеса.

При работе электропривода тележки на выходе блока БМ формируется сигнал коррекции скорости движения тележки в соответствии с выражением

$$V_К = K_К \sqrt{gl} \sin\alpha, \quad (4.6)$$

в котором $K_К$ – коэффициент усиления блока БМ. Это выражение с учетом (4.3) и (4.5) преобразуется к виду

$$V_К = K_К \cdot T_К \frac{dV_Г}{dt}. \quad (4.7)$$

Сигнал, пропорциональный V_K – (4.7), подается на вход блока БС, где суммируется с заданием скорости тележки $V_З$, который сформирован в ЗИ.

Постоянная времени T_K, как правило, значительно превышает величину T_C. Поэтому можно пренебречь влиянием колебаний груза на скорость тележки. Тогда систему регулирования следует представлять так, что в ее прямом канале последовательно включены контур регулирования скорости с передаточной функцией (4.1) и звено с передаточной функцией (4.2). В канале обратной связи содержится дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_{OC} = \frac{V_K(p)}{V_Г(p)} = T_{OC} \cdot p, \qquad (4.8)$$

где $T_{OC} = K_K \cdot T_K$ – постоянная времени дифференцирования.

Работа схемы происходит следующим образом. Из состояния покоя после подачи сигнала задания скорости от ЗС на выходе ЗИ формируется линейно нарастающий сигнал задания скорости $V_З$, который определяет начало движения тележки со скоростью, пропорциональной этому сигналу.

При движении тележки из состояния покоя подвес, удерживающий груз, отклоняется от вертикали на некоторый угол, в результате чего возникает сила, под действием которой груз также начинает движение. На выходе датчика отклонения ДО возникает сигнал, пропорциональный синусу угла отклонения. При этом на выходе блока БМ формируется сигнал коррекции задания скорости V_K в соответствии с выражением (4.6). Этот сигнал подается на вход блока БС с противоположным знаком сигналу задания скорости $V_З$, тем самым, уменьшая результирующий сигнал задания скорости $V_З$. Благодаря этому, движение груза осуществляется плавно, без колебаний скорости груза как при разгоне (торможении), так и при постоянной скорости движения тележки. При этом устраняются колебания тока электродвигателя, что снижает его нагрев и потери энергии при работе электропривода.

Функциональная схема управления электроприводом перемещения груза по второму варианту, без применения датчика отклонения груза [93] приведена на рис. 4.6, где в дополнение к обозначениям рис. 4.5 обозначены интеграторы БИ1, БИ2.

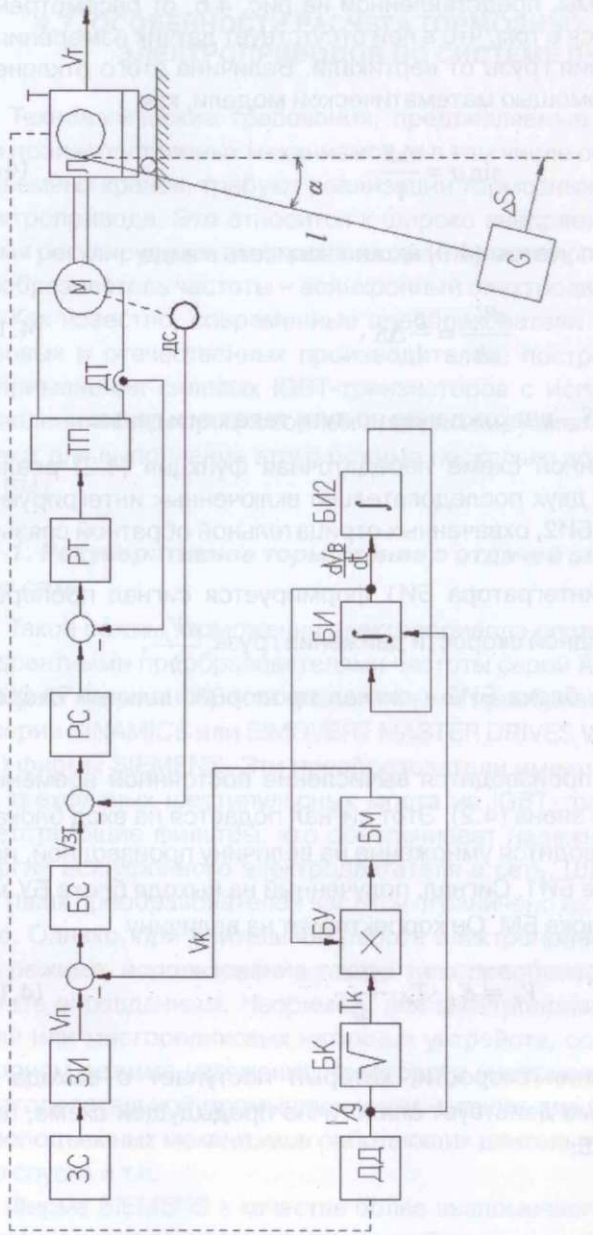


Рис. 4.6. Функциональная схема управления электроприводом перемещения тележки без применения датчика отклонения

Отличие схемы, представленной на рис. 4.6, от рассмотренной ранее заключается в том, что в ней отсутствует датчик измерения величины отклонения груза от вертикали. Величина этого отклонения вычисляется с помощью математической модели, как

$$\sin\alpha = \frac{\Delta S}{l}. \qquad (4.9)$$

Теперь (4.5) с учетом (4.9) можно записать в виде

$$\frac{dV_Г}{dt} = \frac{g}{l}\Delta S, \qquad (4.10)$$

в котором ΔS – расхождение по пути тележки и груза.

В предложенной схеме передаточная функция (4.2) реализуется с помощью двух последовательно включенных интегрирующих устройств БИ1 и БИ2, охваченных отрицательной обратной связью.

На выходе интегратора БИ1 формируется сигнал пропорциональный производной скорости движения груза $\frac{dV_Г}{dt}$,

а на выходе блока БИ2 – сигнал пропорциональный скорости груза $V_Г$.

В блоке БК производится вычисление постоянной времени T_K консервативного звена (4.2). Этот сигнал подается на вход блока БУ, в котором производится умножение на величину производной, полученную на выходе БИ1. Сигнал, полученный на выходе блока БУ, масштабируется в блоке БМ. Он корректирует на величину

$$V_K = K_K \cdot T_K \cdot \frac{dV_Г}{dt} \qquad (4.11)$$

сигнал задания скорости, который поступает с выхода ЗИ. В остальном схема действует аналогично предыдущей схеме, показанной на рис. 4.5.

4.7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СИСТЕМЕ ПЧ-АД

Технологические требования, предъявляемые к электроприводам производственных механизмов, и в том числе особо механизмов подъемных кранов, требуют реализации тормозных режимов работы электропривода. Это относится к широко внедряемым в настоящее время регулируемым электроприводам переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД).

Как известно, современные преобразователи частоты ведущих мировых и отечественных производителей, построенные на основе применения силовых IGBT-транзисторов с использованием для управления микропроцессорных программируемых устройств, предлагают для выполнения этого режима несколько возможных вариантов [94].

1. Рекуперативное торможение с отдачей энергии в питающую сеть

Такой режим торможения электропривода реализуется четырехквадрантными преобразователями частоты серий ACS611, ACS617 и AC800-17 фирмы ABB или аналогичными преобразователями частоты серии SINAMICS или SIMOVERT MASTER DRIVES VC (отрезок серии AFE) фирмы SIEMENS. Эти преобразователи имеют в своем составе два трехфазных шестипульсных моста на IGBT-транзисторах и соответствующие фильтры, что обеспечивает надежную рекуперацию энергии асинхронного электродвигателя в сеть. Широкое применение таких преобразователей частоты ограничено их высокой стоимостью. Однако, при длительной работе электропривода в генераторном режиме, использование такого типа преобразователей следует считать оправданным. Например, для электроприводов разматывателей или многороликовых натяжных устройств, создающих в генераторном режиме натяжение полосового материала в металлургии, бумагоделательной промышленности, а также для электроприводов грузоподъемных механизмов работающих длительно в режиме силового спуска и т.п.

Фирма SIEMENS в качестве более экономичного варианта рекуперативных четырехквадрантных преобразователей частоты предла-

гает еще один отрезок серии преобразователей SIMOVERT MASTER DRIVES VC. Представители этого отрезка серии выполнены на основе реверсивного трехфазного шестипульсного тиристорного преобразователя и инвертора на IGBT-транзисторах. Такие преобразователи частоты несколько дешевле, но требуют для обеспечения надежности работы в режиме инвертирования подключение к сети одного из выпрямительных мостов тиристорного преобразователя через специальный согласующий трансформатор или автотрансформатор, что усложняет схему электропривода. С появлением преобразователей частоты серии SINAMICS применение таких преобразователей можно считать нецелесообразным.

2. Динамическое торможение

Этот режим реализуется путем подачи постоянного тока в обмотку статора электродвигателя от звена постоянного тока в качестве источника и инвертора на IGBT-транзисторах для регулирования величины этого тока. Такой способ торможения асинхронного электропривода используется в преобразователях частоты серий Altivar 58 и Altivar 68 фирмы Schneider Electric. Этот способ реализации тормозного режима электропривода достаточно просто программно осуществляется и не требует никакого дополнительного электрооборудования. Вместе с тем ему присущи все недостатки режима обычного динамического торможения асинхронного электродвигателя, то есть зависимость тормозного момента от скорости электродвигателя и небольшое значение тормозного момента при малой скорости перед остановкой. Это ограничивает его применение в тех случаях, когда по условиям работы механизма в режиме торможения требуется получить определенный закон изменения скорости.

3. Торможение с отдачей энергии в тормозной резистор

Такой, наиболее широко применяемый режим торможения электропривода по системе ПЧ-АД осуществляется посредством подключения при помощи специального коммутатора (ключа) тормозного резистора к напряжению звена постоянного тока преобразователя. При превышении во время торможения ЭДС приводного электродвигателя величины выходного напряжения инвертора начинается заряд конденсатора звена постоянного тока через шунтирующие диоды инвертора. После достижения величины напряжения на кон-

денсаторе уставки ключ срабатывает автоматически и подключает тормозной резистор. Начинается рекуперация энергии в тормозной резистор. Этот режим торможения предусматривается в серийных преобразователях частоты многих отечественных и зарубежных производителей: MICROMASTER, SINAMICS и SIMOVERT MASTER DRIVES VC (SIEMENS), Altivar 58 и Altivar 68 (Schneider Electric), ACS600 и ACS800 (ABB), REFUdrive500 (Rexroth Bosch Group) и Sysdrive 3G3RV (OMRON), ТРИОЛ и др.

Методика определения параметров и выбора тормозных модулей (ключей) и тормозных резисторов для практического использования зависит от технологических требований, предъявляемых к тормозному режиму механизма. Практика показала, что с этой точки зрения следует различать, по крайней мере, два граничных варианта.

Первый вариант использования рассматриваемого режима торможения – это его применение для полной остановки или частичного снижения скорости – (подтормаживание) электропривода по заданному закону. Чаще всего в практике используется линейный закон изменения скорости во времени.

Максимальная мощность, которую нужно выделить при торможении, без учета влияния статического момента, определяется максимумом запасенной кинетической энергии электромеханической системы

$$W = \frac{J\omega^2_{\max}}{2} \qquad (4.12)$$

и величиной требуемого темпа снижения скорости. При линейном изменении скорости по закону:

$$\omega = \omega_{\max} - bt, \qquad (4.13)$$

где замедление

$$b = \frac{\omega_{\max}}{t_T} \qquad (4.14)$$

зависит от требуемого времени торможения, мощность определяется выражением

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{J\omega_{\max}^2}{t_T}\left(\frac{t}{t_T} - 1\right). \quad (4.15)$$

Для максимального значения мощности в начале торможения имеем

$$P_{\max} = \frac{J\omega^2{}_{\max}}{t_T}, \quad (4.16)$$

откуда ее среднее значение, за время торможения до полной остановки, определяется как

$$P_{cp} = \frac{J\omega^2{}_{\max}}{2t_T}. \quad (4.17)$$

Величина сопротивления тормозного резистора для рассеивания максимальной мощности, без учета потерь в обмотках электродвигателя и ключе:

$$R_T = \frac{U_0{}^2}{P_m}, \quad (4.18)$$

где U_0 – напряжение срабатывания ключа. Максимальный ток через тормозной резистор

$$I_{\max} = \frac{U_0}{R_T}. \quad (4.19)$$

Величины R_T, $I_{\max}$ и t_T дают возможность выбрать тормозной резистор, принимая во внимание, что в процессе торможения мощность снижается от величины $P_{\max}$ до нуля.

Пренебрежение влиянием статического момента, когда последний является тормозным, обеспечивает расчетный запас при определении элементов цепи торможения. Если же знак статического момента совпадает с направлением движения электропривода, учет его действия обязателен.

Второй вариант использования режима торможения – это применение его для обеспечения относительно длительного генераторного режима работы электропривода, например, при спуске груза, движении транспортного средства под уклон или по ветру, создании тормозного натяжения и т.п.

В этом случае мощность, которую необходимо рассеивать в тормозном резисторе во время торможения, полностью определяется мощностью, которую должен развить электропривод, работая в генераторном режиме. Эта мощность определяется применительно к конкретному рассматриваемому случаю.

Так, например, для спуска груза с линейной скоростью V требуемая мощность электропривода

$$P = m_{\Sigma} g V \eta \,, \qquad (4.20)$$

где η – приведенный КПД передачи;

$m_{\Sigma} = m_{Г} + m'_{МЕХ} + m'_{ДВ}$ – суммарная масса, включающая в себя массу груза и приведенные массы механизма и двигателя.

Для случая создания генераторного натяжения F разматывающего устройства полосового материала при скорости V требуемая мощность электропривода

$$P = FV\eta \,. \qquad (4.21)$$

Сопротивление тормозного резистора для рассеивания мощности P, полученной из выражений (4.20) и (4.21), определяется, как и в первом варианте, зависимостью (4.18), а ток – зависимостью (4.19). В данном случае это не максимальная величина тока, а ток, длительно протекающий через тормозной резистор в течение всего времени существования генераторного режима.

По полученным значениям R и I, с учетом длительности режима торможения, выбирается тормозной резистор. В качестве тормозных резисторов могут использоваться блоки резисторов отечественного (ЯС3, ЯС4) или импортного производства. Выбор определяется требуемыми габаритными размерами тормозных резисторов и их стоимостью.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ СЕМЕЙСТВА SINAMICS ФИРМЫ SIEMENS

Современный уровень промышленного производства предъявляет все более высокие требования к электроприводам, в развитии которых можно проследить некоторые основные тенденции, а именно:

– усложнение и многообразие вариантов рабочих машин и производственных установок, особенно многодвигательных, ведет к тому, что поставляемые электроприводы должны иметь широкий диапазон основных параметров и характеристик, а также высокую степень адаптивности;

– в общем спектре требований, выдвигаемых промышленным производством, все большее значение приобретают эксплуатационная надежность, простота в наладке, вводе в действие и дальнейшей эксплуатации.

Для техники разработки и внедрения электроприводов эти тенденции могут означать следующее:

– применение только таких технических средств, функциональные возможности которых максимально соответствуют требованиям и условиям эксплуатации производственных механизмов;

– снижение расходов на инженерную подготовку, проектирование и ввод в промышленную эксплуатацию;

– использование в разработках современных технических средств электроприводов для решения задач любой степени сложности.

С выходом на рынок электроприводов новой серии преобразователей частоты SINAMICS, фирма SIEMENS предлагает платформу для максимального удовлетворения требований, которые выдвигаются современным уровнем развития промышленного производства [88].

Особенностью преобразователей частоты SINAMICS является высокая модульность конструкции, которая предоставляет дополнительные удобства разработчикам нестандартных регулируемых электроприводов. В частности, впервые система управления преобразователем и система управления координатами электропривода выделены в отдельный модуль управления.

Преобразователи частоты нового семейства SINAMICS представляют собой широкую гамму устройств, предоставляющих проектировщикам большие возможности для конструирования регулируемых электроприводов промышленных механизмов различного назначения.

Преобразователи условно делятся на две группы – предназначенные для работы с электродвигателями низкого (до 1000 В) напряжения и для работы с электродвигателями высокого (свыше 1000 В) напряжения. В каждую из упомянутых групп входит несколько серий преобразователей. Далее будут рассматриваться только преобразователи частоты низкого напряжения.

Данную группу образуют семь серий преобразователей, а именно SINAMICS G110, 120, 120D, 130, 150; SINAMICS S120, S150. Рассмотрим далее возможности их использования.

Преобразователи частоты серии G110

В эту серию входят преобразователи частоты малой мощности. Они могут найти широкое применение для решения простых задач регулирования скорости таких механизмов, как, например, насосы и вентиляторы, регулируемые электроприводы в пищевой, легкой и других отраслях промышленного производства (ленточные конвейеры и другие механизмы); маломощные вспомогательные приводы производственных механизмов, электроприводы открывания дверей, ворот, центрифуг, вращения бигбордов, электроприводы медицинского оборудования (механизмы подъема и поворота операционных столов и др.), электроприводы бытовой техники.

Преобразователи частоты этой серии отличает компактность, простота монтажа и наладки, дешевизна, низкий уровень шума электродвигателя.

Основные технические данные:

– напряжение питания – однофазное, 200–240 В, 47–63 Гц;

– диапазон мощностей – от 0,12 кВт до 3 кВт;

– выходная частота – 0–650 Гц;

– коэффициент мощности – 0,95, КПД – 0,9–0,95;

– перегрузка – 1,5 $I_н$ в течение 60 с в цикле 300 с, при нагрузке до 0,85 $I_н$ в течение остальных 240 с;

– частота коммутации ШИМ инвертора – 2–12 кГц.

Регулирование скорости электродвигателя может производиться по линейному закону постоянства U/f, квадратичному закону или путем параметрического задания закона U/f. Режим динамического торможения реализуется без внешнего резистора, но без рекуперации энергии в сеть.

Конструктивное исполнение – компактная конструкция типа шасси, исполнение – IP20, охлаждение воздушное естественное. Рабочая температура от –10° до +40° С при влажности до 95%.

При необходимости комплектно с преобразователями могут поставляться в качестве опций компоненты цепи питания и цепи подключения электродвигателя (реакторы, фильтры и т.п.), а также малогабаритная операторская панель для параметрирования и индикации.



Преобразователи частоты серии G110

Преобразователи частоты серии G120

Серия преобразователей частоты G120 в определенной степени является усовершенствованием и развитием серии Micromaster 440. Отличия новой серии заключается в модульности конструкции, новой концепции системы охлаждения, простоте монтажа и ввода в действие, наличии рекуперации энергии в сеть при четырехквадрантном режиме работы. Это универсальный модульный преобразователь, который найдет массовое применение для широкого спектра промышленных механизмов.

Некоторыми областями применения преобразователей частоты этой серии являются:

– электроприводы насосов, вентиляторов, компрессоров, требующие регулирования скорости;

– торговая техника;

– промышленное производство: текстильное производство, машиностроение, химическая промышленность, полиграфия, металлургия;

– электроприводы передвижения кранов и крановых тележек.

Каждый преобразователь серии состоит из двух составных частей – модуля управления (Control Unit) и силового модуля (Power Modul).

Четыре исполнения модуля управления типа CU240 отличаются типом сетевой связи (USS, PROFI-BUS, PROFINET) и повышенной безопасностью. Они имеют возможность подключения импульсного датчика для реализации регулирования скорости с обратной связью, а также обеспечивают управление механическим тормозом электропривода.

Силовой модуль имеет три исполнения:

– PM240 на напряжение питания 380–480 В, с тормозным ключом и внешним тормозным резистором;

– PM250 на напряжение 380–480 В, с рекуперацией энергии в сеть;

– PM260 на напряжение 600–690 В, с рекуперацией энергии в сеть.

Основные технические данные:

– диапазоны мощностей:
  от 0,37 кВт до 250 кВт (380–480 В);
  от 0,55 кВт до 55 кВт (600–690 В);
– выходная частота – 0–650 Гц;
– два использования по перегрузке:
  высокая – 1,5 $I_н$ 57 с или 2,0 $I_н$ 3 с, в цикле 300 с;
  низкая – 1,1 $I_н$ 57 с или 1,5 $I_н$ 3 с, в цикле 300 с.

Модули могут легко комбинироваться друг с другом. Это дает возможность создавать электроприводы любой конфигурации, легко адаптируемые для решения задач разной степени сложности. Взаимозаменяемость различных модулей обеспечивает простоту обслуживания и быстрое построение необходимых модификаций в зависимости от потребностей заказчика.

Наличие стандартной функции рекуперации у силовых модулей дает такие дополнительные полезные эффекты, как:

– отсутствие необходимости в дополнительном дорогостоящем оборудовании (например, тормозных блоков и сопротивлений);

– снижение потерь и тепловыделения ;

– компенсация реактивной мощности;

– независимость от колебаний напряжения сети и надежная работа даже при его просадках;

– отсутствие опасности режима «опрокидывания» преобразователя в режиме рекуперации.

Регулирование скорости электродвигателя может производиться по линейному закону постоянства *U/f*, квадратичному закону или путем параметрического задания закона *U/f*. Возможно векторное управление скоростью или моментом с импульсным датчиком скорости и без последнего. Программные возможности системы управления существенно превышают аналогичные возможности серии G110.

Конструктивное исполнение представляет из себя законченную конструкцию обоих модулей типа шасси, причем модуль управления пристраивается к силовому модулю. Исполнение обоих модулей – IP20, охлаждение воздушное естественное. Рабочая температура от –10° до +50° С при влажности до 95%.

При необходимости, комплектно с преобразователями могут поставляться в качестве опций компоненты цепи питания и цепи подключения электродвигателя (реакторы, фильтры и т.п.), а также малогабаритная операторская панель для параметрирования и индикации.



Преобразователи частоты серии G120

Преобразователи частоты серии G120D

Преобразователи выполнены в исполнении со степенью защиты IP65. Они предназначены для децентрализованного использования с установкой непосредственно вблизи приводных электродвигателей промышленных механизмов, в частности, для регулируемых электроприводов протяженных конвейерных систем. Преобразователи обеспечивают рекуперацию энергии в сеть и не требуют использования тормозных резисторов.

Каждый преобразователь серии состоит из двух основных частей – модуля управления и силового модуля.

Основные технические данные:

– напряжение питания – 380–480 В;

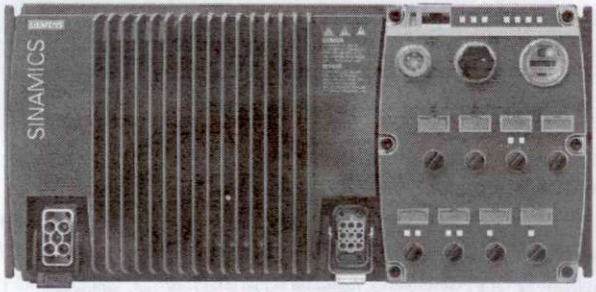
– диапазон мощностей – 0,75–7,5 кВт;

– выходная частота – 0–650 Гц, при управлении по закону постоянства U/f или 0–200 Гц, при векторном управлении;

– перегрузка: 1,5 $I_н$ 60 с или 2,0 $I_н$ 3 с, в цикле 300 с.

Модуль управления обеспечивает регулирование частоты вращения электродвигателя по линейному закону постоянства U/f, квадратичному закону или путем параметрического задания закона U/f. Предусмотрено векторное управление скоростью или моментом с импульсным датчиком скорости и без последнего. Имеется возможность управления механическим тормозом. Для параметрирования электропривода требуется использование программатора или компьютера.

Силовой модуль характеризуется уменьшенным тепловыделением при естественном воздушном охлаждении, пониженным уровнем выделяемых в сеть гармоник, отсутствием необходимости в использовании сетевого реактора.



Преобразователь частоты серии G120D

Преобразователи частоты серии G150

В состав этой серии входят комплектные преобразователи частоты в шкафном исполнении. Эти преобразователи выполняются примерно в том же диапазоне мощностей и предназначены для такого же применения, как и модульные преобразователи серии G130.

Этf серия изготавливается и поставляется в двух вариантах комплектации: вариант А – комплектно с компонентами сетевого подключения (дроссели, фильтры, коммутационная аппаратура), и вариант С – без компонентов сетевого подключения, которые должны быть установлены отдельно, например, в составе распределительного устройства.

Основными компонентами преобразователей этой серии являются модуль управления и силовой модуль, аналогично преобразователям предыдущей серии. Модуль управления – CU320, возможности которого описаны выше. Операторская панель AOP30 поставляется комплектно и встроена в дверь шкафа.

Основные технические данные:

– диапазоны мощностей:

110–560 кВт при напряжении 380–480 В,

с расширением до 630–900 кВт при параллельном соединении; 110–560 кВт при напряжении 500–600 В,

с расширением до 630–1000 кВт при параллельном соединении; 75–800 кВт при напряжении 660–690 В,

с расширением до 1000–1500 кВт при параллельном соединении;

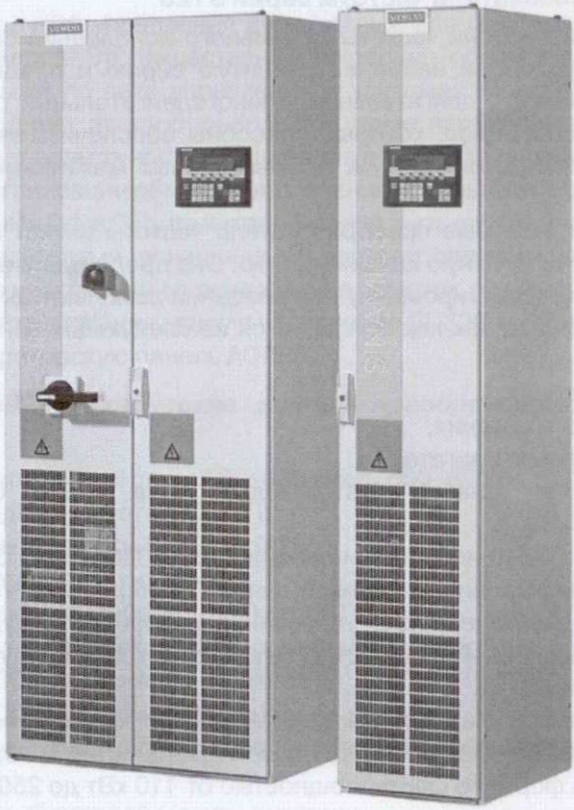
– выходная частота – 0–300 Гц;

– два варианта использования по перегрузке:

высокая – 1,5 I_H 60 с или 1,6 I_H 10 с в цикле 300 сек;

низкая – 1,1 I_L 60 с или 1,5 I_L 10 с в цикле 300 сек.

Программируемая система управления обеспечивает регулирование скорости электродвигателя по закону постоянства U/f, а также векторное управление с использованием датчика импульсов и без последнего.



Преобразователи частоты серии G150

Конструктивное исполнение преобразователей – шкафы одностороннего обслуживания, степень защиты – IP20, а по заказу – до IP54. Охлаждение – воздушное принудительное, форсированное. Рабочая температура – от 0° до +40°С.

При необходимости, комплектно с преобразователями могут поставляться в качестве опций компоненты цепи питания, цепи постоянного тока и цепи подключения электродвигателя (реакторы, фильтры, тормозной модуль, тормозные резисторы и т.п.).

Преобразователи частоты серии S120

Преобразователи частоты модульного исполнения серии S120 представляют собой наиболее развитую серию и предназначены для создания однодвигательных и многодвигательных регулируемых электроприводов, которые способны обеспечить выполнение требований широкого класса промышленных механизмов любого назначения.

Рассматриваемые преобразователи частоты имеют принципиально новую модульную конфигурацию. Она предоставляет широкие возможности проектировщику при создании комплектных частотных электроприводов, так как компонуется из следующих основных модулей:

– управления;
– сетевого питания;
– управления двигателем.

Модули управления – это модули типа CU310, CU 320 и SIMOTION.

Модуль CU310 имеет два исполнения: CU310DP и CU310DN, которые отличаются видом сетевой связи – Profibus или Profinet. Эти модули предназначены для управления силовыми модулями типа Power Modules, PM340, в комплекте с которыми они образуют первый отрезок серии S120.

Силовые модули Power Modules изготавливаются в исполнении IP20 в «книжном» формате в диапазоне мощностей от 0,12 кВт до 90 кВт или в формате шасси мощностью от 110 кВт до 250 кВт. В состав этих модулей входит неуправляемый выпрямитель, конденсатор звена постоянного тока и инвертор на базе IGBT-транзисторов.

Преобразователи имеют трехфазное напряжение питания – 200–240 В для мощности от 0,12 кВт до 0,75 кВт или 380–480 В для мощности от 0,37 кВт до 250 кВт.

Выходная частота преобразователей 0–650 Гц для сервоуправления и 0–300 Гц при векторном управлении или при управлении по закону U/f = Const.

Перегрузка этих преобразователей достаточно высокая и зависит от конструктивного исполнения и от нагрузки двигателя, предшествовавшей появлению перегрузки.

Модуль типа CU320 предназначен для управления другими, нижеописанными модулями преобразователей частоты, включая до

четырех модулей управления двигателями для многодвигательного электропривода. Это существенно сокращает объем и скорость обмена данными по сети управления и улучшает качество регулирования координат электропривода. В случае необходимости модуль CU320 имеет возможность расширения дополнительными платами.

Для организации обмена и управления используется специализированная сеть Drive Cliq, по которой может быть осуществлена связь с электродвигателями, оснащенными соответствующим интерфейсом (получение информации о температуре обмоток, подшипников и др.). Для параметрирования модуля управления CU320 возможно использовать операторскую панель AOP30.

Основные технические данные преобразователей серии S120:

– напряжение питания 380–480 В или 660–690 В;
– выходная частота 0–300 Гц;
– степень защиты IP00 или IP20;
– охлаждение воздушное;
– рабочая температура от 0 до +40° С;
– высота установки без снижения мощности:
до 1000 м («книжный формат»);
до 2000 м (формат шасси).

К основным компонентам преобразователей частоты относятся следующие:

– базовый сетевой модуль питания;
– малый сетевой модуль питания;
– активный сетевой модуль в «книжном» формате;
– активный сетевой модуль в формате шасси;
– однодвигательный модуль в «книжном» формате;
– двухдвигательный модуль в «книжном» формате;
– однодвигательный модуль в формате шасси.

Базовый сетевой модуль питания конструктивно выполнен в формате шасси и предназначен для создания одноквадрантных преобразователей частоты с рекуперацией энергии в тормозной резистор. В состав этого модуля входит нереверсивный тиристорный выпрямитель, звено постоянного тока и устройство зарядки конденсаторов.

Основные технические данные модуля:

– диапазоны мощностей – 200–710 кВт при напряжении питания 380–480 В (5 типоразмеров);

– 250–1100 кВт при напряжении питания 660–690 В (5 типоразмеров).

Конструкция модуля – шасси, со степенью защиты IP00 с встроенным вентилятором охлаждения, для установки в шкафу или на открытом щите управления.

Малый (Smart) сетевой модуль питания включает в себя четырехквадрантный выпрямитель на базе IGBT-транзисторов и звено постоянного тока и предназначен для создания преобразователей частоты небольшой мощности, с рекуперацией энергии в тормозных режимах.

Основные технические данные модуля:

– диапазон мощностей – 5–36 кВт;

– напряжение 380–480 В.

Управление модулями мощностью до 10 кВт включительно осуществляется с использованием входных и выходных сигналов, а модулями большей мощности – по интерфейсу Drive Cliq. На основе модулей большей мощности могут конструироваться многодвигательные электроприводы.

Конструкция – «книжный» формат со степенью защиты IP20, охлаждение воздушное естественное.

Активный сетевой модуль в «книжном» формате по своим основным характеристикам подобен вышеописанному малому сетевому модулю питания, но отличается от него большей мощностью. В состав этого модуля тоже входят четырехквадрантный выпрямитель на базе IGBT-транзисторов и звено постоянного тока, что позволяет использовать его для создания электроприводов с рекуперацией энергии в сеть.

Основные технические данные модуля:

– диапазон мощностей – 16–120 кВт;

– напряжение 380–480 В.

Управление модулями производится по интерфейсу Drive Cliq, что позволяет на основании этих модулей создавать однодвигательные и многодвигательные электроприводы.

Конструкция – «книжный» формат со степенью защиты IP20, охлаждение воздушное естественное. Все типоразмеры модулей имеют одинаковые высоту и глубину, но отличаются шириной.

Активный сетевой модуль в формате шасси предназначен для конструирования электроприводов средней и большой мощности. Он отличается от ранее рассмотренных сетевых модулей тем, что состоит из двух компонентов – собственно активного сетевого модуля питания и активного интерфейсного модуля питания. Оба эти модуля выполнены в формате шасси.

Активный интерфейсный модуль питания включает в себя сетевые реактор и фильтры, и устройство заряда конденсаторов звена постоянного тока. В состав активного сетевого модуля питания входит четырехквадрантный выпрямитель на базе IGBT-транзисторов звена постоянного тока.

Совместное использование указанных модулей позволяет создание четырехквадрантного электропривода с рекуперацией энергии в сеть в тормозных режимах работы. Имеется возможность при необходимости обеспечить режим компенсации реактивной мощности сети.

Основные технические данные модулей:

Диапазоны мощностей:

– 132–900 кВт при напряжении питания 380–480 В (8 типоразмеров);

– 500–1400 кВт при напряжении питания 660–690 В (4 типоразмера).

Управление модулями производится от модуля управления CU320 по интерфейсу Drive Cliq, что позволяет на основании этих модулей создавать однодвигательные и многодвигательные электроприводы.

Конструкция – шасси со степенью защиты IP20, охлаждение воздушное, принудительное от встроенных вентиляторов.

Однодвигательный модуль в «книжном» формате включает в себя трехфазный мостовой инвертор на базе IGBT-транзисторов. Он предназначен для питания электродвигателей малой мощности. Модуль может быть подключен к звену постоянного тока базового сетевого модуля питания, малого сетевого модуля питания, активного сетевого модуля в «книжном» формате и активного сетевого модуля в формате шасси. Таким образом, образуется законченный преобразователь частоты.

Основные технические данные модулей:

– напряжение питания – 380–480 В;

– номинальный ток – 5–200 А (107 кВт);

– количество типоразмеров – 10.

Управление модулями производится от модуля управления CU320 по интерфейсу Drive Cliq. По этому же интерфейсу может быть получена информация о тепловых параметрах питаемого электродвигателя, если последний оснащен таким интерфейсом.

Модули имеют степень защиты IP20, причем до номинального тока 45 А охлаждение воздушное естественное, а от 45 А и выше – требуется внешний обдув. Все модули имеют одинаковые высоту (380 мм) и глубину (270 мм) и отличаются только шириной.

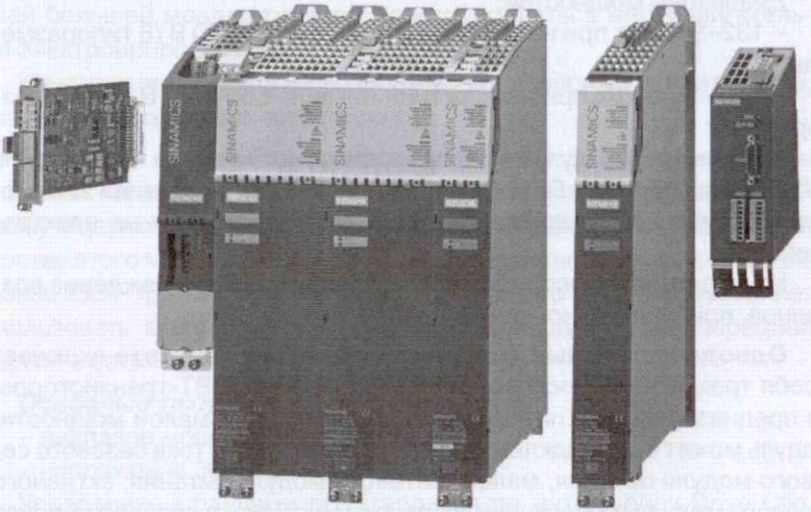
Двухдвигательный модуль в «книжном» формате является разновидностью предыдущего модуля и предназначен для подключения двухдвигательного электропривода.

Основные технические данные модулей:

– напряжение питания – 380–480 В;

– номинальные токи – 2x3 А, 2x5 А, 2x9 А, 2x18 А.

Конструкция аналогична конструкции однодвигательных модулей, степень защиты IP20, охлаждение воздушное естественное.



Модули в книжном формате преобразователей частоты серии S120

Однодвигательный модуль в формате шасси по составу оборудования подобен однодвигательному модулю в «книжном» формате. Основное отличие данного типа модуля заключается в величине мощности, так как этот модуль предназначен для питания электродвигателей средней и большой мощности. Он может быть подключен к звену постоянного тока базового сетевого модуля питания или активного сетевого модуля в формате шасси, образуя законченный преобразователь частоты для однодвигательного электропривода.

Основные технические данные модулей:

Диапазоны номинальных токов:

– 210 А–1405 А (800 кВт) при напряжении питания 380–80 В (11 типоразмеров);

– 95 А–1270 А (1200 кВт) при напряжении питания 600–690 В (16 типоразмеров).

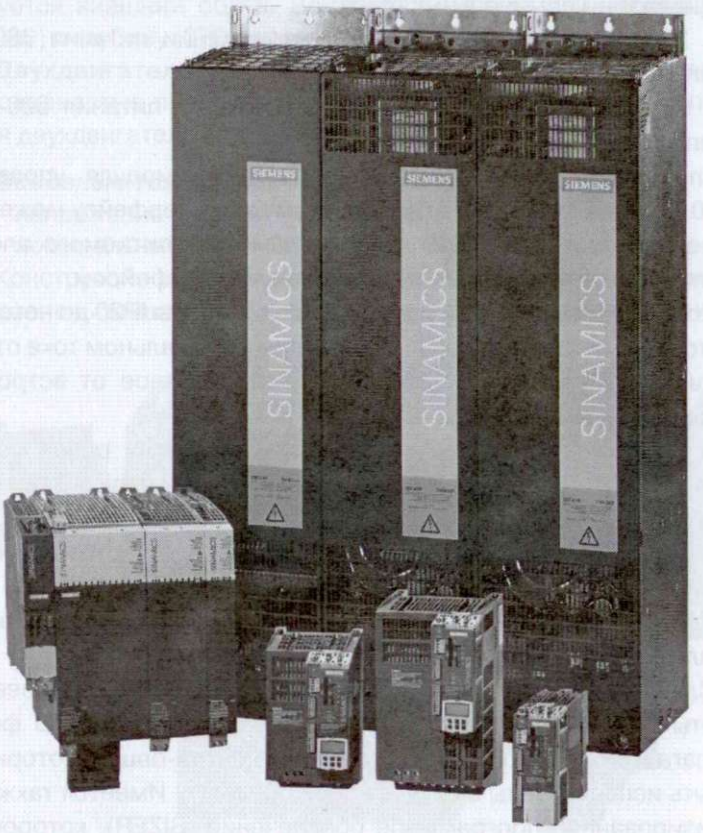
Управление модулями производится от модуля управления CU320 по интерфейсу Drive Cliq. По этому же интерфейсу может быть получена информация о тепловых параметрах питаемого электродвигателя, если последний оснащен таким интерфейсом.

Конструктивно модули имеют степень защиты IP20 до номинального тока 490 А и степень защиты IP00 при номинальном токе от 490 А и выше. Охлаждение – воздушное принудительное от встроенных вентиляторов.

В отличие от преобразователей частоты всех ранее рассмотренных серий, вышеописанные модули серии Sinamics S120 имеют различную перегрузочную способность в разных режимах работы. Поэтому при конструировании преобразователей частоты с использованием этих модулей следует руководствоваться данными об их перегрузочной способности, приведенными в информационных материалах фирмы SIEMENS.

Следует отметить, что для конструирования преобразователей частоты с использованием модулей серии Sinamics S120 фирмой предлагается большое количество компонентов-опций, которые могут быть использованы в случае необходимости. Имеется также специализированное программное обеспечение (SIZER), которое обеспечивает автоматизацию процесса создания требуемой конфигурации конструируемого электропривода.

Отдельно необходимо остановиться на возможностях использования модулей управления SIMOTION. Они обеспечивают, кроме управления преобразователем частоты и управления координатами электропривода, еще и решение технологических задач управления, выходящих за вышеперечисленные рамки. Это может быть система управления мерным резом металла, система противоколебательного управления механизмами крана и т.п.



Модули в формате шасси преобразователей частоты серии S120

Преобразователи частоты серии S150

Преобразователи серии S150 по основным техническим характеристикам аналогичны серии S120. Они отличаются от них тем, что представляют собой полностью законченное изделие в шкафном исполнении, не требующее специальной конструкторской разработки. Эти преобразователи предназначены для питания электродвигателей средней и большой мощности электроприводов различного назначения:

– насосы, вентиляторы, центрифуги;
– прессы, экструдеры, элеваторы;
– конвейерные и транспортные системы, грузоподъемные механизмы кранов;
– текстильные, бумагоделательные машины;
– прокатные станы разных типов и линии обработки полосы;
– высокодинамичные приводы станков, пакетирующих и бумагоделательных машин и др.

Все преобразователи выполнены в четырехквадрантном исполнении, с рекуперацией энергии в сеть в генераторных режимах работы. Они обладают высоким быстродействием, обеспечивают высокую точность регулирования скорости приводных электродвигателей и компенсацию реактивной энергии сети.

В состав преобразователя входят сетевой фильтр, активный сетевой модуль питания на базе IGBT-транзисторов, звено постоянного тока и инвертор на базе IGBT-транзисторов.

Основные технические данные:

– диапазоны мощностей – 110 кВт–800 кВт при напряжении питания 380–480 В (11 типоразмеров);
– 75 кВт–1200 кВт при напряжении питания 600–690 В (16 типоразмеров);
– выходная частота – 0–300 Гц;
– модуль управления – CU320;
– перегрузки:
низкая 1,1 I_L 60 с в цикле 300 с ($I_L = 0{,}97\ I_H$);
высокая 1,5 I_H 60 с в цикле 300 с ($I_H = 0{,}85\ I_H$).

Программируемая система управления модуля CU320 обеспечивает регулирование скорости электродвигателя по закону постоянства U/f, а также векторное управление с использованием датчика импульсов и без последнего.

Конструктивное исполнение преобразователей – шкафы одностороннего обслуживания глубиной 600 мм, степень защиты – IP20, а по заказу – до IP54. Охлаждение – воздушное принудительное, форсированное. Рабочая температура – от 0° до +40° С. Высота установки – до 2000 м, без изменения мощности.



Преобразователь частоты серии S150

П2. СЕРИЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ И ТОКОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ФИРМЫ ABB

Для широкого промышленного применения при конструировании регулируемых электроприводов переменного тока фирма ABB предлагает новую гамму преобразователей частоты с общей маркировкой типоисполнений ACS 800 [84], [85], [86]. По своим техническим характеристикам новые преобразователи частоты превосходят как ранее выпускавшиеся этой же фирмой преобразователи серии ACS600, так и новые некоторых других инофирм. Вся предлагаемая гамма преобразователей частоты разбита на несколько групп, в состав которых входят преобразователи частоты, отличающиеся мощностью, силовыми схемами преобразования и некоторыми другими характеристиками. В совокупности они обеспечивают конструирование регулируемых электроприводов переменного тока с асинхронными и синхронными с возбуждением от постоянных магнитов электродвигателями. Электроприводы способны удовлетворить требованиям различных производственных механизмов: от простых регулируемых по скорости насосов или вентиляторов до самых сложных механизмов прокатных станов, металлорежущих станков и бумагоделательных машин [87].

Общим для всех новых преобразователей частоты фирмы ABB является то, что для управления приводным электродвигателем переменного тока используется принцип прямого управления моментом и током, DTC, подробно рассмотренный в [52]. Регулируемые электроприводы, предлагаемые фирмой ABB, обеспечивают высокую точность регулирования скорости и момента электродвигателя в статических и динамических режимах работы электропривода, повышенный пусковой момент и высокую перегрузочную способность электродвигателя. Кроме того, они имеют высокое быстродействие системы регулирования при изменениях нагрузки и при колебаниях напряжения сети, оптимальное значение потока возбуждения электродвигателя при минимальных потерях. Также минимизируются удары и вибрации в механической части привода, благодаря плавному изменению момента и малой величине его пульсаций в процессе регулирования.

Вся рассматриваемая гамма преобразователей частоты ACS 800 разделяется на три основные группы:

– комплектные, предназначенные для конструирования однодвигательных электроприводов;

– в модульном исполнении, для конструирования однодвигательных и многодвигательных электроприводов;

– комплектные, предназначенные для конструирования многодвигательных электроприводов.

Первая группа состоит из шести серий преобразователей, во вторую входят две серии, а третья группа представляет собой одну серию.

Основные технические характеристики общие для всех серий преобразователей, следующие:

– шкала напряжений питания состоит из четырех отрезков: 208–240 В, 380–415 В, 380–500 В, 525–690 В при частоте 48–63 Гц;

– коэффициент мощности 0,93–0,98 для преобразователей без рекуперации и 0,99–1,0 – для рекуперативных преобразователей;

– частота выходного напряжения – 0–300 Гц;

– быстродействие при регулировании момента электродвигателя – не хуже 5 миллисекунд;

– точность регулирования скорости:

статическая: без обратной связи – 10% номинального скольжения электродвигателя;

с обратной связью – 0,01% номинальной скорости электродвигателя;

динамическая: без обратной связи – 0,3–0,4 с при набросе номинального момента;

с обратной связью – 0,1–0,2 с при набросе номинального момента;

– рабочая температура от –15° С до +50° С, со снижением мощности при температуре от + 40° С до +50° С (1% на 1° С), но для серий ACS800-x04 и ACS800-x07 – от 0 до +50 С, со снижением мощности при температуре от + 40° С до +50° С (1% на 1° С)%;

– охлаждение – воздушное.

Как будет видно из дальнейшего рассмотрения, при конструировании регулируемых электроприводов промышленных механизмов широкое распространение должны получить преобразователи частоты, составляющие следующие пять серий первой группы:

ACS800-01, ACS800-11, ACS800-02, ACS800-07, ACS 800-17, ACS800-31 и ACS800-37. Все они предназначены для конструирования однодвигательных электроприводов с приводными асинхронными или синхронными с возбуждением от постоянных магнитов электродвигателями.

Серию ACS800-01 образуют преобразователи частоты без рекуперации, мощностью от 1,1 кВт до 110 кВт (от 0,55 кВт до 75 кВт для тяжелого режима работы). Их особенностью является то, что конструктивно они предназначены для навесного монтажа, открытого или в шкафах. Преобразователи выдерживают рабочую перегрузку 10% в течение 1 мин в цикле 5 мин при температуре + 40° С, при использовании по мощности в легком режиме или 50% в течение 1 мин в цикле 5 мин при температуре + 40° С, но при использовании по мощности в тяжелом режиме. Степень защиты преобразователей – IP21, по заказу может быть IP55.



Преобразователи частоты серии ACS800-01

В серию ACS800-11 входят комплектные преобразователи частоты для конструирования рекуперативных электроприводов мощностью от 7,5 кВт до 110 кВт (от 5,5 кВт до 75 кВт – для тяжелого режима работы). Конструктивно эти преобразователи имеют встроенные LCL фильтр и активный модуль питания и также предназначены, как и преобразователи предыдущей серии, для навесного монтажа. Перегрузочные характеристики их зависят от режима использования мощности и полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущей серии. Степень защиты преобразователей – IP21. Эти преобразователи частоты могут найти широкое применение для электроприводов механизмов с повышенными требованиями к точности отработки траекторий движения, например, для крановых механизмов и т.п.



Преобразователи частоты серии ACS800-11

Серию ACS800-02 образуют комплектные преобразователи частоты без рекуперации для конструирования электроприводов мощностью от 55 кВт до 560 кВт (от 45 кВт до 450 кВт для тяжелого режима работы). Конструктивно каждый преобразователь этой серии представляет собой шкаф высотой 1,5 м или 2 м, приспособленный для отдельной установки. Перегрузочные возможности преобразователей зависят от режима использования мощности и практически полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий. Для некоторых типоисполнений максимальная перегрузка 50% при тяжелом режиме работы допускается только при температуре ниже 40° С. Степень защиты шкафов преобразователей – IP21.



Преобразователь частоты серии ACS800-02

Серия ACS800-07 так же, как и предыдущая, предназначена для конструирования промышленных электроприводов повышенной мощности, не требующих рекуперации. Мощность преобразователей этой серии составляет от 75 кВт до 2800 кВт (от 45 кВт до 2100 кВт для тяжелого режима работы). Конструктивное исполнение преобразователей этой серии – в шкафах повышенной жесткости, для использования в промышленных условиях. При этом преобразователи мощностью до 560 кВт выполнены на базе единой модульной конструкции, в которую входят выпрямитель питания и инвертор, и размещаются в одном шкафу. Преобразователи большей мощности выполнены на основе отдельных модулей выпрямителей питания, которые могут иметь шестипульсную или двенадцатипульсную схемы выпрямления, и модулей инверторов. Эти преобразователи размещаются в двух и более шкафах. Их перегрузочные возможности зависят от режима использования мощности и практически полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий. Для некоторых типоисполнений максимальная перегрузка 50% при тяжелом режиме работы допускается только при температуре ниже 40° С. Степень защиты шкафов преобразователей – IP21.

Область применения преобразователей частоты двух предыдущих серий весьма широка – от электроприводов насосов и вентиляторов средней и большой мощностей до электроприводов прокатных клетей непрерывных мелкосортных, среднесортных и заготовочных прокатных станов.

В серию ACS800-17 входят комплектные преобразователи частоты для конструирования электроприводов с рекуперацией, мощностью от 55 кВТ до 2500 кВт (от 45 кВт до 1800 кВт для тяжелого режима работы). Конструктивно они выполняются в шкафах, со встроенными сетевыми фильтрами и реверсивными выпрямителями питания. Преобразователи этой серии обеспечивают существенную экономию электроэнергии, отдаваемой в сеть в тормозных режимах механизма. Благодаря активному входному выпрямителю питания у этих преобразователей обеспечивается поддержание выходного напряжения на статоре электродвигателя при снижении напряжения питающей сети. Перегрузочные возможности преобразователей зависят от режима использования мощности и полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий во всем диапазоне рабочих температур. Степень защиты шкафов – IP21.



Преобразователь частоты серии ACS800-07



Преобразователь частоты серии ACS800-17

Область возможного применения таких преобразователей – электроприводы механизмов, которые требуют длительной работы в генераторном режиме, например, механизмы подъема мощных кранов, разматыватели полосы прокатных станов и агрегатов обработки полосы, петлевые накопители полосы вертикального и горизонтального типов на агрегатах обработки полосы и другие подобные промышленные механизмы.

Преобразователи частоты серий ACS800-31 и ACS800-37 представляют особый интерес для некоторых случаев промышленного применения. Эти преобразователи предназначены для конструирования электроприводов без рекуперации, но они обеспечивают в процессе работы потребление из сети тока с низким содержанием высших гармонических составляющих. Так, если ток, потребляемый из сети шестипульсным выпрямителем, содержит до 30% высших гармонических, двенадцатипульсным – до 12%, а восемнадцатипульсным – до 8%, то в токе, потребляемом из сети преобразователями частоты рассматриваемой серии, содержится не более 4% высших гармонических. Мощность преобразователей серии ACS 800-31 от 5,5 кВт до 110 кВт, а серии ACS800-37 – от 55 кВт до 2800 кВт (от 45 кВт до 2000 кВт для тяжелого режима работы). Перегрузочные возможности преобразователей зависят от режима использования мощности и полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий во всем диапазоне рабочих температур. Конструктивное исполнение преобразователей – шкафы со степенью защиты – IP21.

Область применения таких преобразователей – это регулируемые электроприводы, минимально искажающие синусоидальное напряжение питающей сети, например, по условиям требований других потребителей.

Вторую группу составляют две серии модульных преобразователей частоты ACS 800-04 и ACS800-x04, которые предоставляют проектировщику возможность свободного конструирования однодвигательных и многодвигательных регулируемых электроприводов переменного тока. Все эти модули имеют конструктивное исполнение по степени защиты IP00 и требуют установки в шкафах.



Преобразователь частоты серии ACS800-37

Серия модулей ACS800-04 предназначена для конструирования однодвигательных электроприводов без рекуперации и состоит из нескольких отрезков. Первый отрезок этой серии мощностью от 1,1 кВт до 132 кВт (от 0,55 кВт до 110 кВт для тяжелого режима работы) содержит малогабаритные модули, предназначенные для навесного монтажа, при необходимости рядом друг с другом. Второй отрезок серии представляет собой компактные модули большей мощности от 55 кВт до 560 кВт (от 45 кВт до 450 кВт – для тяжелого режима работы), которые приспособлены для монтажа в отдельных шкафах.

Наконец, третий отрезок рассматриваемой серии – это модули для конструирования однодвигательных электроприводов большой мощности – от 500 кВт до 1900 кВт (от 400 кВт до 1400 кВт для тяжелого режима работы). В этом отрезке серии произведено конструктивное разделение модулей питания и модулей инверторов. Они представляют собой отдельные законченные конструкции, для установки которых необходимы отдельные шкафы для каждого. При этом, модули питания и модули инверторов преобразователей большой мощности состоят из двух и более единиц, работающих параллельно, при соответствующем количестве шкафов. Перегрузочные возможности преобразователей зависят от режима использования мощности и практически полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий. Однако для некоторых типоисполнений допускается максимальная перегрузка до 50% при тяжелом режиме работы только при температуре до 40° С.

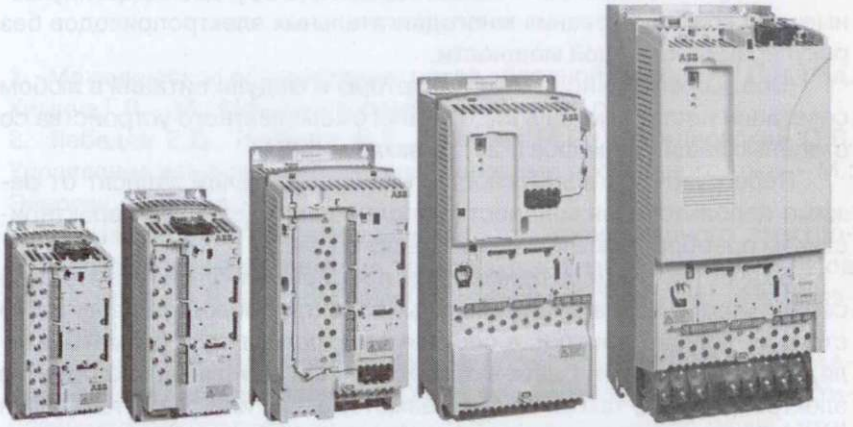
Серия модулей ACS800-x04 предназначена для создания многодвигательных регулируемых электроприводов с общим звеном постоянного тока, с рекуперацией и без рекуперации. Она также включает в себя несколько отрезков. Первую часть серии (ACS800-104) составляют модули инверторов мощностью от 1,5 кВт до 2000 кВт (от 1 кВт до 1400 кВт – для тяжелого режима работы). В нее входят модули большой мощности, от 630 кВт и выше, которые состоят из двух и более работающих параллельно инверторных мостов. При этом каждый из них требует для своей установки отдельного шкафа. Вторая часть серии – это модули питания. Эти модули имеют три исполнения:

– модули ACS800-204 – на базе IGBT-транзисторов (ISU), для создания многодвигательных электроприводов с рекуперацией;

– модули ACS800-404 – на основе двух мостов тиристоров (TSU), для конструирования многодвигательных электроприводов с рекуперацией, большой мощности;

– модули ACS800-304 и ACS800-704 – на базе диодов (DSU), с шестипульсной или двенадцатипульсной схемами выпрямления, предназначены для конструирования многодвигательных электроприводов без рекуперации, средней и большой мощности.

Перегрузочные возможности преобразователей серии ACS800-x04 зависят от режима использования мощности и полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий.



Модули преобразователей частоты серии ACS800-04

Третью группу представляет **серия ACS800-x07**. В нее входят поставляемые комплектно преобразователи частоты для конструирования разнообразных многодвигательных электроприводов с общим звеном постоянного тока и необходимым количеством инверторов, определяемым при проектировании. Для комплектации многодвигательного электропривода в серии имеются инверторы и источники питания. Инверторы мощностью от 1,5 до 5600 кВт (от 1,1 кВт до 4000 кВт для тяжелого режима работы) составляют серию ACS800-107. Модули питания, как и в предыдущем случае, имеют три исполнения – ISU, TSU, DSU:

– модули ACS800-207 – на базе IGBT-транзисторов (ISU), для создания многодвигательных электроприводов с рекуперацией;

– модули ACS800-407 – на базе двух мостов тиристоров (TSU), шестипульсные, для конструирования многодвигательных электроприводов с рекуперацией;

– модули ACS800-807 – на базе четырех мостов тиристоров (TSU), двенадцатипульсные, для конструирования многодвигательных электроприводов с рекуперацией, большой мощности;

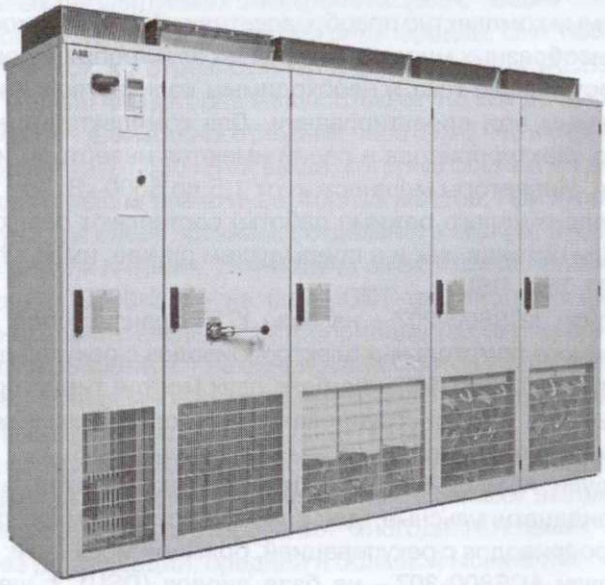
– модули ACS800-307 – на базе диодов (DSU), с шестипульсной схемой выпрямления, для конструирования многодвигательных электроприводов без рекуперации;

– модули ACS800-507 – на базе диодов (DSU), двенадцатипульсные, для конструирования многодвигательных электроприводов без рекуперации, большой мощности.

Все вышеперечисленные инверторы и модули питания в любом сочетании поставляются в виде единого комплектного устройства со степенью защиты шкафов IP21, по заказу – IP54.

Перегрузочные возможности преобразователей зависят от режима использования мощности и полностью идентичны характеристикам преобразователей предыдущих серий.

В качестве примера применения преобразователей частоты этой серии можно назвать комплексный электропривод реверсивного стана холодной прокатки, в составе электроприводов разматывателя, прокатной клети и двух моталок полосы. Учитывая, что один из электроприводов такого стана (разматыватель или разматывающая моталка) всегда работает в генераторном режиме, при применении такого комплексного электропривода можно уменьшить мощность общего модуля питания. Кроме того, это обеспечивает уменьшение суммарного потребления электроэнергии при прокатке полосы.



Преобразователь частоты серии ACS800-207 для многодвигательного электропривода

ЛИТЕРАТУРА

1. Механическое оборудование цехов холодной прокатки / Под ред. Химича Г.Л. – М.: Машиностроение, 1972. – 536 с.
2. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергия, 1970. – 192 с.
3. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. Круповича В.И., Барыбина Ю.Г., Самовера М.Л. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
4. Шубенко В.А., Альшиц В.М. Анализ и синтез регуляторов натяжения моталок листовых станов. // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: научн.-техн. журнал. – 1970. – № 1–2. – С. 3–7.
5. Лимонов Л.Г. Передаточная функция полосы при регулировании натяжения или удлинения на линиях обработки стальной ленты. // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: научн.-техн. журнал. – 1972. – № 5. – С. 8–11.
6. Морозов Д.П. К теории электромеханических процессов в электроприводе станов холодной прокатки. // Вестник электропромышленности: научн.-техн. журнал. – 1944. – № 3. – С.15–18.
7. Файнберг Ю.М. Натяжение и расход энергии при холодной прокатке. // Сталь: научн.-техн. журнал. – 1943. – №№ 3, 4.
8. Хрусталев И.К., Лимонов Л.Г., Моргулис В.П. Динамика электроприводов с регуляторами натяжения косвенного действия. // Известия ВУЗов, Электромеханика: научн.-техн. журнал. – 1972. – № 11. – С. 1221–1228.
9. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Динамика САР натяжения линий непрерывной обработки полосы. // Электротехническая промышленность. Серия Электропривод: научн.-техн. журнал. – 1974. – Вып. 3 (29). – С. 15–17.
10. Лимонов Л.Г. О влиянии упругой связи через полосу на динамику многодвигательного электропривода. // Электромашиностроение и электрооборудование: научн.-техн. журнал. – 1980. – Вып. 30. – С. 51–59.
11. Шаталов А.С. Структурные методы в теории управления и электроавтоматике. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 327 с.

12. Кузовков Н.Т. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. – М.: Оборонгиз, 1960. – 444 с.
13. Лимонов Л.Г., Мацько Е.М., Таращанский П.И. Динамика систем прямого регулирования натяжения на линиях непрерывной обработки полосы. // Электротехническая промышленность. Серия Электропривод: научн.-техн. журнал. – 1980. – Вып. 1(81). – С. 10–13 .
14. Лимонов Л.Г., Таращанский П.И. Аналитический метод определения параметров логарифмических амплитудно-частотных характеристик электропривода. // Реферативная информация о передовом опыте. Серия 2. Монтаж и наладка электрооборудования: научн.-техн. журнал. – 1972. – № 2 (86). – С. 23–26.
15. Честнат Г., Майер Р. Проектирование следящих систем и систем регулирования. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – Часть 1. – 487 с.
16. Шипилло В.П. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия, 1968. – 400 с.
17. Загальский Л.Н., Зильберблат М.Э. Частотный анализ систем автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 110 с.
18. Лимонов Л.Г. Зависимое управление многодвигательным электроприводом натяжных механизмов. // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: научн.-техн. журнал. – 1979. – № 4. – С. 8–14.
19. Лимонов Л.Г. Управление многодвигательным электроприводом многороликовых натяжных механизмов. // Электромашиностроение и электрооборудование: научн.-техн. журнал. – 1981. – Вып. 32. – С. 28–36.
20. А.с. 560312 СССР. Устройство для управления электроприводом натяжного механизма / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И. – Б.И. – 1977. – № 20.
21. А.с. 712920 СССР. Устройство для управления электроприводом натяжного механизма / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И. – Б.И. – 1980. – № 4.
22. А.с. 758457 СССР. Устройство для управления многодвигательным электроприводом многороликового натяжного механизма / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И. – Б.И. – 1980. – № 4.
23. А.с. 743151 СССР. Устройство для управления многодвигательным электроприводом тянущей станции / Лимонов Л.Г., Рудаков В.П. Дрозд И.Г. – Б.И. – 1980. – № 23.

24. А.с. 1193761 СССР. Устройство для управления электроприводом натяжного механизма / Бутаков В.Н, Лимонов Л.Г., Ранио Г.Ф. – Б.И. – 1985. – № 43.
25. А.с. 1735811 СССР. Устройство для управления накопителем полосы/ Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Шнаперман И.Л. и др. – Б.И. – 1992. – № 19.
26. А.с. 1735810 СССР. Устройство для управления накопителем полосы / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Шнаперман И.Л. и др. – Б.И. – 1992. – № 19.
27. А.с. 1304994 СССР. Устройство управления летучими ножницами / Лимонов Л.Г., Розов И.Д., Холодный В.И. и др. – Б.И. – 1987. – № 15.
28. Патент України на винахід UA 36111 A. Спосіб циклічної синхронізації рухомих об'єктів / Холодний В.І. – Б. – 2001. – № 3.
29. Лимонов Л.Г., Розов И.Д. Влияние механизма выравнивания скоростей на динамику электропривода летучих ножниц. // Электромашиностроение и электрооборудование: научн.-техн. журнал. – 1989. – Вып. 43. – С. 38–45.
30. Справочник машиностроителя: Т.1. – М.: Машгиз, 1961, – 567 с.
31. А.с. 1440627 СССР. Устройство управления летучими ножницами, работающими в режиме непрерывного вращения / Лимонов Л.Г., Розов И.Д., Холодный В.И. и др. – Б.И. – 1988. – № 44.
32. А.с. 1820470 СССР. Способ регулирования скорости электропривода двухмассовой системы. / Холодный В.И. – Б.И. – 1993. – № 21.
33. Лимонов Л.Г. Позиционный электропривод переменного тока на базе серийного устройства плавного пуска. // Електромашинобудування та електрообладнання: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2006. – Вип.66. – С. 25–26.
34. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П. Управление многодвигательным электроприводом металлургического агрегата. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вып. 10. – С. 210-211.
35. А.с. 1374394 СССР. Многодвигательный электропривод агрегата непрерывной обработки полосы материала. / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Ранио Г.Ф. и др. – Б.И. – 1988. – № 6.
36. А.с. 1718361 СССР. Взаимосвязанный электропривод агрегата непрерывной обработки полосового материала. / Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Шнаперман И.Л. и др. – Б.И. – 1992. – № 9.

37. А.с. 1227283 СССР. Электропривод агрегата перемотки полосы / Лимонов Л.Г., Некрасова Л.В., Таращанский П.И. и др. – Б.И. – 1986. – № 16.
38. Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Тикоцкий А.Е. Управление взаимосвязанным электроприводом агрегата перемотки полосы. // Монтажные и специальные строительные работы. Серия 2. Монтаж и наладка электрооборудования. – Экспресс-информация. – 1988. – Вып.1. – С.12–16.
39. Васильев В.А., Некрасова Л.В. Исследование и оптимизация систем двухзонного регулирования скорости главных приводов стана холодной прокатки. // Новое в проектировании промышленных электроустановок. Труды института «Тяжпромэлектропроект». – 1975. – Вып.2. – С.165–169.
40. Зильберман Б.З., Васильев В.А., Некрасова Л.В., Фельдман Ю.З. Исследование и модернизация регулятора ЭДС в системе двухзонного регулирования скорости главных приводов стана холодной прокатки. // Новое в проектировании промышленных электроустановок. Труды института «Тяжпромэлектропроект». – 1975. – Вып.2. – С.187–194.
41. Цаллагов А.П., Белявский Р.Э., Ващенко А.П., Добрынина О.Е. Упругие колебания в системе электропривода клети стана горячей прокатки. // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: научн.-техн. журнал. – 1980. – № 1. – С. 3–7.
42. Справочник машиностроителя: Т. 3. – М.: Машгиз, 1961. – 731 с.
43. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов. – М.: Машиностроение, 1980. – 151 с.
44. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 288 с.
45. Лимонов Л.Г., Таращанский П.И., Тикоцкий А.Е. Опыт демпфирования упругих колебаний главного привода стана холодной прокатки. // Монтажные и специальные строительные работы. Серия 2. Монтаж и наладка электрооборудования. – Экспресс-информация. – 1988. – Вып.2. – С. 8–13.
46. Лимонов Л.Г. Микропроцессорное управление электроприводом по системе генератор-двигатель. // Электротехника: научн-техн. журнал. – 2004. – № 1. – С. 47–52.
47. Дралюк Б.Н. Тикоцкий А.Е. Двухдиапазонное управление электродвигателем моталки стана холодной прокатки листа. // Электричество: научн-техн. журнал. – 1969. – № 5. – С. 41–45.

48. Альшиц В.М., Зеленцов В.И., Тикоцкий А.Е. Электроприводы моталок и разматывателей станов холодной прокатки. – М.: ИНФОРМЭЛЕКТРО, –1980. – 57 с.
49. Лимонов Л.Г. Особенности применения асинхронного электродвигателя для привода моталки полосы. // Электротехника: научн-техн. журнал. – 2006. – № 11. – С. 61–65.
50. Лимонов Л.Г. Об особенностях использования асинхронного электродвигателя для привода моталки. // Електротехніка і електромеханіка: научн-техн. журнал. – 2007. – № 4. – С. 40–44.
51. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С., Лебедев Е.Д., Тарасенко Л.М. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 256 с.
52. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателя переменного тока. – Харьков: Основа. – 2004. – 210 с.
53. Богданов Е.М. Анализ процессов регулирования реверсивных станов холодной прокатки. // Вестник электропромышленности: научн-техн. журнал. – 1939. – № 9. – С.16-18.
54. Лимонов Л.Г. Компенсация динамического момента приводов моталок высокоскоростных станов холодной прокатки. // Электрификация и автоматизация промышленных предприятий: сб. статей. – Калинин. – 1971. – С. 31–38.
55. Лимонов Л.Г., Таращанский П.И. Настройка узла компенсации динамического момента намоточных механизмов прокатных станов. // Реферативная информация о передовом опыте. Серия 2. Монтаж и наладка электрооборудования: научн.-техн. журнал. – 1973. – Вып. 3(99). – С.16–18.
56. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – С-П.: Энергоатомиздат. – 1994. – 496 с.
57. Лимонов Л.Г. Компенсация динамического момента асинхронного электропривода моталки полосы. // Електротехніка і електромеханіка: научн-техн. журнал. – 2008. – № 5. – С. 24–25.
58. Лимонов Л.Г. О реконструкции тиристорных электроприводов двухклетевого стана холодной прокатки. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 30. – С. 280–282.
59. Лимонов Л.Г. Кирсенко А.Н. Система синхронизации двухдвигательного электропривода нажимных винтов стана холодной прокатки.

// Вестник НТУ «ХПИ». – 2001: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 10. – С. 214–215.
60. Патент України на винахід. UA 28979 A. Спосіб регулювання положення електроприводу. / Холодний В.І., Поліванов В.А. – Б. – 2000. – № 5–11.
61. А.с. 1237330 СССР. Устройство для управления летучими ножницами при резе полосы в конце смотки рулона на стане бесконечной прокатки. / Гуревич В.Л., Лимонов Л.Г. – Б.И. – 1986. – № 22.
62. Лимонов Л.Г., Мацько Е.М., Тункель С.Б. Тиристорный электропривод механизма поворота конвертора. // Монтажные и специальные строительные работы. Серия 2. Монтаж и наладка электрооборудования. – Экспресс-информация. – 1979. – Вып.11. – С. 12–17.
63. А.с. 828354 СССР. Многодвигательный электропривод./ Лимонов Л.Г. – Б.И. – 1981. – № 17.
64. А.с. 1283935 СССР. Многодвигательный электропривод. / Лимонов Л.Г. Палей М.Я. – Б.И. – 1987. – № 2.
65. А.с. 1465932 СССР. Устройство для управления многодвигательным электроприводом механизма передвижения роторного экскаватора. / Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Меерович А.Я. – Б.И. – 1989. – № 10.
66. Дубенецкий А.С., Куленцов В.А., Лимонов Л.Г., Потапов С.В. Электроприводы и система управления машины подачи кислорода. // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Днепродзержинск. – 2007. – С.224–225.
67. Лимонов Л.Г., Некрасова Л.В. О выборе тиристорных преобразователей постоянного тока для электроприводов с тяжелым режимом работы. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 43. – С. 118.
68. SIMOREG 6RA70. Цифровые встраиваемые преобразователи тока.
69. Каталог DA21.1. – 2001. – 170 с.
70. Лимонов Л.Г., Палей М.Я. Уровень напряжения изоляции двигателя постоянного тока. // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: научн.-техн. журнал. – 1971. – № 2. – С. 3–6.
71. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Некрасова Л.В. О проектировании защитного заземления и зануления промышленных установок. // Промэлектро: научн.-техн. журнал. – 2004. – № 3. – С. 52–54.

72. ДНАОА 0.00-1.32-01. Правила устройств электроустановок. Электрооборудование специальных установок. – К.: Укрархстройинформ. – 2001. – 74 с.
73. SIMATIC. Программируемый контроллер S7-300. – Аппаратура и монтаж. -2002. – 258 с.
74. SIMATIC. Децентрализованная периферия ET200M. – Руководство. – 188с.
75. Ганин М.П., Моргулис В.П., Некрасова Л.В., Бондаренко А.Б. Многодвигательный электропривод крутонаклонного конвейера по схеме АВК. – Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Днепродзержинск. – 2007. – С. 576–577.
76. Симсон А.Э. Испытание тепловозных и судовых дизелей типа Д100. – М.: Машгиз, 1960. – 217 с.
77. Шенфер К.И., Свириденко П.А. Рекуперация энергии в промышленности. – М.: Госэнергоиздат. – 1946. – 58 с.
78. А.с. 991227 СССР. Испытательный стенд тепловозных дизелей / Лимонов Л.Г., Орел О.А. – Б.И. – 1983. – № 3.
79. А.с. 1021972 СССР. Стенд для испытания двигателя внутреннего сгорания. / Афанасьев А.Ф., Лимонов Л.Г., Орел О.А. и др. – Б.И. – 1983. – № 21.
80. Лимонов Л.Г., Нетеса А.Н. Микропроцессорная система управления и защиты синхронного электродвигателя большой мощности. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 45. – С. 339–340.
81. Орел О.А. Регулирование реактивной мощности крупного синхронного двигателя. // Электричество: научн-техн. журнал. – 1976. – № 3. – С. 77–80.
82. Орел О.А. О регулировании реактивной мощности крупного синхронного двигателя. // Электричество: научн-техн. журнал. – 1979. – № 3. – С. 73.
83. Орел О.А. Повышение эффективности использования синхронных двигателей в системах промышленного электропривода. // Автоматизированный электропривод./ Под ред. Ильинского Н.Ф, Юнькова М.Г. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 258–263.
84. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Нетеса А.Н. Применение преобразователей частоты для питания асинхронных двигателей крановых механизмов. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність: научн-техн. журнал. – 2007. – Ч. 3. – С.119–120

85. ABB industrial drives. ACS800, drive modules, 0,55kW–1900kW. Technical catalogue.
86. ABB industrial drives. ACS800, single drives, 0,55 to 2800kW. Technical catalogue.
87. ABB industrial drives. ACS800 multidrive, 1,5kW–5600kW. Technical catalogue.
88. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Хропачев Г.И. Применение серийных преобразователей частоты фирмы ABB с прямым управлением моментом электродвигателя. // Електромашинобудування та електрообладнання: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2006. – Вип. 66. – С.19–22.
89. Драчев С.В., Лимонов Л.Г. О применении преобразователей частоты семейства SINAMICS фирмы SIEMENS. //Електрик: научн-техн. журнал. – 2005. – №№ 3, 4, 5.
90. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П., Нетеса А.Н. Электроприводы и автоматизация промышленных кранов. // Подъемные сооружения. Специальная техника. – научн-техн. журнал. – 2008. – № 3. – С.18–20.
91. Лимонов Л.Г., Креславский А.И., Теслицкий А. Н. Регулируемый электропривод переменного тока подъемных кранов специального назначения. // Електромашинобудування та електрообладнання: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2006. – Вип. 66. – С.136-137.
92. Лимонов Л.Г., Нетеса А.Н., Креславский А.И., Теслицкий А.Н. Электроприводы переменного тока основных механизмов портального крана с грейферным и крюковым захватом. // Електромашинобудування та електрообладнання: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2006. – Вип. 66. – С.138–140.
93. А.с. 1799844 СССР. Устройство для управления приводом передвижения крановой тележки с гибкой подвеской. / Холодный В.И. – Б.И. – 1993. – № 9.
94. Патент на изобретение № 54172. Украина. Устройство для управления приводом транспортного механизма с гибкой подвеской груза. / Холодный В.И. – Б. – 2003. – № 2.
95. Лимонов Л.Г., Нетеса А.Н., Некрасова Л.В. Особенности тормозных режимов электроприводов по системе ПЧ-АД. // Електромашинобудування та електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – 2004. – Вип.62. – С. 25–27.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

Глава 1. Многодвигательный электропривод агрегатов непрерывной обработки полосы 5
1.1. Технологические требования и принципы управления 5
1.2. Электропривод ведущего механизма агрегата 9
1.3. Электропривод тянущего механизма агрегата 13
1.4. Электропривод многороликовых натяжных механизмов 30
1.5. Электропривод петлевого накопителя полосы 37
1.6. Электропривод летучих ножниц агрегата поперечной резки полосы 47
1.7. Позиционный электропривод настройки дисковых ножниц . . . 72
1.8. Управление многодвигательным электроприводом агрегата обработки полосы 74

Глава 2. Электроприводы механизмов станов холодной прокатки 86
2.1. Двухмассовый электропривод валков 86
2.2. Микропроцессорное управление электроприводом валков по системе Г-Д 97
2.3. Электропривод моталки по системе ПЧ-АД 108
2.4. Компенсация динамического момента электропривода моталки 125
2.5. О реконструкции тиристорных электроприводов двухклетевого стана холодной прокатки 131
2.6. Аналого-цифровая система синхронизации двухдвигательного электропривода нажимных винтов 138
2.7. Энергосберегающее управление позиционированием электроприводов нажимных винтов 142
2.8. Электропривод летучих ножниц стана «бесконечной» холодной прокатки 146

Глава 3. Электроприводы повышенной надежности и экономичности 149
3.1. Многодвигательные электроприводы 149
3.2. Электроприводы машины подачи кислорода в конвертор 154
3.3. О выборе тиристорных преобразователей постоянного тока для электроприводов с тяжелым режимом работы 161

3.4. Уровень изоляции электродвигателя постоянного тока при питании его от тиристорного преобразователя 163
3.5. Заземление микропроцессорного электрооборудования электроприводов 169
3.6. Экономичный электропривод по схеме асинхронного вентильного каскада 173
3.7. Управление рекуперацией энергии при испытаниях двигателей внутреннего сгорания 180
3.8. Модернизация систем автоматического регулирования возбуждения синхронных электродвигателей 186

Глава 4. Электроприводы крановых механизмов 195
4.1. Электроприводы по системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» 195
4.2. Электроприводы подъемных кранов специального назначения 200
4.3. Электроприводы и система управления портального крана 203
4.4. Электроприводы мостового крана с грейферным захватом 209
4.5. Электроприводы и система управления полупортальной скрапозавалочной машины 211
4.6. Управление электроприводом крановой тележки с гибкой подвеской груза 214
4.7. Особенности расчета тормозных режимов электроприводов по системе ПЧ-АД 221

Приложения 226
П1. Преобразователи частоты семейства SINAMICS фирмы SIEMENS 226
П2. Серийные преобразователи частоты с прямым управлением моментом и током электродвигателя фирмы ABB 245

Литература 257

Леонід Григорович Лімонов

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Наукове видання
(російською мовою)

Відповідальний за випуск *В.П. Ровенець*
Комп'ютерна верстка *Т.П. Ющенко*

Підписано до друку 22.08.2009 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк ксерографічний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 15,81. Обл.-вид. арк. 13,6. Тираж 300 прим. Зам. №

ТОВ «Видавництво «Форт»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ДК № 333 від 09.02.2001 р.
61023 м. Харків, а/с 10325. Тел. (057) 714-09-08



ЛИМОНОВ ЛЕОНИД ГРИГОРЬЕВИЧ

Кандидат технических наук, главный специалист АОЗТ «Тяжпромавтоматика». Родился в 1936 г. В 1958 г. окончил электротехнический факультет Одесского Политехнического института по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». В 1972 г. в Калининском Политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию «Исследование тиристорных электроприводов с регуляторами натяжения для непрерывных линий обработки полосы».

С 1958 г. инженер, старший инженер, руководитель группы, главный инженер проектов Украинского Государственного проектного и проектно-конструкторского института «Тяжпромэлектропроект». С 1996 г. главный специалист АО «ЭЛАКС», с 2001 г. – главный специалист АОЗТ «Тяжпромавтоматика».

Автор и соавтор более 130 научных публикаций, в том числе 29 Авторских свидетельств СССР на изобретения.

Имеет большой практический опыт научных исследований, разработки, проектирования и внедрения промышленных электроприводов в металлургической и других отраслях промышленного производства.